

# La gran historia del agua







# La gran historia del agua



OLGA GARCÍA MORENO  
ARMANDO MENÉNDEZ VISO  
(EDITORES)

# La gran historia del agua



2022



Reconocimiento-No Comercial-Sin Obra Derivada (by-nc-nd): No se permite un uso comercial de la obra original ni la generación de obras derivadas.



Usted es libre de copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra, bajo las condiciones siguientes:



Reconocimiento – Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el licenciadore:

García Moreno, O.; Menéndez Viso, A. (editores) (2022). *La gran historia del agua*. Universidad de Oviedo.

La autoría de cualquier artículo o texto utilizado del libro deberá ser reconocida complementariamente.



No comercial – No puede utilizar esta obra para fines comerciales.



Sin obras derivadas – No se puede alterar, transformar o generar una obra derivada a partir de esta obra.

© 2022 Universidad de Oviedo

© Los autores

Algunos derechos reservados. Esta obra ha sido editada bajo una licencia Reconocimiento-No comercial-Sin Obra Derivada 4.0 Internacional de Creative Commons.

Se requiere autorización expresa de los titulares de los derechos para cualquier uso no expresamente previsto en dicha licencia. La ausencia de dicha autorización puede ser constitutiva de delito y está sujeta a responsabilidad.

Consulte las condiciones de la licencia en:

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.es>

Este libro ha sido sometido a evaluación externa y aprobado por la Comisión de Publicaciones de acuerdo con el Reglamento del Servicio de Publicaciones de la Universidad de Oviedo.



Esta Editorial es miembro de la UNE, lo que garantiza la difusión y comercialización de sus publicaciones a nivel nacional e internacional

Servicio de Publicaciones de la Universidad de Oviedo

Edificio de Servicios - Campus de Humanidades

ISNI: 0000 0004 8513 7929

33011 Oviedo - Asturias

985 10 95 03 / 985 10 59 56

[servipub@uniovi.es](mailto:servipub@uniovi.es)

[www.publicaciones.uniovi.es](http://www.publicaciones.uniovi.es)

ISBN: 978-84-18324-51-2

DL AS 2922-2022

## ÍNDICE

PRÓLOGO: LA IMPORTANCIA DEL AGUA .....	11
I. EL SIGNIFICADO DEL AGUA EN LA GRAN HISTORIA .....	15
EL DESCUBRIMIENTO DEL PLANETA AZUL .....	15
EL CONCEPTO DEL AGUA .....	20
<i>Principio</i> .....	20
<i>Sustancia elemental</i> .....	22
<i>De elemento a compuesto</i> .....	25
<i>El agua como fuerza histórica</i> .....	35
<i>Fuerza geológica</i> .....	35
<i>Fuerza vital</i> .....	37
<i>Fuerza económica</i> .....	38
<i>Fuerza simbólica</i> .....	39
EL AGUA Y LA GRAN HISTORIA .....	43
II. EL ORIGEN DEL AGUA EN EL UNIVERSO Y EN LA TIERRA ..	49
CREACIÓN Y EVOLUCIÓN DEL UNIVERSO .....	49
NUCLEOSÍNTESIS PRIMORDIAL.....	52
RECOMBINACIÓN Y FORMACIÓN DEL FONDO CÓSMICO DE MICROONDAS ...	55
COMPOSICIÓN DEL UNIVERSO .....	59
LA CREACIÓN Y EVOLUCIÓN DE LAS ESTRELLAS .....	63
FORMACIÓN DEL AGUA EN EL UNIVERSO .....	68
FORMACIÓN DEL SOL Y DEL SISTEMA SOLAR .....	70
ABUNDANCIA DEL AGUA EN EL SISTEMA SOLAR .....	73
FORMACIÓN DE LA TIERRA Y ORIGEN DEL AGUA TERRESTRE.....	78
¿POR QUÉ LA TIERRA ES EL ÚNICO PLANETA DEL SISTEMA SOLAR QUE TIENE AGUA LÍQUIDA EN SU SUPERFICIE? .....	80
EL PAPEL REGULADOR DEL AGUA PARA EL CLIMA TERRESTRE .....	83
CONCLUSIONES .....	85
III. EL AGUA EN LA TIERRA .....	89
EL PLANETA AZUL .....	89

DÓNDE ESTÁ EL AGUA EN LA TIERRA .....	92
EL PLANETA DEL AGUA Y DE LA VIDA .....	99
IV. LA VIDA Y EL AGUA .....	109
INTRODUCCIÓN .....	109
LUCA EVOLUCIONA, SE DIVERSIFICA EN EL AGUA Y SUS	
DESCENDIENTES LIBERAN OXÍGENO.....	110
SURGIMIENTO DE LOS EUCARIOTAS EN EL AGUA .....	112
PREPARANDO EL ACCESO VEGETAL A LA TIERRA.....	115
DONDE TAMBIÉN SE ENCUENTRAN LOS HONGOS .....	116
ORIGEN DE LOS PRIMEROS ANIMALES O METAZOOS .....	116
LAS ESPONJAS.....	119
CNIDARIOS, CTENÓFOROS Y LA SIMETRÍA RADIAL.....	120
LOS GUSANOS PLANOS Y LA APARICIÓN DE LA BILATERALIDAD .....	121
MOLUSCOS, ANÉLIDOS Y OTROS INVERTEBRADOS MARINOS.....	122
LOS EQUINODERMOS Y LOS PRIMEROS CORDADOS .....	123
LA APARICIÓN DE LOS PECES.....	125
EL PALEOZOICO, EL ABANDONO DEL AGUA Y LAS PRINCIPALES	
INNOVACIONES EVOLUTIVAS.....	126
EL ORIGEN DE LAS PLANTAS TERRESTRES Y LOS PRIMEROS ARTRÓPODOS.....	128
LOS PRIMEROS ANFIBIOS.....	131
LOS TERÁPSIDOS DEL PÉRMICO Y EL AMBIENTE ACUOSO DEL	
HUEVO AMNIOTA .....	132
DINOSAURIOS (INCLUIDAS LAS AVES), MAMÍFEROS Y PLANTAS	
CONTINENTALES.....	135
LOS MAMÍFEROS MARINOS DEL CRETÁCICO .....	140
LA EMERGENCIA DE LAS ANGIOSPERMAS .....	142
ORIGEN DE LOS PRIMATES .....	144
V. EL SIGNIFICADO DEL AGUA EN LA EVOLUCIÓN Y	
DISPERSIÓN DE NUESTRA ESPECIE .....	157
EL AGUA Y LA VIDA .....	157
EL PARAÍSO DEL MIOCENO COMO PUNTO DE PARTIDA.....	159
LOS ESTUDIOS SOBRE LA EVOLUCIÓN HUMANA.....	162
¿EL ÚLTIMO ANTEPASADO COMÚN ERA ESTEAFRICANO?.....	167
LOS AUSTRALOPITECOS Y LOS AMBIENTES ACUÁTICOS .....	170

LOS PARÁNTROPOS EN UN MUNDO QUE SE SECA .....	172
LOS PRIMEROS HUMANOS Y EL APROVECHAMIENTO DE LOS RECURSOS ACUÁTICOS.....	174
<i>HOMO ERGASTER</i> , MIGRACIONES Y RECURSOS MARINOS .....	176
LOS ECOSISTEMAS ACUÁTICOS EN ASIA Y SU SIGNIFICADO EN EL LINAJE HUMANO .....	179
LOS ÁCIDOS GRASOS ESENCIALES Y EL CRECIMIENTO DEL CEREBRO .....	183
EL HOMBRE DE NEANDERTAL Y EL VALOR DEL AGUA EN LA SUPERVIVENCIA ..	186
LOS HUMANOS ANATÓMICAMENTE MODERNOS Y SU DISPERSIÓN POR EL PLANETA.....	190
AUSTRALIA, NUEVA GUINEA Y TASMANIA .....	199
LA ENTRADA EN EUROPA.....	201
LA LLEGADA A AMÉRICA.....	203
LA OCEANÍA REMOTA .....	205
 VI. LA PREHISTORIA Y EL AGUA.....	 219
LOS SENDEROS PALEOLÍTICOS Y LA ORGANIZACIÓN DEL HÁBITAT.....	219
SECUENCIAS DEPOSICIONALES Y TAFONOMÍA.....	223
GOTA A GOTA, GRAFÍAS RUPESTRES Y CRONOLOGÍA .....	228
FLUJO ACUOSO, PATRIMONIO RUPESTRE Y CONSERVACIÓN .....	231
LA PALABRA Y EL AGUA .....	234
CONCLUSIONES .....	235
 VII. EL AGUA Y LA VIDA: CÓMO LOS ANIMALES ACUÁTICOS CAMBIARON NUESTRA HISTORIA.....	 243
PRIMEROS ALIMENTOS DE ORIGEN ACUÁTICO, APARICIÓN Y DESARROLLO DE LA PESCA Y LA ACUICULTURA.....	244
ANIMALES ACUÁTICOS MEDICINALES Y PRODUCTOS TERAPÉUTICOS DE ORIGEN ACUÁTICO .....	252
IMPORTANCIA DE LOS GUSANOS MARINOS PARA EL HOMBRE Y EL ECOSISTEMA: LOS POLIQUETOS EUNICIFORMES COMO EJEMPLO.....	265
 VIII. ECOLOGÍA ACUÁTICA Y SERES HUMANOS: PERSPECTIVA DIDÁCTICA .....	 271
INTRODUCCIÓN .....	271
EL AGUA Y LA DISTRIBUCIÓN DE LA BIODIVERSIDAD .....	272

CICLO NATURAL DEL AGUA .....	273
CUENCAS HIDROGRÁFICAS Y CORREDORES FLUVIALES .....	273
IMPORTANCIA CULTURAL DE LA ECOLOGÍA ACUÁTICA .....	278
LA HUMANIDAD MODIFICA EL CICLO DEL AGUA... ..	280
... TRASLOCA ESPECIES .....	283
... AFECTA A LA CALIDAD DEL AGUA... ..	284
... Y MODIFICA LAS COMUNIDADES DE SERES VIVOS ASOCIADAS.....	288
REVERTIENDO INTERACCIONES NEGATIVAS .....	290
ALGUNAS ORIENTACIONES DIDÁCTICAS .....	292
IX. AGUA, DESASTRES Y GÉNERO.....	305
INTRODUCCIÓN .....	305
EL AGUA Y LOS DESASTRES.....	306
EL AGUA Y EL GÉNERO .....	310
LA PERSPECTIVA DE GÉNERO EN EL ESTUDIO DE LOS DESASTRES ASOCIADOS AL AGUA .....	317
<i>El enfoque de la vulnerabilidad</i> .....	318
<i>El enfoque de las capacidades</i> .....	326
LA AGENDA INTERNACIONAL SOBRE EL AGUA Y LOS DESASTRES DESDE LA PERSPECTIVA DE GÉNERO .....	328
REFLEXIONES FINALES.....	330
X. LA PEQUEÑA GRAN HISTORIA DE OVIEDO Y EL AGUA ..	335
OVIEDO, UNA CIUDAD SIN RÍO. EL CONTEXTO GEOLÓGICO Y GEOGRÁFICO..	336
<i>De agua a roca</i> .....	336
<i>La formación del relieve</i> .....	338
<i>De la atmósfera a la hidrosfera</i> .....	345
<i>El agua en circulación</i> .....	349
<i>De la hidrosfera a la biosfera</i> .....	350
OVIEDO, UNA CIUDAD SIN RÍO. LA HISTORIA HIDRÁULICA URBANA.....	356
<i>El agua en la ciudad medieval</i> .....	357
<i>El agua en la ciudad moderna</i> .....	362
<i>El agua en la ciudad contemporánea</i> .....	372

## PRÓLOGO: LA IMPORTANCIA DEL AGUA

Cuando era adolescente, pensaba que el agua no era nada especial. Vivía en Holanda y allí casi nunca faltaba el agua: las lluvias frecuentes, la presencia de tantos ríos y canales, la cercanía del mar... Además, por los grifos de nuestra casa el agua siempre salía abundante y limpia, y no costaba casi nada. ¿Cómo podría ser especial el agua en tales circunstancias?

Al estudiar bioquímica en los años setenta del siglo pasado, comencé a cambiar de opinión. Aprendí que, aunque abundante y muy sencilla de estructura —consistiendo solo de hidrógeno y oxígeno—, en realidad el agua es una sustancia química muy poco común, y sus propiedades fisicoquímicas son bastante complicadas. «Todavía no las comprendemos muy bien», nos enseñó entonces un profesor de la universidad. Aún sigue siendo el caso hoy en día, creo.

Al mismo tiempo el agua permite un sinfín de reacciones bioquímicas muy sutiles en solución, no solo dentro de nuestros cuerpos, sino también en las células de cualquier organismo, haciendo así posible la vida misma.

Fue durante mis viajes terrestres por África, especialmente mientras cruzaba el Sahara en 1981 como mochilero, cuando me di cuenta de la gran importancia del agua para la vida. Donde la había, había vida, y donde no la había suficientemente, no había vida. Lo mismo vi en el Perú andino, donde hice mis investigaciones antropológicas e históricas en los años ochenta y noventa. Como parte de eso, conocí las impresionantes maneras andinas de gestionar el agua.

Durante la temporada seca, en la cordillera peruana se realiza el riego de las tierras por medio de manantiales ubicados en sitios muy elevados, en

los cerros. Desde allá, pequeñas acequias, muchas de ellas ya construidas en tiempos incaicos, traen el agua hacia sus terrenos atravesando largas distancias.

Los manantiales se encuentran donde están, me contaron, porque dentro de aquellos cerros hay ciertas capas impermeables que no dejan pasar el agua hacia abajo. Durante la época de lluvias el agua se acumula adentro de los cerros, encima de aquella capa, formando así pequeños embalses naturales. Así, todo el año el agua sale por algunos huecos, los manantiales, y después baja de los cerros recorriendo varios kilómetros, llevada por acequias que son construidas y mantenidas con muchos esfuerzos. Sin eso, no habría tanta vida humana en la sierra surandina peruana.

Observando todo eso, me di cuenta de que la gente andina rural tiene que afrontar un problema con el agua que es casi el contrario del que existe en Holanda; es decir, en los Andes muchas veces hay escasez de agua, mientras en Holanda normalmente hay que luchar contra el exceso de agua.

Pero en ambas localizaciones geográficas, tan distintas, el manejo colectivo del agua conlleva una cierta mentalidad cultural similar, que incluye prepararse bien, mantener cuidadosamente unos sistemas de manejo del agua bastante complejos, ser precavidos y, en el caso andino, compartir este recurso escaso con toda la población. De ahí que no sorprenda que las mentalidades tradicionales andinas y holandesas se parezcan bastante en ese sentido.

Pero de vez en cuando, tanto en el mundo andino como en Holanda, hay momentos en los cuales ocurre el problema contrario: en Holanda, escasez de lluvia, especialmente durante el verano, y en los Andes, demasiada agua durante la época de lluvias, incluso granizo que puede destrozar los cultivos en menos de media hora. En los Andes, las fuertes lluvias también ocasionan huacos – deslizamientos de tierras, llamados *argayos* en Asturias– y ríos bravos desbordados que arrastran casi todo en su camino.

En el pasado, el mundo andino y Holanda compartieron también la presencia de molinos de agua construidos donde era posible, es decir, en ríos y riachuelos donde hay diferencias de altura suficientes para utilizar la fuerza del agua como fuente de energía, desarrollando así actividades preindustriales de pequeña escala, sobre todo moliendo cereales.

Mucho de lo anterior probablemente suena familiar a la gente del Principado, ya que casi todo eso también es parte de su pasado y presente. Así no resulta sorprendente que en su tierra se esté produciendo el presente libro, con el tema central del agua, centrándose en esta sustancia química tan especial que también está muy presente en la vida diaria asturiana, en su pasado y presente,

y también en su mentalidad y cultura, incluso escanciando su querida sidra, símbolo insignia de Asturias y fuente de orgullo.

Tampoco es sorprendente que la gente asturiana y holandesa comparta este interés y preocupación por el agua. Además, el agua nos vincula a través del mar, generando sendas tradiciones de navegar por el mundo, atravesar mares y océanos en busca de riqueza o cosechar los recursos marítimos.

Todos aquellos aspectos del agua que compartimos, sospecho, han jugado un papel en escoger el tema del agua como parte del curso sobre la gran historia que sirvió como inspiración para producir el presente libro. Además, colocar el agua dentro de la gran historia permite contemplar la historia de la misma en la escala más grande posible. Y, felizmente, tanto en Asturias como en Holanda también compartimos el interés en la gran historia.

Estoy muy impresionado por esta excelente iniciativa, en particular por los temas escogidos por los diferentes y capaces autoras y autores. Y también me agrada mucho la buena voluntad de la editorial para sacar a la luz esta colección de ensayos informativos, escritos con miradas amplias y profundas. Confío en que este libro despierte mucho interés en el mundo hispanohablante, incluso entre algunos y algunas jóvenes y adolescentes que tal vez opinen que el agua no es nada especial.

**Fred Spier**

Ámsterdam, Países Bajos, abril de 2021



# I. EL SIGNIFICADO DEL AGUA EN LA GRAN HISTORIA

**Armando Menéndez Viso**

Departamento de Filosofía, Universidad de Oviedo

## **EL DESCUBRIMIENTO DEL PLANETA AZUL**

Ocurrió el 24 de diciembre de 1968. Mientras en multitud de hogares se celebraba la Nochebuena, tres personas, Frank Borman, James Lovell y William Anders, orbitaban por primera vez alrededor de la Luna. Lo hacían como parte de la misión Apolo VIII, del programa espacial de los Estados Unidos. Girando alrededor de nuestro satélite, Anders fotografiaba lo que la tripulación podía ver desde su ventanilla. En la cuarta rotación de la nave, justo cuando la circunferencia resplandeciente de la Tierra rompía el negro universal por detrás del gris selenita, el astronauta apretó el disparador de su cámara. Produjo así una de las fotografías más trascendentes de la historia: el amanecer terrestre. Aquella no era la primera imagen de nuestro planeta captada desde el espacio (ingenios no tripulados ya lo habían fotografiado en misiones anteriores), pero sí la primera sacada por una persona. Eso la convertía también en nuestro primer retrato de familia. En efecto, aunque indistinguibles, en aquella foto se encuadraban todos los seres humanos –menos Anders, Borman y Lovell– y, junto a ellos, todos los seres vivos conocidos. Cuando la misión regresó a la Tierra, se revelaron los carretes y aparecieron en el papel los colores que Anders había captado, resultó que aquella enorme familia de

seres vivos se veía azul y blanca, océano y nubes: desde lejos, nuestro mundo no era más que agua.

Esa imagen asombrosa confirmaba la intuición de la práctica totalidad de culturas de la Tierra, para las cuales el agua desempeña un papel protagonista como constituyente de la vida y del mundo en general. En la tradición filosófica occidental, se conserva el testimonio de que ya en el siglo VI a. C. Tales de Mileto afirmaba que todo era agua. Isidoro de Sevilla, cuando recoge a principios del siglo VII el saber de su época en sus enciclopédicas *Etimologías*, da buena cuenta del inmenso valor simbólico y funcional del agua:

Hay dos elementos fundamentalísimos para la vida humana: el fuego y el agua. Por eso se castiga duramente a quienes se les niega el fuego y el agua. El elemento acuático supera a todos los demás: las aguas atemperan el cielo, fecundan la tierra, el aire «las incorpora como parte suya», ascienden a las alturas y toman posesión del cielo. ¿Qué hay más maravilloso que las aguas que ocupan el cielo? [...] esparcidas por la tierra, son causa de todo cuanto nace, dan vida a las cosechas, propagan los árboles, los frutales y las hierbas, lavan las manchas, limpian los pecados, proporcionan bebida a todos los seres animados.<sup>1</sup>

Lo mismo ocurre en otras tradiciones, incluso más identificadas con el líquido elemento: «yo soy el río (*awa*) y el río soy yo», es aún hoy un dicho whanganui. El agua nos resulta tan familiar que resulta difícil tomar la distancia necesaria para preguntarnos sobre ella. Desde el momento mismo de nuestra concepción, el agua está dentro y alrededor de nosotros. Son aguas lo que anuncia nuestro alumbramiento. Es también agua lo que corre por nuestras mejillas cuando rebosamos alegría o tristeza; lo que aflora a través de nuestros poros cuando nos esforzamos, nos acaloramos o corremos peligro. *Agua* (deformado como *aba*) está siempre entre las primeras palabras que acertamos a decir en nuestra lengua. En el vaso, en la lluvia, en el mar, en el baño, en el huerto, en la cocina... el agua corre por cada rincón de nuestra vida cotidiana. Y, sin embargo, ¡qué cosa tan rara es el agua! Uno de los poquísimos líquidos que encontramos a nuestro alrededor sin haberlo fabricado, transparente, inodora, insípida, incolora... Por sus propiedades, un objeto excepcional: no hay nada que se le parezca. Y por lo que significa para nosotros, poco hay tan ansiado, gozado, temido o simplemente usado.

---

<sup>1</sup> *Etimologías*, XIII, 12.

El significado del agua resulta ciertamente inabarcable. Y lo es no solo por las peculiaridades del líquido elemento, sino también, y, sobre todo, porque la pregunta por el significado es una pregunta «insaturada», es decir, se precisa completarla para responderla cabalmente: el significado del agua, ¿para quién o para qué? Cuanto más delimitemos la cuestión, más fácil resulta abordarla. Así, «¿Qué significa el agua para la agricultura castellana del siglo xv?» es más fácil de responder que «¿Qué significa el agua para la agricultura?». No obstante, un vistazo global a los significados del agua es interesante para comprobar si hay alguna vinculación entre ellos, si es posible sistematizarlos de alguna manera. La respuesta incompleta a las preguntas abiertas también es necesaria. Eso es lo que se va a trazar en las próximas páginas: respuestas parciales a cuestiones que distan mucho de estar cerradas, pero que nos resulta valioso afrontar.

Las extraordinarias propiedades del agua y las estrechas relaciones que mantenemos con ella nos permiten considerarla, tanto en estas líneas como en nuestra vida ordinaria, con dos miradas complementarias: en abstracto y en concreto. En abstracto, el agua es una sustancia homogénea, que hoy identificamos como  $H_2O$ , con unas propiedades fisicoquímicas bien definidas; en concreto, el agua se presenta en múltiples formas perfectamente identificables: un río, una laguna, un mar... En esta forma concreta, el agua se puede abarcar, señalar y comprender suficientemente sin mediación científica, y adquiere un significado tan particular que recibe nombres propios: el Jordán, el Titicaca, el Ganges, el Mediterráneo, el Perito Moreno... Este libro pretende contar la gran historia del agua. La historia de las aguas concretas parece fácil de concebir y, de hecho, se ha contado muchas veces. Con el agua abstracta la cosa se complica. ¿Tiene verdaderamente historia una sustancia química? Veremos que sí, y en tres sentidos: como concepto o construcción social, que cambia según el tiempo y los grupos humanos; como participante de la historia propiamente dicha, es decir, de los aconteceres humanos; y como objeto físico. Los tres se mezclarán en las páginas que siguen, pero distinguirlos ayudará a seguir el relato.

La manera en la que entendemos y representamos el agua varía con la época y no es necesariamente la misma en cada grupo humano. De hecho, en los últimos siglos, la definición humana del agua ha sufrido un cambio decisivo, del que luego se hablará, e ignoramos si no habrá de sufrir otras alteraciones igualmente radicales en los siglos por venir. Nuestra definición de la sustancia agua es cambiante, y por eso tiene una historia que contar. No conviene perder de vista, sin embargo, que el concepto de agua desborda esa concepción sustancial,

hasta hacerse tan presente como el agua misma. El pensamiento humano no puede darse sin el agua, no solo porque ella sea condición de posibilidad física de la vida humana, sino también porque organiza en gran medida nuestras ideas e imágenes. El agua es uno de los pocos elementos compartidos por todas las culturas humanas sin distinción. Quizá por eso representa un papel protagonista en cualquier cosmogonía, ocupa un lugar central en todas las tradiciones de pensamiento científico-filosófico y está presente en las artes de todos los tiempos y lugares. Podría decirse que el agua es el símbolo por excelencia: de la pureza, de la transparencia, de la fugacidad, de la tranquilidad, de la fertilidad, de la frescura, de la vida individual (como en las coplas de Manrique), o de la sociedad misma (en las obras de Bauman, por ejemplo). Nuestro lenguaje está repleto de metáforas relacionadas con el agua: fuentes de energía, mares de dudas, ríos de tinta, lagunas de ignorancia, lluvias de ideas, telas vaporosas, corazones de hielo, blancos de nieve, torrentes de sabiduría, olas epidémicas, corrientes ideológicas, mareas humanas, tormentas políticas, inundaciones de toda clase de males, reacciones en cascada... No hay manifestación humana sin agua. Incluso en otras especies de primates se ha documentado la fascinación por el agua, y lo que algunos autores interpretan como una relación religiosa con ella.<sup>2</sup> Resulta, pues, difícil exagerar la importancia conceptual del agua para los seres humanos.

Sin el agua, nuestra especie no habría llegado a darse. Tampoco las demás: no hay ser vivo sobre la faz de esta Tierra que no deba su peculiar forma, al menos en parte, a la presencia o ausencia de agua. Lluvias, nieves, nubes, océanos, ríos, lagos, gotas, mareas, corrientes, olas, glaciares, torrentes... moldean el paisaje y generan los climas que permiten y condicionan la vida. Las aguas, pues, desempeñan un papel activo en la historia de la vida, y en la historia humana en particular. Como fuerza geológica o atmosférica, pero también como contorno geográfico e incluso como hito temporal: las crecidas del Nilo, el paso del Rubicón, la travesía del Atlántico o la batalla del Ebro son acontecimientos que han marcado el devenir de grandes grupos humanos.

Como objeto físico, el agua es sustancia, igual que el hierro, la madera de roble o el aceite de oliva, pero también es fuerza. Su papel como fuerza (generadora o destructora) no puede separarse de su estructura material. Comprender el agua como sustancia es algo que aún no hemos logrado plenamente. Con sus efectos guardamos más familiaridad: el agua disuelve, limpia, nutre, refresca, inunda, desgasta, horada, arruina, riega, transporta, asuela, divierte, ahoga, acoge, divide,

---

<sup>2</sup> Harrod, 2014.

arrulla, enmohece, arrastra... A medida que nuestro conocimiento sobre ella se enriquece, le descubrimos más caras (como matriz de los organismos vivos, conductora de la electricidad, refrigerante, recurso energético, residuo químico, reguladora del clima...) y no acabamos de delimitar su enorme potencia ni de descifrar sus propiedades. Esto la vuelve, si cabe, aún más atractiva como objeto de estudio y más valiosa como bien. Lo que sí sabemos, desde el nacimiento de la geología, la biología y la cosmología modernas, es que el agua no ha estado siempre ahí: ha tenido un origen y ha evolucionado, tanto en nuestro planeta como en el cosmos en su conjunto. Es posible, por tanto, contar una historia del agua también en el sentido puramente físico, natural.

La combinación de la historia conceptual, la historia natural y el papel histórico del agua puede dar lugar a un relato peculiar, la gran historia del agua, que es lo que este libro quiere contar. Las tres secciones de este capítulo desgranarán estos tres sentidos de la historia del agua, mientras que los siguientes capítulos del libro hablarán fundamentalmente (aunque no solo) del agua tal y como la conciben las ciencias occidentales contemporáneas. Podría temerse que el estudio científico del agua rompiera su encanto o la convirtiera en un objeto distante, pero, por más que la analicemos y abstraigamos, el agua no perderá su cotidianeidad: el agua surgida de las estrellas y la que cobijó el ignoto origen de la vida es la misma que forma parte de lo más íntimo de cada ser humano (el último rincón de su cuerpo, la ducha de la mañana, la comida...). Eso sí, estudiar el agua en toda su amplitud resulta, como puede advertirse por lo que se acaba de decir, tan complicado como estudiar la totalidad del mundo. No se trata aquí de abordar una misión imposible, sino de ofrecer una visión de conjunto, un esbozo de paisaje. Y se hace no con una mirada aséptica o perfectamente abstracta, sino desde una localización concreta. Ni siquiera los astronautas del Apolo VIII contemplaban el mundo desde fuera, pues lo hacían con su mentalidad estadounidense de mediados del siglo xx. Tampoco quienes abordamos esta empresa podemos sustraernos a nuestra configuración, y así este libro está escrito desde lo que suele llamarse cultura occidental, más concretamente europea, más precisamente española y, más específicamente aún, académica. No quiere esto decir que tal perspectiva sea privilegiada en ningún sentido, sino, simplemente, que es la única que hemos podido adoptar, por formación y ubicación. Así pues, lo aquí dicho no pretende tener validez universal ni intemporal: es el fruto, más o menos logrado, de un contexto determinado. Otras personas podrán completarlo o enmendarlo desde puntos de vista diferentes. Esperamos, no obstante, que este

trabajo, con todas sus limitaciones, pueda resultar útil a quienes se encuentren en otros puntos de vista.

### EL CONCEPTO DEL AGUA

¿Qué es el agua? La pregunta parece fácil de responder a primera vista, pero no lo es. El agua no es lo mismo para un navegante, una campesina, una geóloga, un pintor, una ingeniera de canales, un surfista, una pescadora de río, un químico o unos niños que juegan en la playa; tampoco es lo mismo en los Andes y en el Gobi, en la cuenca del Amazonas y en la del Rin, en el Océano Pacífico y en el lago Baikal; ni es igual para los faraones egipcios, los griegos clásicos, los comerciantes venecianos medievales, los holandeses del siglo XVII o los *jkung* actuales. El significado del agua cambia con el lugar y con el tiempo. Saber cómo lo hace es importante para entender por qué hemos llegado a la idea de agua que tenemos hoy día y, por tanto, qué significa. También resulta imprescindible para ver por qué la historia del agua solo tiene sentido desde tiempos relativamente recientes.

#### *Principio*

Cuando, en 1969, el Servicio de Correos de los Estados Unidos de América emitió un sello de seis céntimos con la fotografía del amanecer terrestre, insertó en ella la traducción inglesa de las primeras palabras del Génesis: «*In the beginning God...*». Con ello no estaba más que sumándose a la inabarcable tradición de relatos cosmogónicos que sitúan en el agua el comienzo de nuestro mundo.

Uno de los escritos más antiguos que se conservan dentro de la tradición occidental sobre el origen del cosmos es la *Teogonía* de Hesíodo. Se abre así:

Comencemos nuestro canto por las Musas Heliconiadas, que habitan la montaña grande y divina del Helicón. Con sus pies delicados danzan en torno a una fuente de violáceos reflejos y al altar del muy poderoso Cronión. Después de lavar su piel suave en las aguas del Permeso, en la Fuente del Caballo o en el divino Olmeo, forman bellos y deliciosos coros en la cumbre del Helicón y se cimbrean vivamente sobre sus pies. Partiendo de allí, envueltas en una densa niebla, marchan al abrigo de la noche, lanzando al viento su maravillosa voz...<sup>3</sup>

---

<sup>3</sup> Hesíodo, *Teogonía*, 1-11.

Con estas palabras, se prepara la escucha del relato por excelencia, la historia de los dioses, invocando a las musas, mediante cuya voz es revelada al poeta. El conocimiento de la realidad adquiere, así, un aura divina, pero no nace de un trabajo penoso, un trueno o un arrebatamiento celestial, sino de un entorno pacífico, sensual, idílico, que lo es por la presencia del agua. Fuentes, ríos, baños, niebla... son formas del agua que componen la escena, arrullan y elevan la escucha. Pero el agua no está solamente en el preámbulo, sino que forma parte, desde el principio, del relato mismo:

En primer lugar existió el Caos. Después Gea la de amplio pecho [...] Del Caos surgieron Érebo y la negra Noche. [...] Gea alumbró primero al estrellado Urano con sus mismas proporciones [...]. Ella igualmente parió al estéril piélagos de agitadas olas, el Ponto, sin mediar el grato comercio. Luego, acostada con Urano, alumbró a Océano de profundas corrientes...<sup>4</sup>

De la luz y la placidez de la fuente de violáceos reflejos, se pasa al amenazante Océano de profundas corrientes. Y en ese tránsito no se abandona el agua, capaz de suscitar igualmente inquietud y sosiego, cercanía y abismo, confianza y terror, acogimiento y hostilidad.

En la *Teogonía*, el agua oceánica, que es materia sin forma, nace de la conjunción de cielos y tierra. Sin embargo, en las religiones del libro, esa misma agua puramente material (es decir, no configurada como mar, río, etc.) está ahí desde el principio, como sustento de la acción divina: aparece por separación, no por mezcla o comercio:

Al principio Dios creó el cielo y la tierra. La tierra era soledad y caos, y las tinieblas cubrían el abismo, y el espíritu de Dios aleteaba sobre las aguas.<sup>5</sup>

¿Los infieles no ven que los cielos y la tierra formaban una masa compacta, y que los hemos separado, y que por medio del agua damos la vida a todas las cosas?<sup>6</sup>

En los relatos cosmogónicos de nuestra tradición (y de muchas otras), el agua informe precede a la aparición del mundo ordenado, del orbe tal y como

---

<sup>4</sup> *Teogonía*, 116-134.

<sup>5</sup> *Génesis*, 1, 1-2.

<sup>6</sup> *Corán*, XXI: 30.

lo conocemos. De hecho, en cualquier cosmogonía anterior al siglo XIX el agua está desde el principio, es propiamente elemento, porque el mundo que se pretende explicar está más o menos circunscrito a lo que hoy llamamos la Tierra. En las cosmogonías de la actualidad, el agua es un producto de la evolución del universo: no es ya materia prima, sino derivada de materias y energías previas. De ahí su carácter compuesto, histórico. Pero eso no le resta capacidad de fascinación. Sigue desempeñando el papel cosmogónico de matriz de la vida, pues se continúa suponiendo que las primeras formas de vida se originaron en un medio acuático. También hoy en día buscamos agua en otros cuerpos celestes como posible origen y sustento de otros seres vivos.

Pero el agua no es principio solo porque se haya situado en el origen de lo que hay, sino también porque se ha concebido como su componente sustancial; es decir, porque el agua es una parte material de los seres vivos y del cosmos inanimado. Sus propiedades le confieren un papel protagonista en la *physis*, en el cosmos, y en particular en la vida (en la biosfera), y hacen que el agua ocupe un lugar destacado en el imaginario de todas las culturas.

### *Sustancia elemental*

En la tradición occidental, el agua es una sustancia. Los latinos usaron la palabra *substantia* para referirse a lo que los griegos llamaban ὑποχείμενον (*hypokeímenon*), es decir, lo que subyace, lo que permanece por debajo de las meras apariencias. Más precisamente, la sustancia es la materia estable que constituye algo y le otorga sus propiedades características. Desde antiguo, los seres humanos han tratado de identificar las sustancias que conforman las cosas que existen a su alrededor. Y, también desde antiguo, se ha sostenido la idea de que la multitud casi infinita de objetos que nos rodea es el resultado de combinar unos pocos elementos. No sabemos quién fue la primera persona que propuso considerar la materia como un compuesto de partes más elementales, pero sí que a principios del siglo VI a. C. y en Jonia esta idea se encontraba muy extendida. Tales de Mileto llegó a considerar que en realidad había un único elemento, una única sustancia que, componiéndose de formas diversas, podía dar lugar a todo. Esa sustancia era el agua. Así nos lo transmite Aristóteles en su *Metafísica*:<sup>7</sup>

---

<sup>7</sup> I, 3, 983b.

La mayoría de los que filosofaron por primera vez consideraron que los únicos principios de todas las cosas son de especie material. Aquello a partir de lo cual existen todas las cosas, lo primero a partir de lo cual se generan y el término en que se corrompen, permaneciendo la sustancia mientras cambian los accidentes, dicen que es el elemento y el principio de las cosas que existen; por esto consideran que nada se genera ni se corrompe, pues tal naturaleza se conserva siempre... Debe de haber, pues, alguna naturaleza única o múltiple a partir de la cual se generan las demás cosas, conservándose ella. No todos dicen lo mismo sobre el número y la especie de tal principio, sino que Tales, quien inició semejante filosofía, sostiene que es el agua (y por ello también manifestó que la tierra está sobre agua). Tal vez llegó a esta concepción tras observar que todas las cosas tienen un alimento húmedo y que el calor se produce y se mantiene en la humedad (ya que aquello a partir de lo cual se generan las cosas es el principio de todas ellas). Por eso llegó a esta concepción y también porque todas las simientes son de naturaleza húmeda y el agua es el principio natural de las cosas húmedas. Pero hay quienes consideran que los más antiguos, muy anteriores a la generación actual y primeros en reflexionar sobre los dioses, pensaron así sobre la naturaleza e hicieron a Océano y Tetis padres de la generación.

Resulta difícil saber si la idea de agua como elemento podría remontarse más allá de los milesios. Lo que sí está claro es que el agua como origen recorre la totalidad del pensamiento científico-filosófico. Incluso Heráclito, que propone el fuego como único elemento verdadero y contradice a Tales, no puede dejar de recurrir al agua para enunciar uno de sus dichos más conocidos. Así nos lo cuenta Platón:<sup>8</sup> «En algún lugar dice Heráclito que todo se mueve y nada permanece, y, comparando las cosas con la corriente de un río, dice que en el mismo río no nos bañamos dos veces».

Seguramente haya sido Empédocles el responsable de fijar la tétrada elemental más popular: fuego, tierra, aire y agua, base de la química durante milenios. Los cuatro elementos de la tradición occidental, fruto de combinar diversas teorías, eran las únicas sustancias homogéneas. Cada elemento se combinaba con los demás en proporción variable para dar lugar a la variedad de sustancias que vemos en la naturaleza. Esta idea de la proporción entre elementos constituyó durante siglos la base de la alquimia y de la medicina, que trataban respectivamente de manipularla y de restaurarla.

---

<sup>8</sup> *Crátilo*, 402a.

Leucipo y Demócrito, que vivieron en Mileto entre los siglos v y iv a. C., introdujeron una idea alternativa, que convivió largo tiempo con la teoría de los cuatro elementos, dando a los constituyentes últimos de la materia el nombre de *átomos*, esto es, cosas que no se pueden partir, que no están compuestas de otras. Lo que la física de hoy define como átomo ya no lo es en el sentido original, puesto que está formado por varias partículas, que llamamos elementales. Estas partículas se han hallado precisamente porque pervive el antiguo anhelo de dar con la última sustancia, el componente indivisible, la unidad de materia dentro de la cual ya no haya partes identificables, esto es, el principio material de las cosas. Aunque su nombre haya ido variando, esta idea es la misma desde el siglo v a. C. Los atomistas (que así se llamó a los seguidores de Leucipo y Demócrito) consideraban que sus partículas sin partes eran increadas, eternas, habían estado siempre ahí y seguirían estando, para dar lugar a todo lo que hay mediante sus movimientos y combinaciones. En la idea de átomo se funden, pues, los conceptos de principio y sustancia: el componente último de la materia es también su origen, su causa. Todo lo demás puede cambiar, precisamente perdiendo, ganando o reorganizando átomos, pero estos últimos, no. Si pudieran hacerlo, no serían átomos, pues para que una cosa cambie es preciso que en ella aparezca o desaparezca algo y esto implica tener partes. Por definición, lo que no tiene partes no puede alterar sus propiedades. Los átomos son lo constante, lo que permanece cuando algo cambia, se descompone o se genera a partir de otra cosa. Por tanto, los átomos como tales no pueden tener historia: el paso del tiempo no los altera en absoluto.

Los científicos o filósofos griegos que se han mencionado nos pueden parecer muy antiguos, pero no lo son tanto, si tenemos en cuenta el tiempo que los seres humanos llevamos poblando la faz de esta Tierra tan llena de agua. La idea de que todo está compuesto de partículas minúsculas que se mueven sin cuento y se combinan al azar puede considerarse novedosa. Durante la mayor parte de la historia humana, el agua formó parte de las sustancias elementales, es decir, de aquellas cosas que no se podían descomponer en otras más sencillas y, por eso mismo, conformaban todo lo demás. Hoy ya no consideramos el agua un elemento, sino un compuesto, y no creemos que esté formada de átomos agregados sin más, sino de moléculas, con una estructura de dos elementos, hidrógeno y oxígeno, en una proporción de dos a uno. Esto lo expresamos así:  $H_2O$ . Pero tal expresión, que ahora nos resulta tan familiar, es un producto muy reciente. Se llega a ella como resultado de un proceso cuyo conocimiento resulta fundamental para entender, primero, cómo imaginamos hoy el agua y, segundo, por qué el

agua tiene, efectivamente, su historia. Si el agua no pudiera descomponerse en otras sustancias, ni formarse a partir de ellas, su cantidad sería siempre la misma, no cambiaría, y por tanto no tendría historia, con lo cual un libro como este resultaría imposible. Pero el agua aparece (como combinación de hidrógeno y oxígeno) y se descompone (en los mismos dos gases). Puede, por tanto, pensarse que el agua concreta que llena nuestros mares, corre por los cauces y llueve sobre justos e injustos se ha formado en algún momento y, por tanto, tiene su historia. Podemos abordar la historia del agua porque hemos dejado de considerarla elemento. Hace tan solo tres siglos, semejante propuesta no habría tenido ningún sentido. El camino por el que se llegó a la conclusión de que el agua era un compuesto no fue sencillo: supuso vencer una inercia de milenios, identificar fenómenos desconocidos y definir conceptos nuevos. La prueba de que el agua es un compuesto coincide con la fundación de la química moderna y constituye un episodio muy significativo de la historia de la ciencia. Paradójicamente, el estudio del agua acabó resultando decisivo para liquidar la teoría de los cuatro elementos.

#### *De elemento a compuesto*

En el siglo XVI, todavía dentro de la tradición alquímica, Paracelso, Gesner, Cardano, Telesio, Beguin y otros autores comenzaron a cuestionar los hasta entonces sólidos cimientos del edificio de los cuatro elementos heredado de la Antigüedad. Sin embargo, no llegaron a adentrarse en lo que hoy consideramos la química moderna. Solo con la experimentación y la medición precisa a las que incitaban los nuevos métodos de investigación podía cuestionarse la noción misma de elemento. Pasar de una idea de agua elemental a considerarla un compuesto habría resultado imposible sin la producción o el descubrimiento de fenómenos que revelaran partes diferentes en el líquido elemento. El camino era más arduo de lo que hoy podemos imaginar porque las partes del agua tienen una naturaleza diferente del agua misma, no son líquidas ni sólidas. Identificarlas supone, por tanto, no solo pericia experimental, sino una aportación conceptual rompedora: la noción de gas. La concepción del agua como sustancia compuesta pasa, pues, por los gases. Contando la historia de su concepción podremos entender algo más sobre el asunto que nos ocupa.

Nuestro relato<sup>9</sup> comienza detallando uno de esos experimentos, que curiosamente vino a reforzar el papel del agua como elemento. Su autor fue

---

<sup>9</sup> Las fuentes principales para componer los párrafos siguientes han sido Ball (2000) y Jaffe (1977).

Jan Baptiste van Helmont (1580-1644). Nacido en Bruselas, entonces bajo dominio de la corona española, estudió en Lovaina, también en los Países Bajos españoles, y se estableció en Vilvorde (en el Brabante flamenco, cerca de la actual capital belga). Se dedicó a lo que hoy llamaríamos la fisiología, sobre todo vegetal. No es de extrañar que alguien llamado Juan Bautista se sintiera atraído por el líquido elemento, pero fue su observación del crecimiento de las plantas, concretamente su luego famoso «experimento del sauce», lo que en realidad le llevó a afirmar el papel clave del agua. Van Helmont quería conocer de dónde procede la materia que conforma los vegetales. Para averiguarlo, llevó a cabo una sencilla, aunque paciente, experiencia. Plantó un sauce en una maceta, en la que echó exactamente doscientas libras de tierra (algo más de 67 kg), pesadas tras haberlas secado en un horno. Luego tapó la maceta con una plancha de metal para reducir al mínimo las posibles aportaciones de polvo, dejando solamente un hueco que permitiera crecer al árbol y regar su sustrato. Durante un lustro, Van Helmont observó cómo crecía la planta, aportando a la maceta solamente agua destilada o de lluvia. Pasado ese tiempo, nuestro experimentador vació la maceta, volvió a secar la tierra en un horno y la pesó: solo había menguado en dos onzas (menos de 60 gramos), mientras que el árbol había ganado 164 libras (unos 55 kg). Van Helmont dedujo que esta masa solo podía provenir del agua que él mismo había ido echando en la maceta durante cinco años. La conclusión resultaba sorprendente, pero la precisión de las mediciones la respaldaba con contundencia.

La aportación de Van Helmont no se quedó ahí, pues fue capaz de ofrecer pruebas de la conversión de la «tierra» en «agua»: mezcló arena (mayormente sílice) con álcali para obtener silicato de sodio (también conocido como vidrio soluble o cristal de agua, compuesto que se licúa en contacto con la humedad del aire) y después recuperó la misma cantidad de sílice simplemente añadiendo ácido al silicato. Así pudo afirmar que toda la tierra, arcilla y cualquier cuerpo sólido es producto del agua solamente, bien por causas naturales, bien por medios técnicos.<sup>10</sup> Van Helmont había retomado la teoría de Tales, dotándola de nuevos argumentos.

A esta omnipresencia del agua solo escapaba el aire. Para Van Helmont, el aire era sin duda un elemento diferente, aunque inerte e incapaz de adquirir forma de otra cosa. ¿Qué se libera entonces cuando el agua se evapora? Van Helmont identificó esa emanación como vapor, mostrando que puede

---

<sup>10</sup> Jan Baptiste van Helmont, 1662.

convertirse sin dificultad en agua líquida y es distinto del aire. Pero muchas reacciones químicas liberaban algo semejante al vapor, que sin embargo no era agua ni aire. Van Helmont bautizó estas sustancias con el nombre genérico de *gas*, derivado del griego  $\chi\acute{\alpha}\omicron\varsigma$ , que ya había usado Paracelso. Aunque ahora nos resulte tan familiar, el término no hizo fortuna inmediatamente y tuvo que esperar a que Lavoisier lo rescatase más tarde, como veremos. Con Van Helmont, los conceptos de vapor y gas se introdujeron en el vocabulario científico. Solo mediante ellos se podría comprender posteriormente lo que hoy consideramos la estructura del agua.

El siguiente paso para comprenderla supone dar un pequeño salto en el tiempo, hasta mediados del siglo xvii, y en el espacio, salvando el Canal de la Mancha para situarnos en suelo británico. Allí encontramos a Robert Boyle (1627-1691). Hijo del primer conde de Cork y recordado hoy por la ley sobre los gases que lleva su nombre, Boyle fue uno de los fundadores de la Royal Society de Londres. Esta institución resultó clave para la ciencia moderna (cuya creación se arrogó), pues aplicó a la labor científica los métodos empíricos propuestos por Francis Bacon (1561-1626). En química, dejó atrás los supuestos que habían regido la investigación sobre la combinación y transformación de las sustancias hasta entonces. Boyle mismo ayudó a superar los principios aristotélicos, pero todavía pensaba que el agua era un elemento. Eso sí, un elemento que podía alterarse. Dando por buenos los experimentos de Van Helmont, Boyle aceptaba que el agua podía transformarse en «madera» y, en general, en cualquier materia orgánica. Es más, también, llegado el caso, el agua podía dar lugar a materia inorgánica. Boyle llegó a esta conclusión gracias a los cálculos; no a los de la aritmética, sino a los renales, que pudo encontrar en animales herbívoros: si estos animales solo se alimentan de plantas, que son agua, y semejantes piedras se forman en su interior, solo cabe concluir que estas mismas piedras resultan de una cierta transformación del agua.

No obstante, y haciendo honor a su apellido, lo que más interesaba a Boyle dentro de la química eran los procesos de combustión. Estudiándolos, Boyle se aperció de la inflamabilidad del «aire impuro» (lo que luego se conocerá como hidrógeno), resultado de la reacción de limaduras de hierro con ácido. Boyle trabajó, sin definirlos, con hidrógeno y oxígeno, e incluso llegó a sintetizar agua a partir de ellos, pero sin darse cuenta de lo que estaba haciendo. Sus trabajos supusieron una primera piedra en el camino hacia la identificación de los componentes del agua, que él no transitó.

Boyle realizó también una observación que, aunque no entrañaba mayor novedad (el fenómeno se conocía al menos desde la Edad Media), resulta significativa para esta historia: los metales ganan peso cuando se queman. Jean Rey (c. 1583–c. 1645), médico francés que realizó numerosos trabajos sobre química, llegó a medir esa ganancia y poco antes de 1630 concluyó que el aire debía tener algún peso, lo que, además de posibilitar que Torricelli desarrollase su barómetro en 1643, tendría importancia para entender el agua como compuesto.

El siguiente hito de nuestro recorrido lo establece Johann Joachim Becher (1635–1682). Nacido en Espira, este médico y erudito germano trabajó dentro de la tradición alquímica, incluida la vertiente que hoy nos resulta más descabellada: afirmó haber encontrado piedras que conferían la invisibilidad y llegó a convencer a una comisión del gobierno holandés y al alcalde de Ámsterdam de que podía transmutar la arena en oro. Como se puede suponer, su propuesta no terminó bien. En cambio, algunas de sus aportaciones teóricas acabaron constituyendo un paso clave en la historia de la química, aunque no precisamente por su precisión. Combinando las ideas de Paracelso, otras más clásicas y sus propias observaciones, Becher supuso que los elementos eran cinco: el aire, el agua y tres tipos de tierra, con los que dar cuenta de la variedad de sustancias sólidas. Estas tres tierras eran la *terra fluida* o *mercurialis* (tierra fluida), la *terra pinguis* (tierra grasa) y la *terra lapida* o *lapis fusilis* (tierra pétreo). Este esquema apenas difiere de los tres elementos de Paracelso (mercurio, azufre y sal), pero resulta más depurado, en especial por la definición de la tierra grasa, que se presenta como la parte de materia que una cosa pierde tras su combustión. En otras palabras, la *terra pinguis* sería el «principio inflamable» que se difunde en el aire por acción del fuego.

Tal propiedad de la *terra pinguis* de Becher llevó a su discípulo Georg Ernst Stahl (1659–1734) a rebautizar ese elemento como *flogisto*. Tomó el término del griego φλογιστός (*phlogistós*), que significa *inflamable*. Con él se abrió un curioso y por eso muy estudiado capítulo de la historia de la ciencia:<sup>11</sup> una sustancia que acabó declarándose inexistente pero que, sin embargo, resultó fundamental para entender la química posterior. El flogisto se definía como la materia que el metal pierde cuando se calcina en un medio aéreo. El material resultante quedaba «desflogisticado». El flogisto se podía devolver al sólido que lo había perdido, convirtiendo el residuo de la combustión de nuevo en metal. Esto se conseguía calentándolo junto a una sustancia que se suponía rica en

---

<sup>11</sup> Se han ocupado de él historiadores de la ciencia tan conocidos como Toulmin (1957), Kuhn (1962, vi), Musgrave (1976), Laudan (1981), Kitcher (1993) o Chang (2010).

flogisto, como el carbón. El flogisto también permitía explicar parte de la fisiología animal y vegetal: era el flogisto lo que las plantas tomaban del aire y, a través de ellas, podía pasar a los animales. Además, daba razón de la constatación realizada por Boyle, de que la combustión resulta imposible en el vacío, pues el aire se consideraba necesario para absorber el flogisto que la materia quemada perdía en la combustión.

La teoría del flogisto resultaba tan convincente en su momento que las pruebas de sus desajustes solo sirvieron para introducir pequeños cambios en ella, y no para un verdadero cambio de paradigma, por decirlo en términos de Kuhn. Ya vimos que Jean Rey había establecido que los metales calcinados ganaban peso. ¿Cómo se explicaría esto con la teoría del flogisto? La explicación más lógica es la del propio Rey, que asumía que el metal se combinaba con algunas partículas del aire. Pero Becher solventaba la dificultad afirmando que el flogisto podía tener un peso negativo. Además, otras sustancias distintas de los metales, como la madera, perdían peso al quemarse. No vamos a adentrarnos ahora en los vericuetos de la filosofía de la ciencia para explicar la permanencia de un paradigma, pero podría decirse que el flogisto pervivió durante un tiempo por ser prácticamente el reverso perfecto del oxígeno. Casi todo lo que hoy atribuimos a la acción del oxígeno, se explicaba en el siglo XVIII por la ausencia de flogisto, y viceversa. Así, cuando el metal se lleva a combustión, hoy diríamos que gana oxígeno, quedando oxidado, pero entonces se decía que perdía flogisto; cuando el óxido metálico se calienta con carbón, pensamos que libera oxígeno, de forma que recupera su estado libre de orín, pero en otro tiempo se creía que ganaba flogisto, necesario para recuperar su forma anterior; ahora afirmamos que la razón de que no se produzca la combustión del metal en el vacío es la falta de oxígeno que se combine con el metal, pero antaño se aceptaba que el flogisto no podía dejar el metal por la carencia de aire al que pasar; para nosotros, las plantas emiten oxígeno, pero en tiempos de Stahl se asumía que absorbían flogisto; etcétera.

Aquí lo que realmente interesa de la teoría del flogisto es su relación con el agua, y la conexión se produce mediante la idea de gas. Precisamente la falta de comprensión de esta noción, la de gas, es lo que impedía dar cuenta de los fenómenos que querían explicarse mediante el flogisto. Van Helmont había acuñado el término, como ya hemos visto, y lo había definido como una emanación diferente del aire y químicamente inerte, que se produce como resultado de ciertas reacciones. La falta de precisión y de nombre se hace notar en esos años.

De vuelta a las islas británicas, esta vez a Escocia, encontramos a Joseph Black (1728-1799), uno de los miembros de la importante Sociedad Lunar de Birmingham, estudiando la acción de un ácido (o del calor) sobre el carbonato de magnesio o el carbonato de calcio (caliza) y observando la aparición de dióxido de carbono, que él llamó «aire fijo» (*fixed air*). Le dio ese nombre porque se podía fijar en forma sólida al pasarlo por magnesia (periclasa, óxido de magnesio) o cal (óxido de calcio). El hecho de que una sustancia «aérea» pudiera adquirir la solidez de la piedra caliza resultaba sorprendente en los tiempos de Black.

Los problemas para dar con nuestro concepto de gas se perciben también en los trabajos de uno de los estudiantes de Black en Edimburgo: Daniel Rutherford (1749-1819). Rutherford amplió en 1772 el concepto de aire fijo de su maestro al observar que una sustancia aérea permanecía en el interior de un recipiente cerrado tras la combustión de materiales, cuando ya no quedaba nada de lo que hoy llamamos oxígeno. La llamó *aire mefítico*<sup>12</sup> y se trataba de lo que Jean Antoine Chaptal (1756-1832) bautizaría en 1790 como nitrógeno. Era el mismo gas que había sido ya identificado al menos por Robert Hooke (1635-1703), por entonces asistente de Boyle, en 1665 y por John Mayow (1640-1679) en 1674, pero ellos, igual que Rutherford, no supieron qué hacer con él. Al menos este último pudo cuantificarlo, deduciendo que suponía unos cuatro quintos del aire corriente.

Ni siquiera Joseph Priestley (1733-1804), verdadero filósofo natural, controvertido teólogo calvinista y sin duda uno de los grandes nombres de la ciencia en el siglo XVIII, pudo desembarazarse de los prejuicios de sus predecesores. Como tantos otros en sus días, estaba plenamente convencido de la solidez de la teoría del flogisto. Para él, el aire mefítico era aire saturado de flogisto. Como este aire no podía absorber más flogisto, no tenía capacidad de albergar combustión alguna. Cuando Priestley descubrió el oxígeno en 1774, lo vio, en correspondencia con su teoría, como «aire desflogisticado» o «desflogistado» (las dos traducciones se han dado). Lo obtuvo calentando óxido de mercurio para producir mercurio puro. Este procedimiento era bien conocido en la tradición alquímica y el mismo Robert Boyle lo llevó a cabo en más de una ocasión. El mérito de Priestley estuvo en prestar más atención al «aire» liberado que al mercurio, lo que le llevó a experimentar con él. Así pudo observar que una vela o una brasa de carbón ardían con mucho más vigor cuando lo hacían dentro

---

<sup>12</sup> Rutherford, 1772.

de un recipiente que contuviese ese «aire desflogisticado». Esto constituía para Priestley una prueba evidente de que semejante aire carecía casi por completo de flogisto y por lo tanto lo absorbía de la sustancia incandescente con mayor «avidez». En 1775 se le ocurrió investigar sus efectos en la respiración. Primero comparó el tiempo de supervivencia de dos ratones en dos recipientes cerrados, uno con oxígeno y otro con aire normal. El infortunado individuo que no dispuso del «aire desflogisticado» se asfixió mientras su compañero seguía con vida. Este resultado le animó a probar las propiedades del gas sobre sí mismo y notó cómo su respiración se volvía más fácil. Priestley pensó que, por sus propiedades beneficiosas, el «aire desflogisticado» podría llegar a convertirse en un artículo de moda, aunque le preocupaba que, puesto que las cosas ardían con mayor velocidad en ese gas, su consumo acortase la vida.<sup>13</sup>

Esta preocupación por el tiempo no parecía afectar gran cosa al farmacéutico pomerano Carl Wilhelm Scheele (1742-1786), que había descubierto el gas unos años antes (lo llamó «aire ígneo») pero no publicó sus resultados hasta 1777, cuando los trabajos de Priestley eran bien conocidos.

Viajamos ahora al sur para dar entrada a un personaje clave en este relato: Antoine Laurent de Lavoisier (1743-1794). Como la inmensa mayoría de los protagonistas de nuestra historia, Lavoisier se dedicó a la química como segunda actividad. Su formación original fue en derecho y en su primera juventud trabajó como recaudador de impuestos. Sin embargo, a los veinticinco años ya tenía una sólida reputación científica, que le valió ser incorporado a la *Académie des Sciences*. En 1774 recibió la visita de Priestley, que le comunicó su hallazgo del «aire desflogisticado». Al año siguiente, Lavoisier anunció un resultado similar: que el óxido de mercurio, cuando es calentado, desprende un gas parecido al aire corriente que favorece la combustión. En su anuncio, Lavoisier omitió toda referencia a su colega británico, y por supuesto a Scheele o a Pierre Bayen (1725-1798), que había contado algo muy parecido. No obstante, el trabajo de Lavoisier contenía una aportación, o más bien una sustracción, indudablemente propia: el flogisto no aparecía por ninguna parte. Su papel lo representaba el oxígeno (al que pondría nombre un par de años después), mucho más conforme con los fenómenos que se trataban de explicar.

Para completar la composición del agua, nos falta ahora su segundo componente: el hidrógeno. Scheele ya había recogido el gas resultante de la acción de un ácido sobre el hierro y el zinc. Este «aire inflamable» o «ígneo» también

---

<sup>13</sup> Priestley, 1775: 102.

fue observado por Boyle, como ya vimos, y probablemente por Van Helmont y Paracelso, al menos. Claro que Scheele no lo identificó como hidrógeno, sino como «flogisto puro». Lo mismo había hecho unos años antes Henry Cavendish (1731-1810). Mientras, Jacques Charles (1746-1823) asombró al público en 1783, cuando hizo volar el primer globo lleno de ese gas por el cielo de París.

Los componentes del agua ya estaban ahí: faltaba definirlos bien y juntar las piezas para dar el gran salto: hacer que el líquido elemento lo dejara de ser y se transformara en un compuesto. Aunque hacia 1775 tanto el hidrógeno como el oxígeno habían sido aislados, aún no habían recibido sus nombres ni se habían identificado como elementos –de hecho, nadie pensaba que el agua no fuera una sustancia elemental–.

Para confirmar que el agua es un compuesto, además de identificar sus partes, hay que comprobar efectivamente que se pueden combinar para dar lugar al todo. Esto es lo que logró en 1774 John Warltire (1726-1810), aunque sin saber muy bien qué había hecho: mezcló aire común y «aire inflamable» (hidrógeno) en un matraz de cobre y aplicó una chispa eléctrica. La mezcla explotó, los gases perdieron peso y algo de «rocío» se formó en las paredes del recipiente. En ese mismo año, Pierre Joseph Macquer (1718-1784), quien trabajaba con Lavoisier, también quemó hidrógeno en el aire y notó que la llama no producía humo alguno. Lo que sí provocó fue que, al poner un plato de porcelana sobre ella, se formaran gotas de un líquido «semejante al agua, que tenía todo el aspecto de no ser otra cosa más que agua pura». James Watt (1736-1819) reprodujo el experimento, lo mismo que Priestley, y el resultado fue siempre el mismo. La conclusión de que el agua era un compuesto de hidrógeno y oxígeno parecía evidente, pero no la obtuvieron. En realidad, la condensación de agua era un fenómeno frecuente, que sin ir más lejos tenía lugar en las ventanas del laboratorio en un día de invierno.

Priestley, Cavendish, Black y Watt seguían a vueltas con el flogisto, lo que en cierta manera les impedía entender bien qué estaban haciendo. En cambio, Lavoisier trabajaba con una hipótesis alternativa, según la cual la observación de que el aire se fija en los metales obligaba a abandonar el concepto de flogisto. Lavoisier estaba convencido de que el «aire desflogisticado» de Priestley era en realidad una sustancia propiamente dicha, y la bautizó primero como «aire puro» o «aire verdadero». En 1777 observó que los residuos calcinados de ciertas sustancias, como el azufre y el fósforo, formaban ácidos cuando se mezclaban con agua. De ahí dedujo que el mismo «aire puro» que posibilitaba la combustión era un componente de los ácidos. Así que llamó a ese aire puro

oxígeno, es decir, formador de ácidos. Al presentar al oxígeno como responsable de la combustión, Lavoisier podía ofrecer una teoría alternativa a la del flogisto.

En 1781, Cavendish pudo sintetizar cantidades considerables de agua aplicando electricidad a una mezcla de aire común e hidrógeno (que él consideraba flogisto) encerrada en un recipiente de vidrio. Observó que solo una quinta parte del aire común pasaba al agua obtenida, pues el aire mefítico permanecía sin variación. Cuando usó «aire desflogisticado» en lugar de aire común, halló que todo el volumen de este aire se combinaba con un volumen de «aire inflamable» dos veces mayor. Sin embargo, la trascendencia de esta proporción solo se percibió un tiempo después.

En junio de 1783, Cavendish aún no había publicado estos resultados, pero su asistente Charles Blagden (1748-1820), que estaba de visita en París, asistió a una demostración de Lavoisier y Pierre Simon Laplace (1749-1827). En ella, Lavoisier y Laplace introdujeron oxígeno e hidrógeno en una esfera de vidrio y, suministrando electricidad, produjeron una cantidad de agua pura cuyo peso equivalía aproximadamente al de los dos gases juntos. Lavoisier entendió entonces que resultaba difícil negarse a reconocer que en ese experimento se había conseguido producir agua artificialmente<sup>14</sup> y que, en consecuencia, debía ser posible descomponerla en los dos gases que la conforman. Unos meses más tarde, realizó esta descomposición oxidando limaduras de hierro sumergidas en agua: el hierro absorbe el aire desflogisticado (oxígeno) y el aire inflamable (hidrógeno) se libera. Por eso pudo afirmar ante la Academia de las Ciencias de París, en noviembre de 1783, que el agua no es una sustancia simple y no puede ser llamada con propiedad elemento.<sup>15</sup> Con este y otros experimentos, Lavoisier comprendió que, cuando el oxígeno se combinaba con el aire inflamable, daba lugar a agua pura y no a un ácido, por lo que llamó a este aire inflamable *hidrógeno*, esto es, generador de agua.

Los dos componentes del agua quedaban, así, definidos. No obstante, aún no se había llegado al H<sub>2</sub>O. Es más, la propuesta del agua como compuesto no fue aceptada alegremente. Durante décadas, la afirmación de que el agua no era un elemento suscitó reacciones contrapuestas, algunas incrédulas e incluso airadas. Baste como ejemplo la de William Ford Stevenson (1811-1852), *fellow* de la Royal Society de Londres, que acusaba a Lavoisier de ser un farsante («mago supremo», lo llama) y negaba absolutamente sus tesis, en un escrito que

---

<sup>14</sup> Lavoisier, 1783: 453.

<sup>15</sup> *Ibid.*: 454.

se publicó casi setenta años después.<sup>16</sup> Y eso que, en 1800, otros miembros de la misma Sociedad, William Nicholson (1753-1811) y Anthony Carlisle (1768-1840), habían logrado descomponer agua en sus dos elementos mediante el uso de electricidad (lo que conocemos como electrólisis). Ahora resulta fácil aceptar las propuestas de Lavoisier y compañía, pero en su momento no era lo más evidente. Y aún hoy, si se piensa, las conclusiones de este relato no dejan de ser sorprendentes: resulta que el agua, que es el líquido más familiar y esencial, ¡es el producto de una mezcla de gases!

Lo que ahora nos parece evidente no lo era en el pasado y es probable que deje de parecerlo en un futuro. Esta pequeña parte de la historia de nuestra idea de agua, que cuenta simplemente cómo pasó de elemento a compuesto (no cuenta el hallazgo de la proporción de hidrógeno y oxígeno, ni explica por qué se usa la expresión  $H_2O$ , ni entra en el estudio de la molécula de agua), ilustra la complejidad de nuestra relación con el mundo físico, incluso en lo que se refiere a una de sus partes más transparentes y familiares. Contada así, como la sucesión de aportaciones de héroes individuales, deja en el tintero multitud de aportaciones necesarias para que tuviera lugar: un tejido institucional (con la Royal Society y la Académie des Sciences como actrices destacadas), una situación económica desahogada para sus protagonistas, una red de personas (sobre todo mujeres) que atendieran sus necesidades perentorias, una pléyade de artesanos que construyeron los instrumentos de observación y medida, y conocían las técnicas para su fabricación y uso, etc. En definitiva, todo un mar de nombres y sucesos perdidos sin los cuales hoy el agua sería otra cosa.

Cuando se quiere profundizar en ella, cualquier historia deja de verse linealmente y aparece más bien como un tejido cuyos hilos no acaban de componer un dibujo plenamente coherente. Aquí reside parte del encanto y la necesidad de seguir investigando: los flecos que no encajan abren nuevas historias –igual que el peso del metal calcinado, que no encajaba con la teoría del flogisto, abrió la puerta a la teoría de los gases de la química moderna y a la estructura molecular del agua–. La historia de la ciencia es así: relatos que descubren detalles no apreciados antes y acaban obligando a revisar el relato anterior. Hoy descartamos el agua como elemento y nos decantamos por el agua como compuesto, dejando así atrás milenios de pensamiento. En determinadas comunidades, puede creerse que  $H_2O$  es la definición más acabada del antaño líquido elemento. Pero, ¿quién sabe lo que nos deparará el mañana?

---

<sup>16</sup> Stevenson, 1849: 11.

Mas no por expresarse como  $H_2O$  ha abandonado el agua su antiguo puesto en el imaginario humano. La descripción del agua como compuesto de hidrógeno y oxígeno no supone la culminación de un relato de descubrimientos como el ofrecido en los párrafos anteriores, sino un paso de uno de los múltiples caminos por los que transcurre nuestro conocimiento del agua. En esta sección se ha hablado del agua como concepto sustancial, pero nuestra relación con ella tiene que ver a menudo con su papel como fuerza transformadora, que se da a través de sus múltiples formas.

#### *El agua como fuerza histórica*

En el primero de los sentidos en que el agua tiene historia, el conceptual, analizado en el apartado anterior, se ha considerado el agua como una sustancia fisicoquímica. Pero el significado del agua va mucho más allá. La forma en que el agua se presenta es también relevante para darle un sentido u otro: aunque tenga la misma composición molecular, el agua de una neblina no hace lo mismo que la de un tsunami o la del permafrost. Como sustancia, el agua reacciona a otras, pero como forma física *opera*, tiene fuerza transformadora. Eso obliga a añadir otra perspectiva para contemplarla. Después del establecimiento del agua como compuesto de hidrógeno y oxígeno, ligado a la aparición de la química moderna, tiene lugar otro acontecimiento en la historia de la ciencia que resulta clave para que podamos hablar de una historia del agua: la aparición de la geología, que a su vez está muy ligada al estudio del agua como transformadora del paisaje.

#### *Fuerza geológica*

El descubrimiento del agua como agente modelador del entorno es antiguo. Sin embargo, cuando en el siglo XIX se multiplica por varios órdenes de magnitud la antigüedad de la Tierra, el horizonte temporal de la acción acuática se amplía hasta límites insospechados. Con la consolidación de la geología, el agua se convierte en sujeto de la historia terrestre, en verdadero agente del mundo físico. Sin su concurso, nuestro mundo tendría un aspecto completamente diferente. Con Lyell, las masas y corrientes de agua se erigen en la gran fuerza modeladora del paisaje (causas acuosas), y aun de la corteza terrestre en general, junto con las fuerzas tectónicas (causas ígneas).<sup>17</sup> El agua

---

<sup>17</sup> Lyell, 1997 [1830]: 103.

como sustancia no cambia, pero la Tierra sí lo hace mediante ella. Esta agua modeladora no es puramente sustancial, amorfa (como el agua de la física o la química), sino que está definida genéricamente, como acuífero, curso fluvial, océano, etc. El agua geológica es más concreta que el agua fisicoquímica, está en algún lugar, no es homogénea y provoca transformaciones palpables –que, entre otras cosas, sirven para trazar su historia; no su historia como sustancia, sino su historia como fuerza transformadora–.

El agua es nubes, marea, tromba monzónica, humedal, cascada, delta, orvallo, meandro, géiser... Solo los volcanes y el movimiento de las placas tectónicas se le acercan en su capacidad de modelar la superficie terrestre. Puede contarse la historia de nuestro planeta a través de las marcas del agua en él, de los sedimentos que provoca y descubre, de los cañones que horada, de los restos que abandona en orillas y cauces... Porta y deposita los materiales que conforman nuestro suelo, que buscamos bateando o excavando; limpia nuestra atmósfera y conserva información de un tiempo distante cuando, hecha hielo, atrapa burbujas de aire.

Desde una perspectiva geológica, lo telúrico aparece como formador de tierra y lo acuático como disolvente, como desgastador. Se suplementa así la imagen tradicional del agua como fuente de vida sanadora con su pertinaz capacidad de erosión. De pronto, los valles (en U y en V), las llanuras, los acantilados, las playas, las cuevas, la arena... aparecen como productos de la fuerza del agua, líquida, sólida o gaseosa. Mientras que la faceta cosmogónica del agua es eminentemente creadora (o, por lo menos, fertilizadora), su cara geológica se presenta a menudo también como destructora. Es así desde la noche de los tiempos, como atestiguan los diferentes mitos sobre el diluvio. Claro que, por decirlo con Schumpeter, la destrucción es siempre creadora. Clara Janés recoge esta hermosa y cruda potencia del agua en su poema *Ciencia natural*:

Sabia es la piedra  
 que a merced de los vientos se conoce  
 y no ignora su destino de arena.  
 Espera a desmembrarse ya en desierto  
 y por fuerza amorosa  
 arrancar a las aguas  
 la condición de rosa.

*Fuerza vital*

Es difícil exagerar la importancia del agua para la vida. Cuanto más sabemos sobre el agua y sobre las formas de vida, más rica, frágil y estrecha se manifiesta su relación. Esta es conocida desde antiguo, pero su complejidad se ha desvelado sobre todo en los dos últimos siglos. La mayoría de capítulos de este libro explora esta virtud del agua y por eso aquí apenas nos detendremos en ella.

En última instancia, somos agua, como afirma Joaquín González-Nuevo en el capítulo 2. De ahí que, como el resto de habitantes del planeta, la necesitemos. El agua ha modelado el espacio que habitamos (capítulo 3) y es el origen de lo vivo (capítulo 4).

El agua es seno de vida y puede, en su caso, destruirla. Las aguas concretas determinan incluso la forma de los organismos que dependen de ella y son un factor epigenético de la mayor potencia. El agua es, pues, un potente factor evolutivo, en particular para la especie humana (capítulo 5).

No solo marca nuestra forma física, sino nuestra forma de vivir. El agua determina la prehistoria humana y, por tanto, la historia posterior. Pero, además, nos abre la puerta a conocerla, pues sus huellas nos informan del pasado. El estudio del agua –de la erosión que produce al discurrir, el aire que atrapa cuando se hiela, los sedimentos que deposita...– nos permite entender las condiciones de vida de quienes nos precedieron: sus abrigos, su clima, su dieta, su entorno... (capítulo 6).

El agua es despensa, pues alberga una de nuestras principales fuentes de alimento (capítulo 7). Nuestra interacción con el entorno, bien directamente, bien mediante construcciones humanas que modifican su espacio ecológico, también está determinada por el agua (capítulo 8).

La relación del agua con la vida la anuda también con la salud. Las propiedades sanadoras o protectoras de fuentes, caldas y manantiales constan en prácticamente todas las culturas humanas y las han acompañado durante toda su historia. El uso médico del agua se atribuye ya a Hipócrates y Pitágoras. Con el desarrollo de las ciencias modernas, en el siglo XIX, florecen los balnearios y las aguas mineromedicinales. Y hoy brotan por doquier centros de hidroterapia o de talasoterapia.

La falta de agua es anuncio de enfermedad, penuria o pobreza. La sed, el desierto y la sequía son ciertamente males, además de metáforas de otros. Sin la fuerza vital del agua, nos secamos. Por eso el agua, a pesar de que pueda presentarse a veces amenazadora e incluso mortíferamente, es casi siempre vista como un bien. También como un bien económico.

*Fuerza económica*

El desarrollo de las diferentes ciencias y tecnologías de todas las épocas, pero sobre todo a partir del siglo XIX, supuso que la consideración del agua como compuesto fisicoquímico fuera ganando terreno a las demás. Con el desarrollo del electromagnetismo y de diferentes técnicas ingenieriles, el siglo XX alumbró una nueva forma de entender el agua, relacionada con su papel como fuente de energía y riego: el recurso hídrico. Los recursos se usan o se consumen, y esto otorga al agua nuevas dimensiones, que en los últimos años han llegado a obliterar las demás.

La acción humana convierte el «recurso agua» en energía, en medio de transporte, en cloaca, en riego, etc. Puede parecer una obviedad, pero, al formar parte de la producción humana, el agua entra en la lógica económica, lo cual a su vez altera su papel: la humanización del agua cambia su historia, porque distorsiona su influencia no solo sobre los seres humanos, sino sobre la biosfera en general. Esto ocurre por lo menos desde la aparición de la agricultura y la ganadería, pero se acentúa con la llamada «revolución verde» del siglo XX.

El agua, en su calidad de sustancia homogénea, pasa a ser cuantificable. Y hay quien se ha puesto a la tarea. Según los detallados cálculos de Shiklomanov y Rodda,<sup>18</sup> el total de agua dulce en la Tierra es de  $35\,029,2 \times 10^3 \text{ km}^3$ , frente a un volumen total de la hidrosfera de  $1\,386\,000 \times 10^3 \text{ km}^3$ . Además de impresionarnos, estas cifras, por aproximadas que sean, conducen a una conclusión irrefutable: el agua de nuestro planeta es finita. El estudio cuantitativo del agua revela diferencias en su uso y disponibilidad, lo que a su vez desvela injusticias políticas y peligros ambientales. El agua se ha convertido no solo en un bien, sino además en un agente económico. Así lo reconocen las Naciones Unidas, que han creado una división para hacerse cargo del agua (UN-Water), la cual, a su vez, ha dedicado su informe de 2021 a la valoración del agua.<sup>19</sup>

El agua convertida en recurso se transforma en bien económico y, por tanto, en motor histórico, pues, como todo bien material, es limitado y, por ende, genera competencia, necesidad, acumulación, normas, tecnologías, injusticias y conflictos, que tenderán a crecer cuanto más aumente la población humana y más escaso o irregular se vuelva el flujo de agua. Cuando el agua fluye como debe, organiza la vida comunitaria; cuando provoca desastres, revela las disfunciones y desigualdades sociales (capítulo 9).

---

<sup>18</sup> Shiklomanov y Rodda, 2003: 13.

<sup>19</sup> Naciones Unidas, 2021.

Al ser objeto de disputa, no es extraño que el agua haya sido también objeto de derecho desde que hay leyes. En la actualidad, el tratamiento legal del agua es muy complejo en la mayoría de ordenamientos jurídicos. En España, por ejemplo, los usos del agua están regulados actualmente por 44 normas de ámbito estatal,<sup>20</sup> de las que cabe destacar la Ley de Aguas, el Plan Hidrológico Nacional, el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, la Ley de Responsabilidad Medioambiental, la Ley de Patrimonio Natural y de Biodiversidad o la Ley de Costas. El agua como recurso desempeña un papel en la configuración no solo del mundo físico, sino también del social. Las comunidades de regantes, las confederaciones hidrográficas, las cofradías de pescadores, las armadas e incluso los centros meteorológicos son estructuras sociales de origen acuático. No en todos sitios su influencia resulta tan manifiesta como en Ámsterdam, Tenochtitlán o Segovia, pero sin agua no habría ciudades, ni estados, ni sociedades humanas en general. Cualquier asentamiento humano está organizado teniendo en cuenta el agua (capítulo 10).

Desde luego, hoy el agua es en gran medida un producto humano o, por lo menos, humanizado: apenas hay agua concreta que no se vea alterada por la acción humana, desde el hielo antártico a los lagos interiores, desde los arroyos de montaña hasta las fosas abisales; incluso el agua atmosférica ve alterado su ciclo por el cambio climático antropogénico. Los seres humanos tienen capacidad para convertir la sustancia genérica *agua* en algo más determinado y útil para sus semejantes, o para otras especies que interesen. El agua potable, navegable, embalsada, etc., es una obra humana. El agua con que regamos, que bebemos, que utilizamos para evacuar nuestros detritos es parcialmente resultado de la intervención humana. Pero esa agua sobre la que intervenimos ha moldeado antes nuestras vidas, nuestras formas de hacer y pensar, hasta lo más íntimo, con unas extensión y profundidad verdaderamente oceánicas.

### *Fuerza simbólica*

La forma de las aguas y su valor como fuerza, recurso o producto están ligados a su consideración abstracta. Además de un agua fisicoquímica y un agua geológica, hay un agua geográfica, que es ya un agua concreta; tanto, que tiene nombres propios, que ubican e identifican ríos, lagos, océanos o neveros. Las formas en las que nombramos el agua son infinitas, pues sus manifestaciones

---

<sup>20</sup> Según el BOE (Díez Vázquez, 2021).

concretas también lo son: ¿quién podría nombrar todos los arroyos, lagunas, glaciares, mares... que han sido en todo tiempo y en todo lugar? Todavía hoy otorgamos nombres propios a las aguas. En los últimos años hemos bautizado incluso a los huracanes y las borrascas. Las aguas concretas, con su nombre propio, desbordan el concepto de sustancia: el Indo o el Orinoco no son meros flujos de H<sub>2</sub>O, sino mundos en sí mismos: ecosistemas, surtidores de alimento, modeladores del paisaje, vías, fronteras, paisaje, vínculo... Un caso reciente y límite de la concreción del agua es el de la comunidad whanganui de Nueva Zelanda, ya mencionada al principio, que ha dado un paso singular en la consideración del agua, concretamente del río con el que comparte nombre. En 2017, tras casi un siglo y medio de esfuerzo, logró que el gobierno neozelandés concediera personalidad jurídica al río Whanganui.<sup>21</sup> Algo parecido se está intentando en el Mar Menor murciano. Esto puede parecer una extravagancia a primera vista, pero no lo es tanto si se considera el agua concretada (en este caso en un río o en una porción de mar) como agente. Y esta consideración, a la vista de las virtudes del agua, no puede negarse.

Las aguas concretas desempeñan un papel protagonista en la historia humana, e incluso en la de otras especies. Ellas sirven, entre otras cosas, de camino y de frontera. El Rubicón, el Rin o la laguna Estigia son límites de un mundo y puertas de otros, tanto espacial como temporalmente. La faceta puramente material del agua resulta difícil de representar, pero su concreción en ríos, mares, lagunas, etc., ha sido motivo o inspiración desde que hay arte. Podría pensarse que, desde el punto de vista artístico, la comprensión material del agua es irrelevante, pero no, pues sin ella las aguas representables no tendrían sus virtudes y, por tanto, no merecerían la misma atención. El agua concreta ha sido siempre para los seres humanos límite y amenaza, pero más aún imán, refugio, despensa, camino, objeto amado, inspiración y hogar. Solo hay que recordar este conocidísimo pasaje de la *Anábasis* de Jenofonte para comprobar desde cuán antiguo y hasta qué hondura llega el vínculo del agua concreta (en este caso el mar Mediterráneo) con los seres humanos:

Y llegaron a la montaña en el quinto día, montaña que se llamaba Teques. Cuando los primeros hombres alcanzaron la cima y observaron el mar, se produjo un gran griterío. Al oírlo, Jenofonte y los de la retaguardia creyeron que

---

<sup>21</sup> <https://www.bbc.com/mundo/noticias-39291759>; <https://www.theguardian.com/world/2019/nov/30/saving-the-whanganui-can-personhood-rescue-a-river>; O'Donnell y Talbot-Jones (2018).

otros enemigos atacaban de frente, ya que por detrás los seguía gente procedente del país que estaba siendo quemado, y los de la retaguardia habían matado a algunos de ellos y habían hecho prisioneros a otros en una emboscada que les tendieron; además, habían tomado alrededor de veinte escudos de mimbre cubiertos de pieles de buey sin curtir con pelos. Como los gritos aumentaban y se acercaban, como los que continuamente llegaban corrían hacia los que gritaban sin parar y como el griterío se incrementaba tanto más cuanto más gente había, le pareció a Jenofonte que era algo bastante importante, y, montado en su caballo y tomando como escoltas a Licio y a sus jinetes, acudieron en ayuda. De pronto, oyeron a los soldados gritar: «¡El mar, el mar!» y pasar la consigna de boca en boca. Entonces empezaron a correr todos, hasta los de retaguardia, y las bestias de carga y los caballos eran espoleados. Cuando todo el mundo llegó a la cima, inmediatamente se abrazaron unos a otros, incluidos los generales y los capitanes, con lágrimas en los ojos. Y de repente, siguiendo instrucciones de no se sabe quién, los soldados llevaron piedras e hicieron una gran pila. Allí pusieron encima un montón de pieles de buey sin curtir, bastones de mando y los escudos de mimbre que eran botín de guerra, y el propio guía cortaba en pedazos los escudos y exhortaba a hacerlo a los demás.<sup>22</sup>

La alegría de aquellos diez mil griegos de la expedición contada por su cronista y comandante es solo una de las incontables emociones que los seres humanos han sentido frente a las aguas. Las artes de todo tiempo y lugar así lo manifiestan. La literatura se debe al agua desde sus orígenes, desde el *Libro de los cantos* chino o la *Odisea* hasta *Tres hombres en una barca*, *Marinero en tierra* o *En la orilla*, pasando por las *Coplas a la muerte del maestro don Rodrigo*, *La tempestad*, *Robinson Crusoe*, *La isla del tesoro*, *Veinte mil leguas de viaje submarino*, *El corazón de las tinieblas*... En pintura, *El nacimiento de Venus*, los paisajes holandeses del siglo xvii, las playas de Sorolla, la *Noche estrellada sobre el Ródano* se sostienen en el agua, como los lirios de Monet. Sobre el suelo, pero entre agua se han levantado el Coloso de Rodas, los palacios de Venecia y las casas burguesas de Ámsterdam, la casa del río, los jardines de la Alhambra, de Versalles, y de La Granja, el Taj Majal... El agua que empapa las obras de Tarkovski, brota de la Fontana di Trevi o cae sobre Gene Kelly cuando baila es parte de la historia del cine. En un lago con cisnes se ha danzado sobre los mejores teatros del orbe, que también han albergado la *Música acuática* de Händel. Cada año desde Viena

---

<sup>22</sup> *Anábasis*, iv, 7, 21-26.

se repite ese elogio ternario a su río no tan azul, más machacón, pero también más ligero que *El oro del Rin*, y mucho más popular que *La mer*. No han faltado en los últimos siglos barcarolas ni habaneras, un *Mediterráneo* o incluso unas aguas de marzo, en las que Jobim resume tantas facetas del líquido vital:

É o pé, é o chão, é a marcha estradeira  
*Passarinho na mão, pedra de a tiradeira*  
 É uma ave no céu, é uma ave no chão  
*É um regato, é uma fonte, é um pedaço de pão*  
*É o fundo do poço, é o fim do caminho*  
*No rosto um desgosto, é um pouco sozinho...*

La lista de obras artísticas vinculadas a aguas concretas es interminable. También en las artes aplicadas, las de la ingeniería o la técnica en general, las aguas concretas han tenido influencia. La náutica y la construcción naval son el ejemplo más conspicuo, pero también los puentes, calzadas, tejados, redes de saneamiento, etc., son producto del agua. Y asimismo lo son objetos de vida más modesta: el paraguas, el botijo, el vaso, la botella, la bota, el gotero, el colador, el cubo, el balde, la palangana, el grifo, la jarra, la esponja, la fregona... Lavar y beber.

La conjunción de belleza y utilidad del agua, con su incesante fuerza metafórica, ha hecho su presencia constante en prácticamente todos los rituales humanos. No hay religión que no haya acudido al agua para representar la purificación, el tránsito, la renovación, la transparencia, la inocencia, la fertilidad, el alimento, o la vida misma. El agua desborda todos los ámbitos en los que aparece y fluye libremente entre ellos, conectando la química con la poesía, la música con la fontanería o el juego con la higiene.

La gran historia del agua es también la de nuestra relación con el entorno, la de nuestra manera de concebirlo y, por tanto, la de nuestro lenguaje (si no de nuestras lenguas). Supone un paso del mito al logos y vuelta, porque la mirada estrictamente científica del agua no puede abarcar todas sus implicaciones, ni su presencia omnímoda en todo lo humano (ni, seguramente, su papel en lo no humano). La gran historia del agua es también un viaje al agua de la historia, a la liquidez de nuestro mundo, a la volatilidad de nuestras formas de ser. Mirar al agua nos refleja, pero, si no caemos en el narcisismo, también nos obliga a dirigir la mirada al agua misma y, a su través, a todo lo que nos rodea, que también se refleja en ella y se conforma por ella.

## EL AGUA Y LA GRAN HISTORIA

Está claro que el agua ha desempeñado un papel en la historia de la Tierra, la vida en ella y la humanidad, y también que la manera de concebir el agua ha ido cambiando con el tiempo. Pero, ¿qué ocurre con el agua misma? Esa sustancia que hemos descrito de múltiples maneras, la referencia del término *agua*, en abstracto, ¿no ha sido siempre la misma? Hasta hace relativamente poco, el agua ha sido considerada uno de los elementos fundamentales de la realidad física. Como elemento, el agua es una constante. Solo a partir de la institución de la química moderna el agua empieza a ser vista como un compuesto y, por tanto, se abre la posibilidad de su variación y su descomposición.

La concepción del agua como compuesto permite explicar sus diferentes formas y abre la pregunta por su origen, es decir, permite concebir una historia del agua. Solo en los últimos dos siglos el agua ha cobrado ese carácter histórico: hasta entonces, el agua era algo que estaba siempre ahí, sin partes, sin principio y por tanto sin cambios. El agua que retratan la geología y las ciencias contemporáneas en general (la física, la química, la biología, la meteorología...) es causa de transformaciones físicas, pero también consecuencia. Por eso podemos contar su historia, como se hace en los capítulos posteriores.

La concepción del agua como sustancia es un producto de la historia de la ciencia occidental. Pero el agua no es solamente eso. Al entenderse como compuesto, el agua pierde, lógicamente, su carácter elemental y, por tanto, su papel propiamente cosmogónico. Sin embargo, no ve mermada su potencia simbólica. Además de por sus propiedades como sustancia, el agua resulta relevante como componente formal de nuestro entorno. El agua pura no tiene color ni olor ni sabor, pero el agua tiene aspecto: se puede representar, contemplar, disfrutar, admirar, paladear, escuchar... El agua genera y ocupa espacio en una forma diferente de otras sustancias, adquiriendo formas que le son propias: río, lago, estuario, catarata, mar, niebla, llovizna, charco, ola, chorro... Su sustancia es básicamente la misma, pero nadie confundiría un manantial con una nube. La forma del agua, por tanto, cambia su significado y es relevante para entender su potencia.

La forma del agua está íntimamente ligada a su papel como generadora o destructora. La acción combinada de las olas marinas puede generar una playa, darle vida y hacerla atractiva para la acción humana, pero un tsunami compuesto por exactamente la misma agua puede arrasarla. De ahí que tenga sentido el estudio de las formas del agua, el conocer cómo se forman las tormentas, las avenidas fluviales, las lagunas, las mareas, etc.

Además, las formas del agua explican una buena porción de la historia de la ciencia y de la técnica: las crecidas del Nilo, que exigían volver a parcelar con precisión sus márgenes después de cada avenida, dieron lugar a la primera geometría; la navegación de altura por los mares y océanos o la anticipación de las estaciones lluviosas o secas condujeron a la astronomía; la resistencia de las olas y las corrientes obligaron a desarrollar la construcción naval; sortear, canalizar y acumular el agua con puentes, canales o presas alumbró la ingeniería civil; la evacuación del agua de las minas fue decisiva en la conformación de la física moderna; etc.

Todas las facetas del agua, como sustancia en abstracto y en sus formas concretas, están relacionadas con su estructura fisicoquímica. A su vez, esta estructura es el resultado de una serie de fuerzas que actúan sobre componentes elementales de la materia, dando lugar a unas propiedades particulares. Todo esto no tiene lugar solo sistemáticamente, sino también históricamente, desarrollándose con el tiempo. Nos interesa conocerlo porque las formas del agua son parte de nuestra vida; es decir, la multiplicidad de facetas del agua y su cercanía son lo que nos impulsa a adentrarnos en su estructura, en un círculo de realidad y conocimiento que da lugar a un viaje que puede llevarnos a cualquier rincón del universo y de la historia.

El agua desempeña un papel en nuestra historia: podemos recorrer esta a través de aquella. Pero, además, el agua tiene su propia historia, más allá de lo que significa para nosotros, los seres humanos. Esta historia se extiende durante miles de millones de años, y por eso es una *gran historia*. Pero también lo es porque, para narrarla, se precisa el concurso de multitud de disciplinas: la química, la física, la geología, la biología, la sociología, la historia, la historia del arte, la filosofía, las matemáticas, la ingeniería... Lo que cada parcela del conocimiento científico-técnico nos cuenta del agua puede entretenerse en forma de una historia, que sería entonces una gran historia, no por su duración solamente, sino, sobre todo, por su complejidad.

Contar la historia del agua sin dejar nada fuera supone detenerse, como hemos hecho, en la historia de la ciencia, pero también en la historia humana en general. Es más, lleva a adentrarse más allá de los relatos, en la prehistoria. Y antes que eso, a desentrañar la evolución humana. Pero tampoco puede dejarse de lado la evolución de otras especies de seres vivos, ni la transformación de la superficie terrestre, ni la estructura y la formación de la Tierra, ni de los planetas en general, ni de los cuerpos celestes más en general: la historia del universo en su totalidad es relevante para entender la del agua. El agua nos lleva a recorrer la historia universal y la social, nos hace transitar por la arqueología,

la química, la filosofía, la física, la astronomía, la geología, la economía, la geografía, las bellas artes, la ingeniería civil, la construcción naval, la cartografía, la ecología, la biología, la sociología... Por eso puede escribirse una *gran* historia del agua, en dos sentidos: porque el agua tiene una historia que puede abarcar desde el comienzo del tiempo hasta ahora, y porque recorrerla implica prácticamente todas las disciplinas de conocimiento.

La expresión *gran historia* no es una invención de quienes elaboramos este libro: designa un enfoque académico consolidado, que se origina en las últimas décadas del siglo xx a partir de los trabajos de David Christian, Fred Spier, William McNeill, Walter Álvarez y otros autores, con el propósito de integrar, en la medida de lo posible, los conocimientos generados por las diversas disciplinas científicas sobre el universo en su conjunto. No se trata de hacer historia universal, ni cosmología, sino de entresacar de todas las ciencias los elementos para construir y transmitir un relato coherente del cosmos. Según Fred Spier, la gran historia «es la aproximación a la historia que coloca la historia humana en el contexto de la historia del cosmos, desde el origen del universo hasta las actuales formas de vida en la Tierra. Contemplando esta historia humana desde un punto de vista sustancialmente diferente de los enfoques académicos al uso, la gran historia sitúa el pasado de la especie humana dentro del conjunto de la historia natural desde el *big bang*. [...] El enfoque de la gran historia nos ayuda a crear un nuevo marco teórico, dentro del cual cabe, en principio, todo el conocimiento científico».<sup>23</sup>

Este enfoque reúne a especialistas de las más diversas ramas de conocimiento para, sin abandonarlas, conjugar esfuerzos y ofrecer un retrato lo más completo posible del mundo en el que nos encontramos. Se trata, por así decir, de aparcar la fotografía de detalle y retratar el entorno con un gran angular, con el mayor posible, para así poner de manifiesto conexiones, regularidades, esquemas y, claro, también incoherencias en la historia de nuestro universo. Esta mirada de amplio rango es indispensable para organizar nuestros conocimientos sobre ciertos fenómenos (la formación de las galaxias o los planetas, la materia, la vida en la Tierra...) imposibles de apreciar en la distancia corta (temporal o espacial).

La Universidad de Oviedo es una de las pocas del mundo donde se cultiva y se enseña como tal la gran historia. Desde hace años, quienes firmamos esta obra venimos desarrollando, bajo el liderazgo de Olga García Moreno, traba-

---

<sup>23</sup> Spier, 2015: 1.

jos que intentan complementar nuestras diversas especialidades más concretas con la mirada abierta y general que supone la gran historia. Dentro de la Red Europea de Gran Historia, y en contacto con la mayor parte de los centros docentes y de investigación donde se desarrolla este enfoque, hemos ido ampliando nuestros conocimientos, que hemos compartido en diversos cursos y conferencias dentro y fuera de nuestra Universidad. Este libro es el resultado de un largo trabajo en equipo, y a la vez un primer paso en un camino de conocimiento transdisciplinar que no ha hecho más que empezar.

El estudio del agua desde la perspectiva de la gran historia nos ayuda a comprender las dos: el agua y la gran historia. Igual que el enfoque de la gran historia puede ayudar a entender mejor qué significa el agua, el estudio del agua puede hacer comprender en qué consiste la gran historia. Por eso quizá se entienda mejor qué es la gran historia al concluir el libro.

Lo que aquí se escribe no pretende quedarse en mera teoría. En realidad, ninguna verdadera teoría permanece encerrada en sí misma: sirve para algo, para comprender la realidad, acaso transformarla y convivir mejor con ella. Como la fotografía, la teoría se refiere a algo que la desborda, que está fuera, aunque se perciba irremediamente a su través. La imagen del amanecer te-rrestre resultó fundamental para instilar en los seres humanos la preocupación por su planeta, la conciencia de su pequeñez y fragilidad. Sin ella, la ONU no habría establecido, en 1970, el Día de la Tierra, y no estaríamos hoy hablando del *planeta azul*. La gran historia, y en concreto la gran historia del agua, puede ser también una pequeña contribución al cuidado de nuestro mundo, pues solo conociendo por qué es como es, podemos actuar para conjurar el peligro de que nuestras acciones lo dañen hasta el punto de hacerlo inhóspito para muchas formas de vida, incluida la nuestra. Quizá la antigua y provocadora declaración de Tales resulte hiperbólica, pero no lo son tanto estos versos del poeta uruguayo Washington Benavides, que cierran su *Elogio sustancial del agua*:

[...]

El agua estaba en todo  
lo bueno de la jornada.  
Ahora comprendo por qué  
el hombre es casi todo pura agua.

Ah, si lo fuese todo,  
cuántas penas ahorrara.

**REFERENCIAS**

- BALL, Philip: *H<sub>2</sub>O. A Biography of Water*, Londres: Phoenix, 2000 [1999].
- BÖHME, Gernot y BÖHME, Hartmut: *Feuer, Wasser, Erde, Luft. Eine Kulturgeschichte der Elemente*, Múnich: C. H. Beck, 1996. Trad. al español: *Fuego, agua, tierra, aire. Una historia cultural de los elementos*, Barcelona: Herder, 1998.
- CHANG, Hasok: «The Hidden History of Phlogiston: How Philosophical Failure Can Generate Historiographical Refinement», *HYLE. International Journal for Philosophy of Chemistry*, 16, 2 (2010), 47-79.
- CHRISTIAN, David: *This Fleeting World: A Short History of Humanity*, Great Barrington, MA: Berkshire, 2008.
- DÍEZ VÁZQUEZ, Jesús Ángel (ed.): *Código de Aguas. Normativa estatal*, Madrid: Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado, 2021.
- HARROD, James B.: «The Case for Chimpanzee Religion», *Journal for the Study of Religion, Nature and Culture*, 8, 1 (2014), 8-45.
- HELMONT, Jan Baptiste van: *Oriatrike, or Physick Refined*, Londres: Lodowick Lloyd, 1662.
- HESÍODO: *Teogonía*. Trad. esp. de Aurelio Pérez Jiménez y Alfonso Martínez Díez: *Obras y fragmentos*, Gredos: Madrid, 1978 y ss.
- ISIDORO DE SEVILLA: *Etimologías*. Ed. y trad. esp. de José Oroz Reta y Manuel A. Marcos Casquero, Madrid: BAC, 2004 y ss.
- JAFFE, Bernard: *Crucibles: The Story of Chemistry from Ancient Alchemy to Nuclear Fission*, 4.<sup>a</sup> ed., Londres: Dover, 1977.
- KITCHER, Philip: *The Advancement of Science: Science without Legend, Objectivity without Illusions*, Nueva York y Oxford: Oxford University Press, 1993.
- KUHN, Thomas S.: *The Structure of Scientific Revolutions*. Chicago: The University of Chicago Press, 1962 y ss. Trad. esp.: *La estructura de las revoluciones científicas*. México: F. C. E., 1971.
- LAVOISIER, Antoine Laurent de: «Extrait d'un Mémoire lu par M. Lavoisier, à la Séance publique de l'Academie Royale des Sciences du 12 Novembre, sur la nature de l'Eau, & sur des expériences qui paroissent prouver que cette substance n'est point un élément proprement dit, mais qu'elle est susceptible de décomposition & de recomposition», *Journal de Physique*, T. xxiii, P. II (1783).
- LAUDAN, Larry: «A Confutation of Convergent Realism». *Philosophy of Science*, 48 (1981), 19- 49.
- LINTON, Jamie: *What Is Water? The History of a Modern Abstraction*, Vancouver: The University of British Columbia, 2010.

LYELL, Charles: *Principles of Geology*, Londres: Penguin, 1997 [1830–33].

MUSGRAVE, Alan: «Why Did Oxygen Supplant Phlogiston? Research Programmes in the Chemical Revolution», en C. Howson (ed.), *Method and Appraisal in the Physical Sciences*, Cambridge: Cambridge University Press, 1976, 181–209.

NACIONES UNIDAS: *The United Nations World Water Development Report 2021: Valuing Water*, París: UNESCO, 2021.

O'DONNELL, Erin L. y TALBOT-JONES, Julia: «Creating legal rights for rivers: lessons from Australia, New Zealand, and India», *Ecology and Society*, 23, 1 (2018), 7.

PIMENTEL, David y PIMENTEL, Marcia H.: *Food, Energy, and Society*, 3<sup>rd</sup> ed., Boca Raton: CRC Press, 2008.

PRIESTLEY, Joseph: *Experiments and Observations on Different Kinds of Air, Vol. II*. Londres: J. Johnson, 1775.

RUTHERFORD, Daniel: *Dissertatio inauguralis de aere fixo dicto, aut mephitico...* Edimburgo: Balfour y Smellie, 1772.

SHIKLOMANOV, I. A. y RODDA, John C. (eds.), *World Water Resources at the Beginning of the Twenty-First Century*, Cambridge: Cambridge University Press/UNESCO, 2003.

SPIER, Fred: *Big History and the Future of Humanity*, 2.<sup>a</sup> ed. Oxford: John Wiley & Sons, 2015.

STEVENSON, William Ford: *The composition of hydrogen and the non-decomposition of water incontrovertibly established, in answer to the award of a medal by the Royal Society, whereby the contrary doctrines are absolutely affirmed. Also the absurdity of the existing systems of electricity and magnetism demonstrated, and the true ones given*, 2.<sup>a</sup> ed., Londres: James Ridgway, 1849.

TOULMIN, Stephen: «Crucial Experiments: Priestley and Lavoisier», *Journal of the History of Ideas*, 18, 2 (1957), 205–220.

## II. EL ORIGEN DEL AGUA EN EL UNIVERSO Y EN LA TIERRA

**Joaquín González-Nuevo González y Laura Bonavera**

Departamento de Física, Universidad de Oviedo

### CREACIÓN Y EVOLUCIÓN DEL UNIVERSO

NADA, y después TODO. Así podríamos decir que sería el comienzo del universo según la teoría del Big Bang, la teoría que mejor explicaría la creación y evolución del universo teniendo en cuenta toda la información que tenemos sobre él (ver Figura 1; los conceptos que aparecen se irán discutiendo a lo largo de las próximas secciones). Por alguna razón que la ciencia todavía está tratando de entender, las cuatro dimensiones que conocemos (las tres espaciales junto con el tiempo) comenzaron a crecer de manera mucho mayor con respecto a otras dimensiones adicionales posibles, constituyendo el comienzo de nuestro universo. Pero desde ese primer instante, nuestro universo, casi puntual, ya contenía toda la energía que posteriormente sería transformada para generar todo el cosmos que observamos a nuestro alrededor, el agua y a nosotros mismos.

Esta teoría se gestó a partir de los años veinte del siglo xx, después del descubrimiento de la expansión del universo gracias a las observaciones de Edwin Hubble<sup>1</sup> y a los trabajos de Georges Lemaître.<sup>2</sup> Este último fue el primero en proponer que, si volviéramos hacia atrás en el tiempo, entonces toda la materia

---

<sup>1</sup> Hubble, 1929

<sup>2</sup> Lemaître, 1927

del universo acabaría concentrada en un único punto. El término de *Big Bang* fue acuñado por el astrónomo inglés Fred Hoyle, que, en realidad, estaba más a favor de la teoría alternativa del estado estacionario,<sup>3</sup> mucho más de moda en aquella época.

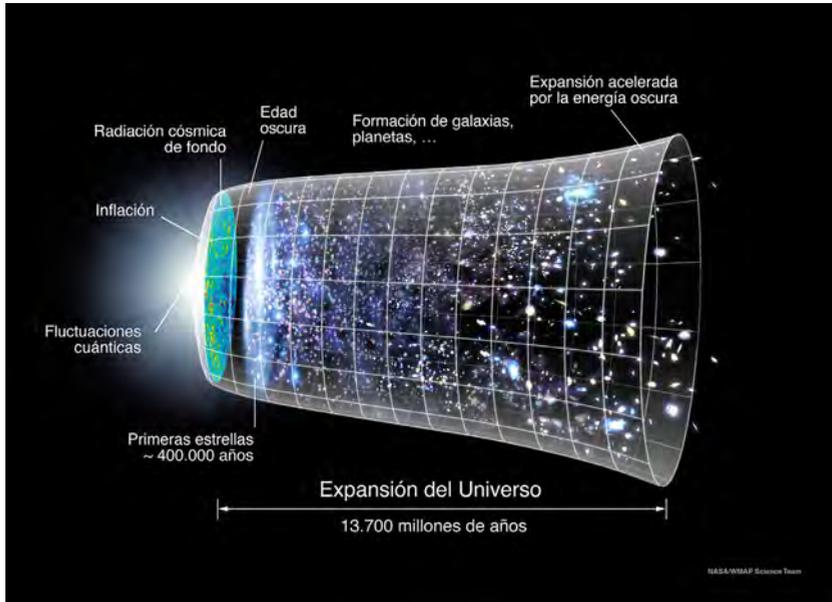


Figura 1. Cronología de la evolución del Universo. (NASA, Ryan Kaldari y adaptación al español por Luis Fernández García).

Durante esos primeros instantes el crecimiento fue extremo, de carácter exponencial, duplicando su volumen más de 60 veces en los primeros  $\sim 10^{-30}$  milisegundos. A medida que el volumen del universo aumentaba, la energía tenía que distribuirse de manera uniforme, por lo que la densidad de energía (puede entenderse como *temperatura*) disminuía rápidamente. Por lo tanto, la evolución del universo en esos primeros instantes se reduce simplemente a su enfriamiento (evolución térmica) y cómo las partículas más elementales se irán

<sup>3</sup> El modelo cosmológico del estado estacionario considera que la densidad de materia en un universo en expansión permanece sin cambios debido a una creación continua de materia, adhiriéndose así al principio cosmológico perfecto, un principio que afirma que el universo observable es prácticamente el mismo en cualquier momento y en cualquier lugar. Bondi y Gold, 1948 y Hoyle, 1948.

formando a medida que la temperatura caiga por debajo de una cierta temperatura umbral.

De manera general, el proceso que se irá repitiendo para las distintas especies de partículas primordiales será siempre más o menos el mismo. Las partículas, según su naturaleza, tienden a agruparse entre sí mediante alguna fuerza que las une, aumentando la complejidad del universo, o a interactuar con otras partículas, pudiendo romper dichas agrupaciones. Si la temperatura es lo suficientemente alta, el proceso de creación y destrucción se compensa manteniendo un estado de equilibrio. Sin embargo, a medida que el universo se expande la temperatura de las partículas que contiene disminuye. Así que llega un momento en que las interacciones ya no son suficientemente energéticas para romper esas agrupaciones que se estaban continuamente creando y destruyendo. A partir de ese momento, por un lado, tenemos la creación estable de un nivel de complejidad superior (por ejemplo, la formación de protones como unión de tres cuarks<sup>4</sup> o de átomos como unión de protones, neutrones y electrones); por el otro, tenemos que las partículas que interactuaban destruyendo las agrupaciones se desacoplan (su probabilidad de interacción se vuelve muy pequeña) y pueden empezar a viajar libremente por el universo sin mayor interferencia.

Si nos saltamos los primeros  $10^{-12}$  s del universo, nos encontramos ya con un universo que se ha enfriado hasta los  $\sim 10^{15}$  K,<sup>5</sup> es decir, ya se ha reorganizado en su forma de «baja-temperatura». Hay que tener en cuenta que en la llamada «Época de Planck», a unos  $10^{-43}$  s, el universo alcanzaba una temperatura superior a  $\sim 10^{32}$  K. A pesar del fuerte enfriamiento que se estaba produciendo, las temperaturas seguían siendo tan altas que ni siquiera los cuarks conseguían unirse para formar hadrones<sup>6</sup> de manera estable.

A partir de los  $10^{-5}$  s la temperatura baja por debajo de los  $\sim 10^{12}$  K y los cuarks empiezan a poder formar hadrones sin ser inmediatamente destruidos. Al final de este proceso, de entre todos los hadrones solo quedarán los protones y los neutrones por ser los más estables. Sin embargo, hasta el primer segundo del universo, con  $\sim 10^{10}$  K, ambas partículas seguirán transformándose la una

---

<sup>4</sup> Los cuarks son las partículas subatómicas elementales (que no están formadas por otras de menor tamaño) a partir de las cuales se formarán otras de mayor complejidad o masa, como el protón y el neutrón

<sup>5</sup> Un K o Kelvin es la unidad de medida de temperatura absoluta. Para pasar a °C habría que restar 273.15

<sup>6</sup> Los hadrones son partículas subatómicas formadas por dos cuarks, llamados mesones, o tres cuarks como los protones y los neutrones

en la otra mediante la interacción con electrones y neutrinos (ver la Figura 2). Por debajo de esa temperatura, dicho proceso dejará de tener efecto y se producirán dos consecuencias: la primera, que los neutrinos se desacoplarán del resto de la materia y viajarán libremente por el universo (de hecho, cada segundo nuestro cuerpo es atravesado por decenas de billones de neutrinos); la segunda, que la relación entre el número de neutrones y protones quedará fijada con una relación 1:6, teniendo en cuenta que los protones tienen una masa ligeramente menor.

Esta es la situación en la que las condiciones del universo permitirán la producción de los primeros núcleos atómicos, es decir, la unión estable de al menos un protón y un neutrón. Este proceso se denominará *nucleosíntesis primordial*.

#### NUCLEOSÍNTESIS PRIMORDIAL

Hasta los primeros 20 minutos, y con temperaturas todavía superiores a  $\sim 10^7$  K, se producen las reacciones primordiales de fusión nuclear. Son reacciones donde los protones y neutrones se unen para formar núcleos atómicos de mayor masa. La unión de un protón y un neutrón se denomina *deuterio* y es el primer paso para construir núcleos de masas superior (ver Figura 2). Debido a la energía que todavía tenían los fotones, eran lo suficientemente energéticos para destruir el deuterio fácilmente, así que este no podrá sobrevivir lo suficiente antes de los 10 s.

Mediante las distintas combinaciones del deuterio con otros protones, neutrones o incluso consigo mismo, se consiguen núcleos estables de otros elementos ligeros de la tabla periódica: el helio (dos protones + dos neutrones) o el litio (tres protones + tres o cuatro neutrones), que son estables, y el berilio (4 protones y 3 neutrones), que es bastante inestable y se convirtió posteriormente casi todo de nuevo en helio.

Sin embargo, durante la nucleosíntesis primordial prácticamente no se produjeron núcleos atómicos más pesados de los anteriormente comentados. Eso se debe a la inestabilidad de los núcleos atómicos con 5 u 8 nucleones (nombre genérico común para los protones y neutrones) y a las características particulares del helio, que es muy estable y no se combina fácilmente para producir núcleos atómicos más pesados (al helio le cuesta mucho capturar un protón o combinarse consigo mismo).

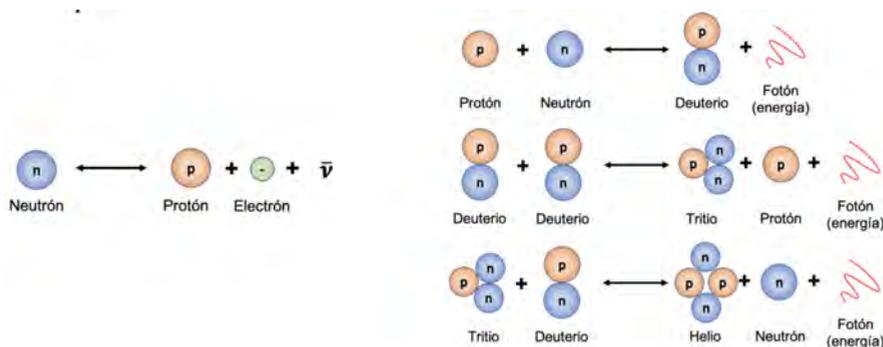


Figura 2. Algunos ejemplos de las reacciones principales durante la evolución térmica del universo. Inmediatamente después del Big Bang, el universo se llenó de una densa “sopa” de partículas subatómicas, llamadas cuarks y leptones (como electrones), y sus equivalentes de antipartículas. 0.01 segundos después del Big Bang, algunos de los cuarks se habían unido para formar neutrones y protones. Después de 3,5 minutos, se habían formado núcleos de hidrógeno (protones) y helio. Después de un millón de años, el universo estaba ya mucho más frío (los fotones ya no tenían la suficiente energía para romper los átomos de Helio formados) y se encontraba poblado casi únicamente de átomos de hidrógeno y helio, que constituyen la materia prima de estrellas y galaxias.

Cuando la temperatura bajó de los  $\sim 10^7$  K, y teniendo en cuenta que la densidad de nucleones había bajado también bastante, los nucleones dejaron de tener la energía suficiente para continuar uniéndose. En ese momento se detuvo el proceso de fusión y por tanto el periodo de la nucleosíntesis primordial. Casi todos los neutrones que se fusionaron, en lugar de decaer,<sup>7</sup> terminaron combinados en helio. Esto se debe al hecho de que el helio tiene la energía de enlace más alta por nucleón entre los elementos ligeros y, por tanto, es muy estable en comparación con los demás. Por lo tanto, podemos predecir que aproximadamente el 8 % de todos los átomos deberían ser helio: partiendo de la proporción entre protones y neutrones de 1:6 y, sabiendo que cada átomo de helio está compuesto de dos neutrones, obtenemos una proporción de 1:12 aproximadamente. En consecuencia, teniendo en cuenta esta proporción y que la masa del helio es cuatro veces la del hidrógeno, obtenemos que el  $\sim 25$  % de la masa del universo está en forma de helio, en línea con las observaciones. Quedaron pequeñas trazas de deuterio y tritio (un protón y dos neutrones), ya

<sup>7</sup> El decaimiento o descomposición de partículas es el proceso espontáneo de una partícula subatómica inestable que se transforma en otras partículas de menor masa.

que no hubo suficiente tiempo y densidad de partículas para que reaccionaran y acabaran formando más helio.

A partir de ese momento, las abundancias de los núcleos atómicos primordiales quedaron fijadas y prácticamente han permanecido casi inalteradas hasta nuestros días. El proceso de nucleosíntesis, es decir, la fusión nuclear, solo se volverá a poder producir cuando se recuperen las condiciones que tenía el universo en la época primigenia, es decir, altas densidades de nucleones a altas temperaturas. Como se discutirá más adelante, estas condiciones se cumplirán de nuevo en el interior de las estrellas.

El hecho de que las abundancias primordiales permanezcan prácticamente inalteradas nos permite en la actualidad medir con bastante precisión dichas abundancias y compararlas con las predicciones del modelo estándar de partículas, del Big Bang o incluso de la física de la fusión nuclear. Las mediciones actuales encuentran unas abundancias en masa de ~75 % de hidrógeno (protones), ~25 % de helio, ~0,01 % de deuterio y tritio, trazas (del orden de  $10^{-10}$ ) de litio y el resto de elementos más pesados en proporciones insignificantes a nivel cosmológico. El hecho de que las abundancias observadas en el universo sean generalmente consistentes con las predicciones teóricas se considera una fuerte evidencia a favor de la teoría del Big Bang.

La historia de la nucleosíntesis del Big Bang comenzó con los cálculos de Ralph Alpher en la década de 1940. Alpher publicó dichos cálculos en el famoso artículo de Alpher-Bethe-Gamow<sup>8</sup> que describía la teoría de la producción de los elementos más ligeros en el universo temprano. Durante la década de 1970, se inició un gran enigma relacionado con la densidad de bariones<sup>9</sup> calculada por la nucleosíntesis del Big Bang. Los datos experimentales indicaban que dicha densidad de bariones era mucho menor que la masa observada del universo basada en mediciones de curvas de rotación de galaxias y dinámica de cúmulos de galaxias.<sup>10</sup> Este rompecabezas se resolvió, en parte, postulando la existencia de la materia oscura (que vendrá explicada más adelante).

---

<sup>8</sup> Alpher, Bethe y Gamow, 1948, también conocido como el artículo  $\alpha\beta\gamma$ .

<sup>9</sup> Los bariones son un tipo de hadrones compuestos de un número impar de cuarks (al menos 3). Ejemplos de bariones son los protones y los neutrones.

<sup>10</sup> Un cúmulo de galaxias es una agrupación estable de varias decenas, o incluso cientos, de galaxias.

**RECOMBINACIÓN Y FORMACIÓN DEL FONDO CÓSMICO DE MICROONDAS**

Una vez que los primeros núcleos se formaron, el universo estaba compuesto casi exclusivamente por protones (y un 8 % de helio), electrones y fotones. La atracción electromagnética entre los electrones y los protones hacía que intentasen unirse para formar un átomo neutro de hidrógeno, el átomo más sencillo que existe. Sin embargo, hasta aproximadamente 300 000 años después de la creación del universo, las temperaturas seguían siendo todavía altas,  $> 4000$  K, por lo que los fotones eran lo suficientemente energéticos como para destruir inmediatamente dichos átomos de hidrógeno al interactuar con ellos (arrancando los electrones de los protones).

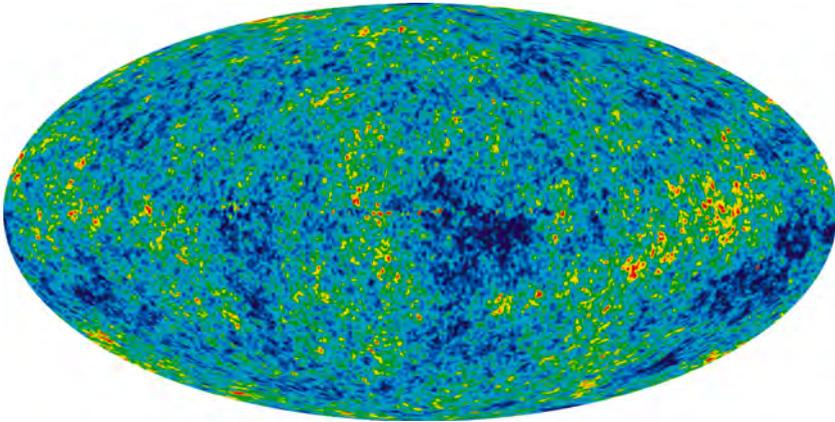


Figura 3. La imagen detallada de todo el cielo del universo primigenio creada a partir de datos del satélite WMAP tomados durante siete años. La imagen revela fluctuaciones de temperatura de 13,7 mil millones de años (mostradas como diferencias de color) que corresponden a las semillas que crecieron para convertirse en cúmulos de galaxias. Esta imagen muestra un rango de temperatura de  $\pm 200$  microKelvin. (NASA / WMAP Science Team).

Pero el universo seguía expandiéndose y por tanto su temperatura seguía disminuyendo poco a poco. Por debajo de los  $\sim 4000$  K, solo algunos de los fotones eran capaces de romper los átomos neutros de hidrógeno. Así que durante otros 100 000 años se fue produciendo paulatinamente un mayor número de átomos de hidrógeno, a medida que restaban menos fotones con la energía suficiente para contrarrestar dicha producción. Este periodo recibe el nombre de *época de la recombinación*. La palabra *recombinación* es engañosa, ya que la teoría

del Big Bang no postula que los protones y los electrones se hayan combinado antes, pero el nombre existe por razones históricas, ya que fue puesto antes de que la hipótesis del Big Bang se convirtiera en la teoría principal de la creación del universo.

Otra consecuencia de la época de la recombinación fue la «liberación» de los fotones. Antes de la recombinación, los fotones no podían viajar libremente por el universo, ya que interactuaban constantemente con los electrones y protones libres. Podemos entender este fenómeno con el símil de una persona intentando salir de un concierto abarrotado de gente con la que choca continuamente. Esta continua interacción causa además una pérdida de la información física asociada a los fotones. Por ejemplo, nos resulta imposible determinar cuál era la dirección original de cada fotón después de tantos choques aleatorios. Por lo tanto, mediante la medición de esos fotones no podemos estudiar cómo era el universo en épocas anteriores a la recombinación. Sin embargo, una vez que se produjo la recombinación, el *camino libre medio*<sup>11</sup> de los fotones aumentó considerablemente debido al menor número de electrones libres con los que interactuar (la mayor parte de los electrones ahora formaban parte de los átomos neutros de hidrógeno, lo que hace disminuir mucho la probabilidad de interacción). A partir de ese momento los fotones pudieron empezar a viajar libremente por el universo sin prácticamente volver a interactuar con la materia.

Los fotones emitidos en aquel momento llevan viajando por el universo desde entonces y, actualmente, podemos medirlos en la banda de las microondas. Por esta razón, esa emisión es denominada la *radiación cósmica de microondas* (CMB, por sus siglas en inglés). Esta radiación fue primero predicha por Ralph Alpher y Robert Herman en 1948,<sup>12</sup> pero hasta 1964 no fue detectada por casualidad por Arno Penzias y Robert Wilson,<sup>13</sup> lo que les hizo recibir el premio Nobel en 1978. La CMB es una de las fuentes de información más importantes sobre el universo temprano porque es la radiación electromagnética más antigua a la que podemos acceder. Su existencia es otra de las confirmaciones más relevantes de la teoría del Big Bang.

---

<sup>11</sup> En física se define el camino libre medio como la distancia promedio que una partícula puede viajar antes de interactuar con otra.

<sup>12</sup> Alpher y Herman, 1948.

<sup>13</sup> Penzias y Wilson, 1965.

La CMB presenta un espectro térmico de cuerpo negro<sup>14</sup> a una temperatura actual de  $2,72548 \pm 0,00057$  K.<sup>15</sup> Su distribución es casi uniforme en todas las direcciones, y aquí lo más importante es ese *casí*: tiene unas pequeñas variaciones residuales, llamadas *anisotropías*, que muestran un patrón muy específico. Dicho patrón coincide con el que se espera de pequeñas variaciones térmicas (del orden de 1/100 000), generadas por las fluctuaciones cuánticas de la materia en un espacio muy pequeño, que se ha expandido al tamaño actual del universo. Aunque muchos procesos diferentes pueden producir la forma general de un espectro de cuerpo negro, ningún modelo que no sea el Big Bang ha explicado todas las características de las anisotropías. Como resultado, la mayoría de los cosmólogos consideran que el modelo del universo del Big Bang es la mejor explicación para la CMB. La detección de estas anisotropías por el satélite *COBE* les valió el premio Nobel en el 2006 a sus representantes, John C. Mather y George F. Smoot.

Las anisotropías contienen una gran cantidad de información muy importante y precisa sobre las condiciones del universo en la época de la recombinación. Pero su relevancia para la existencia del universo tal y como lo conocemos, así como para nuestra propia existencia, es mucho mayor de lo que podría parecer a primera vista. En aquellas anisotropías donde se había acumulado una cantidad mayor de materia, la gravedad empezó a hacer su trabajo, atrayendo más materia de sus alrededores. Esto inició un proceso irreversible cuya consecuencia fue el aumento de materia en ciertas zonas a costa de vaciar otras. Por el efecto de la expansión del universo, esas pequeñas zonas inicialmente fueron adquiriendo escalas de tamaño cosmológico y, después de mantenerse dicho proceso de manera continuada durante miles de millones de años, acabaron dando la forma filamentosa que se observa actualmente en la distribución de materia del universo. Debido a esa distribución tan característica, la estructura a gran escala del universo recibe el nombre de *telaraña cósmica*, recordando también a una red de neuronas o a una imagen nocturna de las ciudades unidas entre sí por carreteras (ver Figura 4).

---

<sup>14</sup> Un cuerpo negro es un cuerpo físico idealizado que absorbe toda la radiación electromagnética incidente, independientemente de la frecuencia o el ángulo de incidencia. Además, es un emisor ideal: en cada frecuencia, emite tanta o más energía térmica radiante que cualquier otro cuerpo a la misma temperatura.

<sup>15</sup> Fixen, 2009.



Figura 4. A la izquierda una simulación de la distribución de galaxias a través de su luz a escalas cosmológicas (más de 50 millones de años luz de diámetro) (Crédito: Andrew Pontzen/Fabio Governato). A la derecha una vista de Asia oriental de noche construida a partir de datos adquiridos por el satélite Suomi National Polar-orbiting Partnership (Suomi NPP) durante nueve días en abril de 2012 y trece días en octubre de 2012 (Crédito: NASA Earth Observatory).

Pero aún más, dicho proceso de acumulación de materia (hay recordar que al inicio estamos hablando solo de hidrógeno y helio) permitió que bajo ciertas condiciones físicas se crearan las primeras estrellas, como comentaremos más adelante. En aquellas zonas donde se creó una gran cantidad de estrellas se formaron las primeras protogalaxias y mediante las interacciones entre ellas acabaron dando lugar a las galaxias que observamos hoy en día y que podemos disfrutar a través de fotografías en los libros y medios de comunicación.

Por último, hay que resaltar que, si no fuera por la existencia de esas pequeñas anisotropías, el universo habría sido perfectamente homogéneo e isótropo. Eso significa que la vida no habría podido producirse, dado que en ningún momento la gravedad habría tenido una semilla inicial para iniciar el proceso apenas descrito, creando las estrellas. Como veremos en este capítulo, es gracias a las estrellas que los elementos necesarios para la vida, y en particular el agua, se hayan podido formar.

### COMPOSICIÓN DEL UNIVERSO<sup>16</sup>

Gracias al estudio detallado de las características de la CMB, ahora sabemos que el universo se puede considerar prácticamente homogéneo e isótropo, es decir, que es prácticamente el mismo en cualquier dirección en la que observemos, aunque luego, cuando nos centramos en alguna región particular del mismo, veamos una gran variedad de estructuras y procesos distintos. Durante los últimos 50 años ha habido un *boom* de experimentos para estudiar, cada vez con mayor precisión, las características de las anisotropías de la CMB. En particular, las más notables serían los dos satélites *WMAP* (NASA),<sup>17</sup> primero, y *Planck* (ESA),<sup>18</sup> después, que proporcionarían una imagen de la CMB en todo el cielo con una precisión cada vez superior (ver Figura 3). También merece la pena mencionar el experimento español QUIJOTE (IAC).<sup>19</sup>

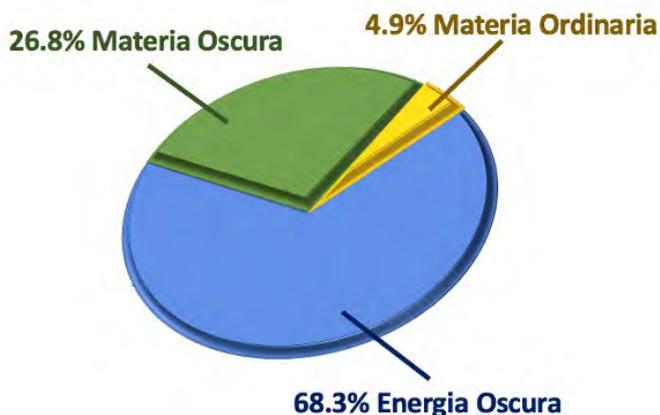


Figura 5. Contenido del universo. Los datos del satélite Planck revelan que su contenido incluye un 4,9% de átomos, los componentes básicos de las estrellas y los planetas. La materia oscura comprende el 26.8% del universo. Esta materia, a diferencia de los átomos, no emite ni absorbe luz. Solo ha sido detectada indirectamente por su gravedad. El 68,3% restante del universo está compuesto por “energía oscura”, que actúa como una especie de antigravedad. Esta energía, distinta de la materia oscura, es responsable de la aceleración actual de la expansión del Universo.

<sup>16</sup> Planck Collaboration *et al.*, 2020.

<sup>17</sup> Bennett *et al.*, 2003.

<sup>18</sup> Planck Collaboration *et al.*, 2011.

<sup>19</sup> Rubiño-Martín *et al.*, 2008.

En particular, mediante el estudio preciso de sus anisotropías, podemos conocer cuál era la composición del universo después de la época de la recombinación. De toda la densidad de energía generada durante la creación del universo, el 12 % estaría en forma de átomos (con porcentajes respecto a su masa: ~75 % hidrógeno, ~25 % helio y solo un ~0,01 % el resto de los elementos ligeramente más pesados). Los fotones explicarían otro 15 %, mientras que los neutrinos todavía contarían con un 10 % adicional. La sorpresa vendría al descubrir que se necesitaría otro 63 % de algún tipo de materia desconocida para explicar las características observadas de las anisotropías de la CMB. A este tipo de materia se le dio el nombre de materia oscura.

Pero las sorpresas no terminarían ahí. Teniendo en cuenta la evolución de cada uno de esos componentes y añadiendo la plétora de observaciones más recientes sobre el universo que nos rodea, la composición actual resultó bastante diferente (ver Figura 5). En la actualidad las observaciones nos confirman que la proporción de hidrógeno y helio libres (en grandes nubes a lo largo del universo) constituiría solo el ~4 %, mientras que el resto de los elementos de la tabla periódica aportarían otro ~0,03 %. La materia condensada en estrellas añadiría otro ~0,5 % y los neutrinos todavía contribuirían con otro ~0,3 %. Es decir, lo que entendemos por el universo observable, al que estamos acostumbrados, con galaxias, estrellas, planetas y nosotros mismos, sería solo un ~5 % respecto del total. Se sigue necesitando de la existencia de aquella materia oscura desconocida para explicar otro ~27 % (la materia en su conjunto constituiría un ~32 % en total), pero el ~68 % restante sería toda una incógnita.

Pero ¿qué es esa materia oscura necesaria para explicar el universo que observamos? Por un lado, resulta que las galaxias de nuestro universo parecen estar logrando una hazaña imposible. Están girando con tal velocidad que la gravedad generada por su materia observable no podría mantenerlas unidas: deberían haberse hecho pedazos hace mucho tiempo. Lo mismo ocurre con las galaxias en cúmulos de galaxias que tienen velocidades demasiado altas como para no escaparse y dejar de formar parte del cúmulo. Así que todo parece indicar que tiene que haber algo más actuando desde el punto de vista de la gravedad que no estamos pudiendo observar. La materia oscura constituiría esa masa adicional que produciría la gravedad extra necesaria para solucionar este tipo de problemas.

Este tipo de observaciones (muy anteriores al descubrimiento de las anisotropías de la CMB), y otra muchas más adicionales, muestran que hay muy

poca materia ordinaria visible en el universo para constituir el  $\sim 32\%$  requerido por las observaciones. Esto significa que hay algún tipo de materia oscura que no sabemos qué es: en realidad, estamos mucho más seguros de lo que no es la materia oscura que de lo que puede ser. A diferencia de la materia normal, la materia oscura no interactúa con la fuerza electromagnética. Esto significa que no absorbe, refleja ni emite luz, por lo que es extremadamente difícil de detectar con nuestros telescopios.

En primer lugar, su naturaleza oscura significa que no puede adoptar la forma de las estrellas o planetas que vemos. En segundo lugar, no tiene la forma de nubes oscuras de materia normal, materia formada por hidrógeno y helio principalmente. Lo sabemos porque somos capaces de detectar estas nubes por su absorción de la radiación que las atraviesa. En tercer lugar, la materia oscura no es antimateria, porque no observamos un exceso de rayos gamma. Los rayos gamma son un tipo de radiación específica, muy energética, que se produce cuando la antimateria se aniquila con la materia. Finalmente, podemos descartar agujeros negros del tamaño de una estrella basándonos en la cantidad de lentes gravitacionales<sup>20</sup> que vemos. Las altas concentraciones de materia desvían la luz que pasa cerca de ellas proveniente de objetos más alejados, pero no vemos suficientes eventos de lente como para sugerir que tales objetos constituyan la contribución requerida de materia oscura del  $\sim 27\%$ .

Sin embargo, todavía habría algunas posibilidades de materia oscura que son viables. La materia bariónica aún podría constituir la materia oscura, si estuviera constituida por enanas marrones o en pequeños agujeros negros primordiales (creados poco después del Big Bang). Pero la opinión más común es que la materia oscura no es bariónica en absoluto, sino que está formada por otras partículas más exóticas, como axiones o WIMPs (partículas masivas de interacción débil).

No nos olvidemos de ese  $\sim 68\%$  restante que nos quedaría por entender. Si pensamos en la expansión del universo tenemos distintas posibilidades. Sería posible tener suficiente materia para que la gravedad acabara por detener la expansión del universo y producir su colapso (*Big Crunch*). O se podría tener tan poca densidad de materia que nunca dejara de expandirse, pero esperaríamos que debido a la gravedad la velocidad de expansión fuera disminuyendo a medida que pasara el tiempo. Sin embargo, tal desaceleración no se ha observado

---

<sup>20</sup> Cuando la luz emitida por galaxias distantes pasa cerca de objetos masivos en el universo, la atracción gravitatoria de estos objetos puede modificar su trayectoria, distorsionando su imagen o incluso duplicándola.

nunca, aunque fuese lo más esperable. Las observaciones del telescopio espacial Hubble (a finales de los años 90) de supernovas<sup>21</sup> muy distantes mostraron que, hace mucho tiempo, el universo en realidad se estaba expandiendo, pero más lentamente de lo que lo hace actualmente. Entonces, la expansión del universo no se ha ralentizado debido a la gravedad, sino que se ha estado acelerando. Este hallazgo fue inesperado y, debido a su importancia, sus descubridores, Saul Perlmutter, Brian Schmidt y Adam G. Riess, recibieron el premio Nobel en el 2011. Su causa aún se desconoce, y simplemente se la ha denominado *energía oscura* por similitud con la materia oscura (aunque habría sido más preciso *energía desconocida*).

Por lo tanto, la energía oscura es casi un completo misterio: solo sabemos cuánta energía oscura hay porque sabemos cómo afecta a la expansión del universo. Resulta que aproximadamente el ~68 % del universo es energía oscura, por lo que es un misterio bastante importante. Pensamos que se distribuye uniformemente por todo el universo, no solo en el espacio sino también en el tiempo; en otras palabras, su efecto no se diluye a medida que el universo se expande. La distribución uniforme significa que la energía oscura no tiene ningún efecto gravitacional local, sino un efecto global en el universo en su conjunto. Esto conduce a una fuerza repulsiva, que tiende a acelerar la expansión del universo.

Entre las posibles explicaciones principales a este nuevo tipo de energía, encontramos la constante cosmológica, ya propuesta por Einstein, que consistiría en la idea de que se puede crear más espacio y que este tiene asociada una cierta energía. Otra posibilidad sería considerar que la energía oscura es un campo o fluido de energía dinámica que permearía todo el espacio y que recibe el nombre de *quintaesencia* (la verdad es que recuerda mucho a la antigua idea del éter). Por último, merece la pena mencionar que esta energía oscura podría estar indicando que la teoría de la gravedad de Einstein no fuera correcta al 100 % a escalas cosmológicas, como ya pasó en su día con las limitaciones de la teoría newtoniana.

En ambos casos, tanto para la materia oscura como para la energía oscura, nuevos y mejores datos son necesarios para seguir estudiando sus características hasta alcanzar la información suficiente para desarrollar una nueva teoría que explique cada una de ellas, o, quién sabe, ambas al mismo tiempo.

---

<sup>21</sup> Etapa final de las estrellas masivas donde expulsan de manera muy violenta sus capas internas.

## LA CREACIÓN Y EVOLUCIÓN DE LAS ESTRELLAS<sup>22</sup>

Hasta este momento en la historia de la evolución del universo, los únicos átomos disponibles serían prácticamente aquellos de hidrógeno y helio (despreciando las trazas de berilio o litio). Pero sabemos que los elementos principales para la vida y la formación del agua serían el carbono y el oxígeno (la molécula de agua está formada por dos átomos de hidrógeno unidos a uno de oxígeno, dando lugar al famoso  $H_2O$  en notación química). Entonces, ¿en qué momento y de qué manera se formó el oxígeno, así como gran parte del resto de los elementos más ligeros de la tabla periódica?

El proceso de creación de átomos más pesados a partir de otros más ligeros se denomina *fusión nuclear*. La diferencia de masa entre los reactivos y los productos se manifiesta como una liberación o absorción de energía. Esta diferencia en masa surge debido a la diferencia en la energía de enlace atómico entre los núcleos antes y después de la reacción. El elemento con la mayor energía de enlace atómico resulta ser el hierro, decreciendo dicha energía tanto para elementos más ligeros como pesados. Esto significa que, debido a sus propiedades físicas, la fusión de núcleos más ligeros que el hierro libera energía, mientras que para la fusión de núcleos más pesados se necesitaría aportar energía extra. Por la misma razón, los elementos más ligeros, como el hidrógeno y el helio, son en general más fusibles.

Sin embargo, para que se inicie el proceso de fusión, es necesario alcanzar unas condiciones de presión o temperaturas lo suficientemente altas como para aportar a los átomos la energía necesaria para contrarrestar la fuerza de Coulomb.<sup>23</sup> Los protones son partículas cargadas positivamente, por lo que se repelen entre sí, pero, una vez que se aproximan lo suficiente, entra en juego la fuerza nuclear fuerte que les permite mantenerse unidos. Estas condiciones se dieron de manera global en el universo durante la época de la nucleosíntesis primigenia. Sin embargo, las condiciones necesarias para que se produzcan las reacciones de fusión nuclear se pueden considerar extremas y, de hecho, solo se conoce que se produzcan en el interior de las estrellas o durante eventos altamente energéticos como las explosiones supernova. Conviene mencionar que los elementos más pesados que el hierro también se forman en las estrellas: no se pueden sintetizar mediante reacciones de fusión nuclear, sino que se crean mediante procesos de captura de neutrones en etapas muy específicas de

---

<sup>22</sup> Maoz, 2016.

<sup>23</sup> La fuerza de Coulomb es una fuerza de repulsión producida cuando dos partículas poseen la misma carga eléctrica.

la evolución de cierto tipo de estrellas (principalmente durante la llamada *rama asintótica de las gigantes rojas*).

Desde el siglo xx, se reconoció que la energía liberada por las reacciones de fusión nuclear podría explicar la longevidad del calor y la luz producidos por las estrellas. La fusión de núcleos en una estrella, a partir de su abundancia inicial de hidrógeno y helio, proporcionaría esa energía y permitiría sintetizar nuevos núcleos más pesados. Ya alrededor de 1920, Arthur Eddington anticipó el descubrimiento del mecanismo de los procesos de fusión nuclear en las estrellas.

Necesitamos, por tanto, entender cómo se crea una estrella, qué reacciones se producen en su interior para dar lugar a la creación de estos nuevos elementos químicos y cómo dichos elementos son capaces de escapar del interior de las estrellas para llegar a formar parte de los planetas. Todos estos aspectos están relacionados con la evolución de las estrellas (ver Figura 6).

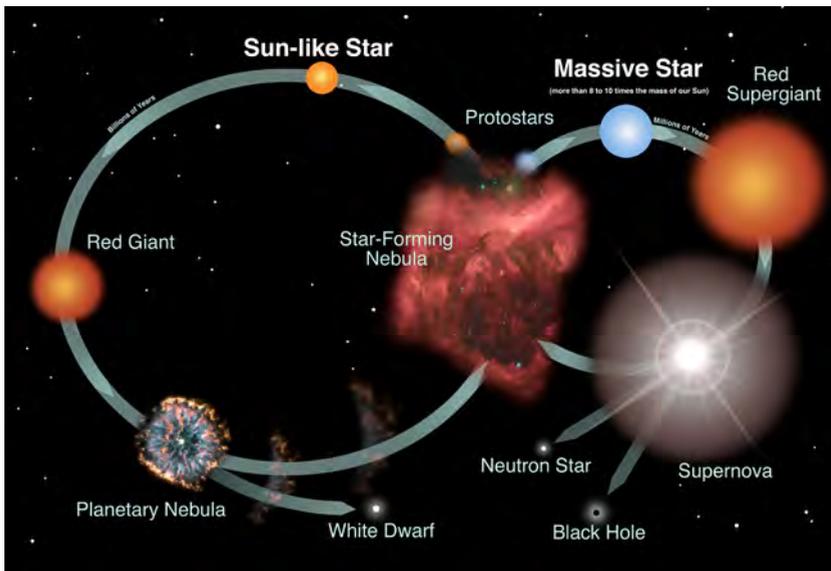


Figura 6. Representación artística de los procesos evolutivos de estrellas con masas similares a la del Sol y de aquellas con masas superiores a 8-10 veces la del Sol. Aunque la duración temporal de estos ciclos es muy distinta, en ambos casos, las capas más internas de las estrellas vienen expulsadas al medio intergaláctico y pueden ser utilizadas para la formación de nuevas estrellas. (NASA).

Las estrellas no son inmutables, sino que sufren una evolución continua desde su creación. El proceso del nacimiento de una estrella comienza a partir de una nube de gas formada principalmente por átomos o moléculas de hidrógeno y helio que se encuentran inicialmente en aquellas regiones del espacio donde las anisotropías de la CMB permitieron a la gravedad acumular cada vez mayor cantidad de materia. Como dichas nubes no son perfectamente homogéneas, habrá zonas en su interior donde se tenga una mayor densidad de materia. Así que, de nuevo, la gravedad favorecerá la acumulación de mayor cantidad de materia en esas regiones y así el proceso se retroalimentará concentrando cada vez más materia alrededor de esos puntos. En los centros de esas regiones, como no hay todavía ningún fenómeno físico que contrarreste la atracción de la gravedad, al acumularse cada vez más masa, aumenta la presión y por lo tanto también la temperatura. Cuando se alcanzan temperaturas de unos 14 millones de grados centígrados, los átomos de hidrógeno adquieren la energía suficiente como para iniciar las reacciones de fusión, produciendo átomos de helio. Como ya se explicó, estas reacciones liberan energía en forma de fotones. La presión de esos fotones que intentan escapar se vuelve lo suficientemente alta como para contrarrestar el efecto de la gravedad, evitando el colapso posterior de la estrella. Este proceso constituye el nacimiento de una estrella y, a partir de ese momento, la estrella se estabiliza y empieza a brillar.

La mayor parte de la vida de una estrella transcurre en esta etapa, donde simplemente continúa el proceso de fusión en sus capas más internas, quemando hidrógeno para producir helio, que se irá acumulando en su núcleo. La duración de esta etapa depende de la masa inicial de la estrella siendo mucho más corta en el caso de estrellas más masivas. Para estrellas parecidas al Sol, la duración es de varios miles de millones de años.

Las etapas finales de una estrella comenzarían a partir del momento en que el hidrógeno se agota en su centro. De manera muy simplificada, cuando se agota el combustible primario que está produciendo las reacciones termonucleares, hasta el momento el hidrógeno, desaparece al mismo tiempo la fuente de presión que evita el colapso gravitatorio de la estrella y su núcleo se contrae, aumentando la temperatura. Si la temperatura del núcleo alcanza valores lo suficientemente altos, se inicia el proceso de fusión del helio y se crea una capa a su alrededor de hidrógeno que sigue fusionándose. Dependiendo de la masa de la estrella, que al final es la que marca la fuerza de la gravedad, este proceso sigue repitiéndose, produciendo capas con elementos cada vez más pesados en el núcleo de la estrella. Para estrellas con masas similares a la de nuestro Sol, el

proceso se detiene aproximadamente después de que se formen el carbono y el oxígeno. Pero en estrellas más masivas, que adquieren una forma de capas de cebolla, el proceso continúa hasta formar el elemento más estable, que es el hierro.

Por lo tanto, hemos visto que el carbono y el oxígeno se forman principalmente en el interior de las estrellas. Pero ¿cómo estos elementos abandonan las capas más internas de las estrellas y vienen expulsados al medio interestelar para poder ser reciclados y utilizados en la formación de los planetas? Los procesos necesarios para que esto suceda están relacionados con las etapas finales de la evolución de las estrellas.

Las etapas finales de la evolución de las estrellas dependen principalmente de nuevo de la masa inicial. Para estrellas con masas similares a la de nuestro Sol, la capa de hidrógeno que rodeaba al núcleo de helio, al encenderse, proporciona una nueva fuente de energía que calienta las capas intermedias de la estrella, aumentando la presión térmica. Esto provoca que toda la envoltura exterior de la estrella se expanda y, por lo tanto, la temperatura de la superficie que vemos disminuye. De esta forma, la estrella adquiere un color rojizo, lo que hace que sea denominada *gigante roja*. Pero la expansión de la envoltura exterior cambia la opacidad de la estrella: se vuelve mucho más fácil para los fotones producidos por la reacción de fusión nuclear escapar del núcleo. Este tipo de radiación recibe el nombre de *viento estelar* y la presión que ejerce acaba expulsando gran parte de la masa de la estrella, entre un 50 y un 70 % de su masa total. Parte de toda esa masa expulsada estará compuesta por los nuevos elementos creados en su interior. De esta manera el carbono y el oxígeno acaban formando parte del medio interestelar en una proporción que dependerá de la mayor o menor actividad de formación estelar en dicha zona del espacio.

En cambio, para estrellas con masas superiores a 8-10 veces la masa de nuestro Sol, las reacciones termonucleares en las distintas capas del interior no producen la suficiente energía para contrarrestar el colapso de toda la masa de la estrella. Esto favorece que en el núcleo se alcancen cada vez mayores presiones y, por lo tanto, temperaturas que permiten la creación de elementos cada vez más pesados, hasta llegar a la formación del hierro. El hierro tiene la característica física de que es muy estable, lo que significa que hacen falta temperaturas muy superiores a las producidas en el interior de las estrellas para conseguir su fusión con otros elementos más ligeros. Este hecho hace que, de repente, se detengan las reacciones de fusión nuclear en la parte más central de

la estrella. Sin ese aporte adicional de energía, el colapso del resto de la estrella se amplifica, lo que produce un aumento increíble en la presión que sufre la materia en el núcleo de la estrella. La materia normal, al ser sometida a esas presiones extremas, sufre una transformación que consiste en que todos los electrones y los protones que formaban parte de los átomos se combinan para convertirse en neutrones, lo que pasamos a denominar una *estrella de neutrones*. Llegados a ese punto, en una primera instancia, las fuerzas nucleares repulsivas son capaces de frenar el colapso del núcleo. Pero, como las capas exteriores de la estrella siguen colapsando, se produce un rebote. Y como las capas más internas están formadas por elementos más pesados, ese rebote causa que cada vez se transfiera más energía hacia las capas más externas. Es lo que denominamos una *explosión supernova*.

Por un lado, la cantidad de energía liberada en este tipo de fenómenos es tal que se llegan a alcanzar temperaturas mucho más altas de las obtenidas en el núcleo de las estrellas. Estas temperaturas extremas permiten que se produzcan de nuevo reacciones de fusión nuclear y de captura de neutrones, cuyo resultado es la creación de elementos mucho más pesados que el hierro. Es decir, aportan prácticamente el resto de los elementos de la tabla periódica tal y como la conocemos. Por el otro, dicha energía liberada expulsa el resto de las capas que rodean la ya formada estrella de neutrones (el antiguo núcleo de la estrella masiva). Pero, al contrario que en el caso de las estrellas menos masivas, ese material no se queda en los alrededores de la propia estrella, sino que puede llegar a regiones muy alejadas dentro de la misma galaxia o incluso ser expulsada fuera de ella.

Pero, si la cantidad de masa inicial de la estrella es lo suficientemente alta, ni siquiera el colapso viene contrarrestado por la formación de una estrella de neutrones. En ese caso, la densidad de materia en el núcleo alcanza cotas tan altas que llega a deformar el espacio-tiempo de tal manera que ni siquiera la luz puede escapar a su atracción gravitatoria. Se ha formado un agujero negro.

Un detalle interesante de estas etapas finales de las estrellas es que, en mayor o menor medida, tanto los vientos estelares de las gigantes rojas como las explosiones supernovas producen ondas de choque que pueden alterar las posibles nubes de materia que hubiera alrededor de dichas estrellas moribundas. Perturbaciones de este tipo, incluso pequeñas, pueden ser suficientes como para iniciar el proceso de colapso gravitatorio de una parte de esas nubes vecinas, lo que acabaría dando lugar a la formación de nuevas estrellas.

En resumen, desde el punto de vista de los elementos necesarios para la vida, como son el carbono y el agua, tanto el primero como el oxígeno son

formados en el interior de las estrellas y solo pasan al medio interestelar tras su muerte. De hecho, las primeras estrellas estaban formadas solamente por hidrógeno y helio, pero fueron las primeras en sintetizar las primeras trazas de los elementos más pesados. Al final de su vida expulsaron al universo esos nuevos elementos, permitiendo que las siguientes generaciones de estrellas, y por ende sus planetas, estuvieran compuestas en parte por ellos. De ahí la famosa afirmación de Carl Sagan de que «somos polvo de estrellas».

### FORMACIÓN DEL AGUA EN EL UNIVERSO

Mediante el estudio de la química de las nubes moleculares en el universo temprano conocemos la manera en la que las moléculas del agua se crearon. De hecho, se cree que la mitad del agua del sistema solar es anterior al Sol.<sup>24</sup> Es intrigante que el agua se haya formado tan temprano en el universo, porque es una molécula sorprendentemente compleja. Para que esto suceda, deben existir condiciones particulares y bastante específicas de densidad molecular y temperatura.

Primeramente, la molécula de agua está compuesta de un átomo de oxígeno y dos de hidrógeno (ver Figura 7). Así que necesitamos la presencia del oxígeno y eso significa, como hemos visto, que algunas estrellas hayan alcanzado sus etapas finales para producirlo y expulsarlo al medio interestelar. Además, se necesitan unas condiciones bastante específicas para la formación estable de moléculas de agua. Si las temperaturas son lo suficientemente altas, los choques entre partículas son lo suficientemente energéticos como para romper las moléculas de agua recién formadas (por ejemplo, en las cercanías de una estrella). En cambio, si son demasiado bajas, las reacciones de formación no tendrán la suficiente energía para producirse. Las temperaturas del gas deben ser superiores a  $\sim 100$  °C para estimular dichas reacciones. Estas temperaturas eran más habituales en el pasado debido al menor tamaño del universo y la propia radiación de fondo que lo mantenía a una cierta temperatura. Por último, si la densidad de moléculas es demasiado baja, la radiación ultravioleta de las estrellas cercanas sería también capaz de romper las moléculas y, al mismo tiempo, la probabilidad de los choques moleculares será demasiado baja como para producir nuevas moléculas.

---

<sup>24</sup> Maoz, 2016 y Cleaves *et al.*, 2014.

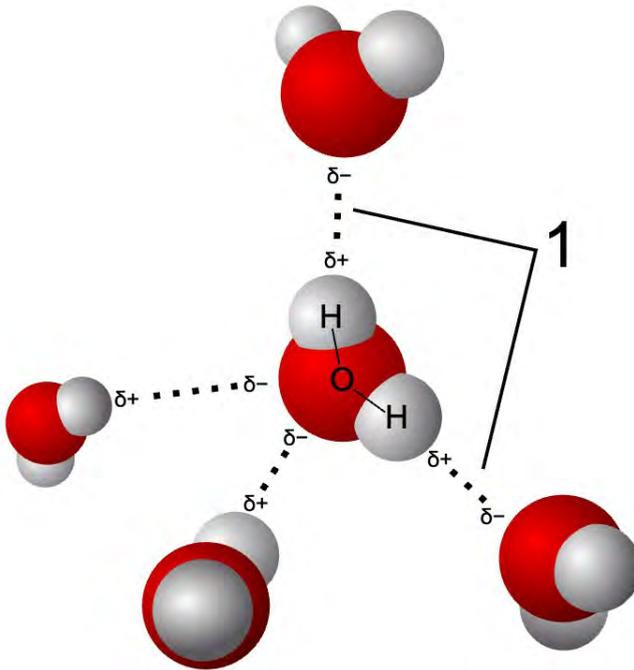


Figura 7. Representación simplificada de varias moléculas de agua, compuestas por dos átomos de Hidrógeno y uno de Oxígeno en el centro. Debido a que la posición de los átomos de Hidrógeno no es perfectamente simétrica se producen unas pequeñas diferencia de carga eléctrica ( $\delta^+$  y  $\delta^-$ ) que permiten producir enlaces moleculares (indicado con un 1) con relativa facilidad. (wikipedia).

Con todo ello, las moléculas de agua solo se crearán y persistirán en periodos y áreas del universo en las que estas propiedades sean las adecuadas. En general, las grandes nubes moleculares primigenias se podrían considerar las fábricas ideales para la creación del agua. Obviamente, dentro de una misma nube habrá zonas donde las condiciones sean más favorables que en otras, así que la abundancia del agua podrá variar mucho de una zona a otra. Es decir, que estrellas formadas en distintas zonas de la misma nube podrán contener abundancias de agua distintas y, por lo tanto, podría darse el caso de sistemas extrasolares con abundancias muy pequeñas de agua en comparación con la presente en el sistema solar (como discutiremos posteriormente).

Podemos hablar de dos procesos principales para la formación de la molécula de agua: con o sin la presencia de polvo cósmico. El polvo cósmico consiste en pequeñas partículas de material sólido que flotan en el espacio entre las estrellas. No es el mismo polvo que encontramos en nuestras casas (compuesto mayormente por partículas orgánicas de origen terrestre), sino que es más parecido al hollín, con pequeñas partículas que varían desde colecciones de unas pocas moléculas hasta granos de 0,1 mm de tamaño. Dado que el polvo cósmico también se forma en las etapas finales de las estrellas, en el universo temprano habría habido poco polvo. Sin polvo, el agua se formaría a través de la reacción del hidróxilo (OH), formado primeramente de una manera más sencilla, con otro hidrógeno adicional.

Sin embargo, la formación de agua es mucho más efectiva en presencia del polvo cósmico. De hecho, gran parte del agua que se forma en el cosmos actual se crea por reacciones en los granos de polvo cósmico. Existen evidencias que demuestran que el agua se formaría en pequeñas burbujas de los granos de polvo cósmico que flotan en el espacio cuando el viento solar los irradia, dañándolos. Los granos de polvo contienen mucho silicato, un mineral compuesto de silicio y oxígeno. El viento solar lanza principalmente nubes de iones de hidrógeno al espacio. Cuando el viento solar golpea los granos de polvo cósmicos, el daño resultante libera átomos de oxígeno, que luego son libres de reaccionar con el hidrógeno del viento solar, lo que puede resultar en la formación de pequeñas bolsas de agua.

Por lo tanto, no solo existían ya grandes cantidades de agua en la nube protosolar que dio lugar al Sol, sino que, durante su formación e incluso actualmente, se ha continuado produciendo mayor cantidad de agua gracias a la presencia del polvo cósmico. De forma natural, parte de esa agua pasará a formar parte de los planetas y sus atmósferas cuando se formen.

## **FORMACIÓN DEL SOL Y DEL SISTEMA SOLAR<sup>25</sup>**

Antes de poder entender cómo esa agua presente en el espacio ha podido acabar en el planeta Tierra, hay que echar un vistazo al proceso de formación del propio Sol, y con él, del Sistema Solar. Hace 4600 millones de años, en esta región de la galaxia en la que habitamos, existía una gran nube de gas y polvo, o nebulosa protosolar. La presencia de polvo es un detalle importante, pues

---

<sup>25</sup> Carroll y Ostlie, 2017.

significa que dicha nebulosa no estaba formada exclusivamente por hidrógeno y helio, sino que ya contenía restos de elementos más pesados que podían formar moléculas, entre ellas el agua, producto de ciclos de vidas estelares precedentes.

Como en el caso de la formación estelar en general, una pequeña parte de esa nube de materia empezó a colapsarse, dando lugar al proceso de creación de nuestra estrella. Cuando en su núcleo se alcanzaron las temperaturas suficientes, se inició el proceso de fusión nuclear y a partir de ese momento el Sol comenzó a brillar. De igual manera que le sucede a una patinadora sobre hielo que empieza a girar sobre sí misma más rápido al juntar los brazos, a medida que esa materia se colapsa, se produce un aumento de su velocidad de rotación, que se transmite a la estrella al formarse. La rotación del Sol es fácilmente observable a través del seguimiento de las manchas solares y su movimiento. Pero este hecho también se aplica a toda la materia restante que no pasa a formar parte de la propia estrella. Y debido a dicha rotación, esa materia acaba creando un *disco protoplanetario* que podemos paragonar con los famosos discos del planeta Saturno.

De toda la materia que componía esa nebulosa protosolar, el 99,8 % pasó a formar parte del Sol. Es decir, solo el otro 0,2 % pasó a constituir el disco protoplanetario. Como dicho disco no era perfectamente homogéneo, enseguida se empezaron a crear pequeñas inestabilidades que aprovecharon la fuerza de la gravedad para atraer más materia hacia ellas. Al ir produciéndose choques entre ese material, algunas órbitas empezaron a acumular mayor cantidad de material para acabar formando los primeros planetas. De hecho, la definición de un planeta por la Sociedad Astronómica Internacional afirma que tiene que orbitar alrededor de una estrella (por eso la Luna, por ejemplo, es un satélite), tener la suficiente masa como para adquirir una forma esférica (autogravitante) y haber limpiado otros objetos de su propia órbita. Esta última característica fue la que causó que Plutón dejara de considerarse oficialmente un planeta (tiene un compañero, Caronte, casi de su mismo tamaño).

Por lo tanto, los planetas se han formado a partir de los restos del material que dio lugar a la formación de su propia estrella. Así que, en principio, deberían tener una composición química muy parecida. Sin embargo, mientras que el Sol tiene una composición muy cercana a la primordial (un 70 % de hidrógeno, un 28 % de helio y un 2 % de elementos más pesados), hay planetas como la Tierra con composiciones completamente distintas. Este hecho se

debe a las diferentes historias de formación de los planetas y, en particular, a su tamaño. Los ocho planetas que orbitan alrededor del Sol podemos dividirlos en dos grupos claramente diferenciados en función de sus características principales: los planetas gigantes gaseosos, que serían los más masivos y con órbitas más distantes, y los planetas rocosos de menor tamaño y órbitas interiores más cercanas al Sol. De los primeros tendríamos como claros ejemplos a Júpiter y Saturno, mientras que entre los planetas rocosos tenemos el caso de la Tierra o Marte (ver Figura 8).

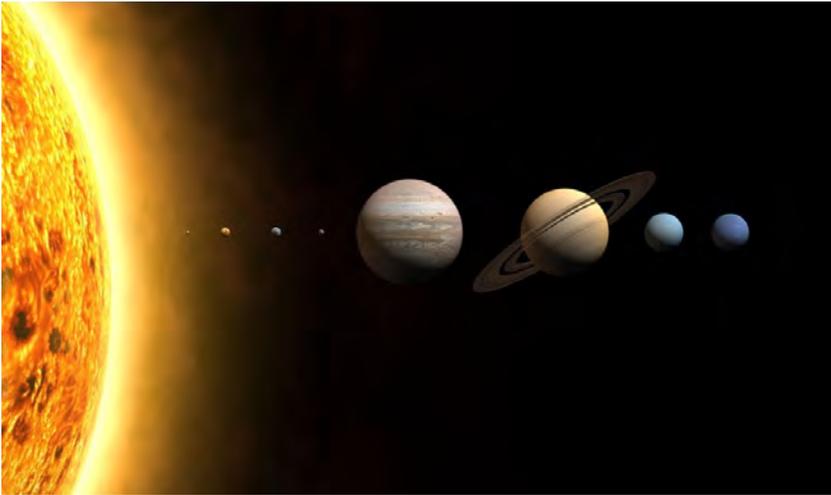


Figura 8. Representación del Sol y los planetas que componen el Sistema Solar. Los tamaños relativos de los planetas son realistas, de manera que se pueden comparar visualmente sus tamaños. Sin embargo ni el tamaño del Sol ni las distancias entre los planetas están a escala. (Wikipedia).

Se considera que el núcleo de los planetas gaseosos tiene una composición bastante parecida a los planetas rocosos. Es decir, podríamos hablar de que lo que diferencia principalmente a los planetas es el tamaño y composición de las capas externas que rodean ese núcleo y que denominaremos de manera muy generalista *atmósfera*. En el caso de los planetas gaseosos, esa atmósfera domina en tamaño y cantidad de materia respecto al núcleo, de ahí su nomenclatura. Resulta que la composición de dichos planetas coincide bastante bien con la composición solar, como era esperable. Sin embargo, en el caso de los planetas rocosos, la atmósfera se considera algo residual o incluso casi inexistente, como

en el caso de Mercurio. En estos casos la presencia de hidrógeno y helio en sus atmósferas es casi nula.

Para entender esta marcada dicotomía, debemos tener en cuenta dos fenómenos físicos básicos: por un lado, la velocidad de las moléculas que componen un gas aumenta con la temperatura, y, por otro, la atracción gravitatoria que ejerza el planeta y que pueda retener dichas moléculas. Los planetas con órbitas más cercanas al Sol reciben mayor radiación y tienen temperaturas más altas, por lo que las moléculas de sus atmósferas tienen una mayor velocidad y, por lo tanto, mayor probabilidad de escapar de la atracción gravitatoria del propio planeta. Si además sumamos el hecho de que son planetas más pequeños, producen una atracción gravitatoria más débil, entendemos que, en realidad, los planetas rocosos han perdido sus capas más externas después de su formación en mayor o menor grado. Por esta razón la Tierra y Venus todavía conservan una atmósfera relativamente importante, mientras que planetas más pequeños, como Mercurio y Marte, la han perdido casi completamente.

Como suele suceder en el universo, el proceso siguió repitiéndose a escalas más pequeñas: los restos del material de la formación de los planetas dieron lugar a la formación de objetos de menor tamaño, como Plutón y Caronte, que son planetas enanos, los satélites alrededor de los planetas, los cometas, los cinturones de asteroides, etc.

De esta manera, se define el Sistema Solar como el Sol y toda la materia que orbita de manera estable a su alrededor. Es decir, principalmente los 8 planetas, con sus respectivos satélites, el cinturón de Kuiper (una especie de cinturón de asteroides más allá de la órbita de Plutón, pero donde seguimos descubriendo planetas enanos como Eris), los cometas y una miríada de asteroides.

### **ABUNDANCIA DEL AGUA EN EL SISTEMA SOLAR**

Teniendo en cuenta la presencia de agua en la nebulosa protosolar, su posterior producción debido a la interacción entre el polvo y el viento solar y el proceso de formación del Sistema Solar y sus planetas, es de esperar que el agua, y en particular el agua líquida, no sea algo único del planeta Tierra. Hasta hace pocos años esta era una incógnita, pero ahora la ciencia puede confirmar que realmente es así. De hecho, se piensa que solo la cantidad de agua líquida confirmada en el Sistema Solar podría ser 50 veces superior a

la del agua de la superficie terrestre. Pero, aunque se tienen certezas de la existencia de otros cuerpos celestes que tienen agua líquida, la Tierra continúa siendo el único entre ellos que mantiene una presencia estable de agua líquida en su superficie.

Podemos hacer un repaso de las evidencias científicas que tenemos de la presencia de agua en los distintos cuerpos del Sistema Solar. Aunque Mercurio es el planeta que orbita más cerca del Sol, Venus tiene la superficie más caliente de todos los planetas del Sistema Solar, con una temperatura media de 464 °C. Se piensa que pudo tener océanos de agua líquida similares a los de la Tierra en el pasado, pero, debido a la alta densidad de su atmósfera (compuesta en un 96 % por dióxido de carbono), el efecto invernadero aumentó tanto las temperaturas que acabó seguramente evaporando toda esa agua. Posteriormente el vapor de agua se ha ido descomponiendo debido a la radiación solar (Venus no tiene un campo magnético que lo proteja de la radiación solar) y el hidrógeno ha ido abandonando la atmósfera. Actualmente la cantidad de vapor de agua presente en la atmósfera de Venus es de solo 20 partículas por millón.<sup>26</sup>

El agua líquida no puede persistir en la superficie lunar. Cuando se expusiera a la radiación solar, el agua se descompondría rápidamente y se perdería en el espacio. Sin embargo, cantidades de agua congelada podrían existir en cráteres fríos, permanentemente en la sombra, en cualquiera de los polos de la Luna. El análisis de los hallazgos del Moon Mineralogy Mapper reveló en agosto de 2018 por primera vez evidencia definitiva de agua congelada en la superficie lunar (ver Figura 9).<sup>27</sup> Los depósitos de hielo se encontraron en los polos Norte y Sur, aunque es más abundante en el Sur, donde el agua queda atrapada en cráteres y hendiduras permanentemente en sombra, lo que le permite persistir como hielo en la superficie al estar protegida del Sol.

El agua en Marte existe hoy casi exclusivamente como hielo, con una pequeña cantidad presente en la atmósfera como vapor. Tiene dos casquetes polares permanentes compuestos principalmente por agua congelada (~70 %).<sup>28</sup> La baja presión atmosférica (0,6 % de la terrestre) o las bajas temperaturas medias (-63 °C), provocan una rápida evaporación o congelación de la potencial agua líquida. Es posible que una pequeña cantidad de agua líquida pueda sobrevivir transitoriamente en la superficie marciana, pero solo bajo ciertas

---

<sup>26</sup> Bertaux *et al.*, 2007.

<sup>27</sup> Pieters *et al.*, 2009.

<sup>28</sup> Carr, 1996.

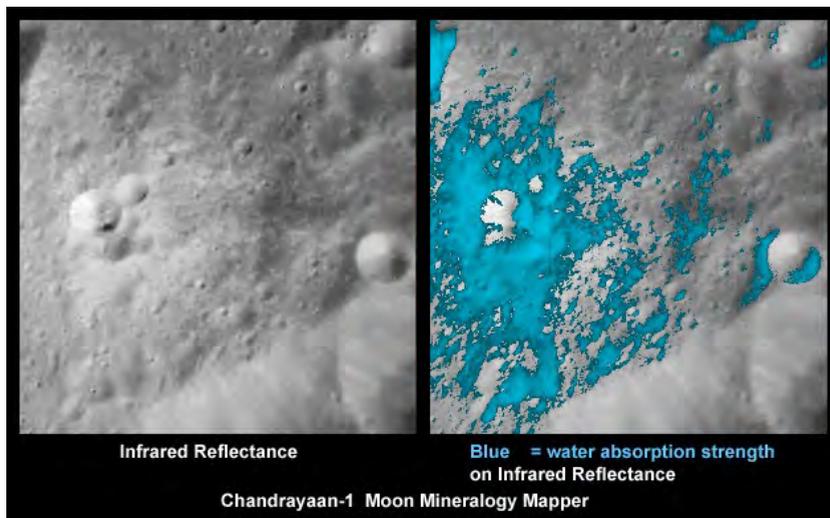


Figura 9: Imágenes tomadas por el Moon Mineralogy Mapper de la NASA en la nave espacial Chandrayaan-1 de la Organización de Investigación Espacial de la India que muestran un cráter lunar muy joven en el lado de la luna que no apunta a la Tierra. A la izquierda hay una imagen que muestra el brillo en longitudes de onda infrarrojas más cortas. A la derecha, se muestra la distribución de minerales ricos en agua (azul claro) alrededor de un pequeño cráter. Se encontró que tanto los materiales ricos en agua como los ricos en hidroxilo (HO) estaban asociados con el material expulsado del cráter.  
(Créditos: ISRO/NASA/JPL-Caltech/USGS/Brown Univ.)

condiciones muy específicas. En el 2018, científicos de la Agencia Espacial Italiana informaron de la detección de un lago subglacial en Marte, a 1,5 kilómetros por debajo de la capa de hielo del polo Sur y con una extensión de 20 kilómetros horizontalmente, la primera evidencia de agua líquida estable en el planeta.<sup>29</sup>

Para otros cuerpos celestes, como Ceres o Plutón (planetas enanos), Europa, Ganimedes (satélites de Júpiter) o Encelado (satélite de Saturno), se van acumulando evidencias científicas que indicarían la existencia de una capa de agua líquida por debajo de una corteza de hielo. En el caso de

<sup>29</sup> Orosei *et al.*, 2018.

Encelado, se han llegado a observar géiseres expulsando vapor de agua al espacio, la contraparte de los volcanes terrestres para estos mundos acuáticos (ver Figura 10).<sup>30</sup>

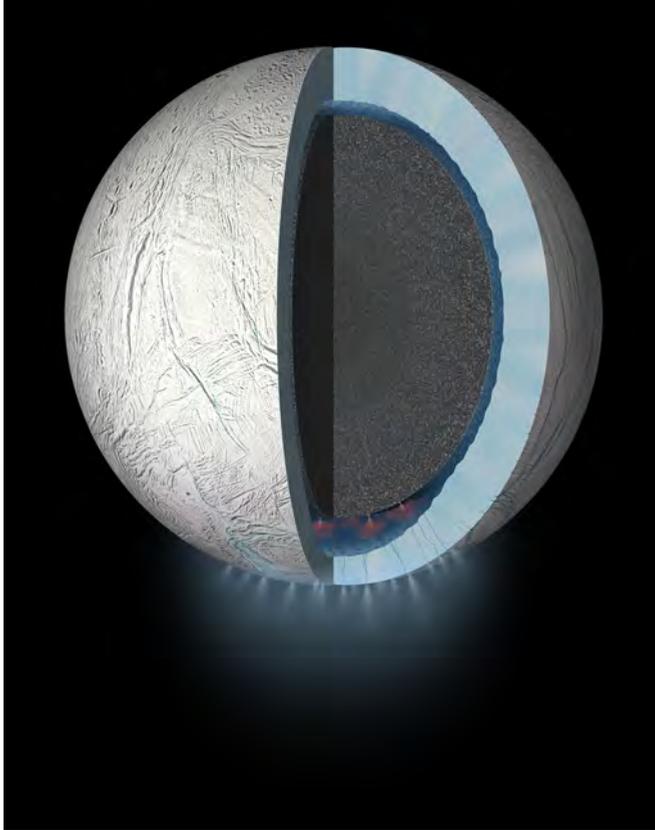


Figura 10. Representación artística que muestra una vista en corte del interior de Encelado, el satélite de Saturno. La nave espacial Cassini de la NASA descubrió que el satélite tiene un océano global y probablemente actividad hidrotermal. Una columna de partículas de hielo, vapor de agua y moléculas orgánicas brota de las fracturas en la región del polo sur del satélite. (NASA).

---

<sup>30</sup> Hansen *et al.*, 2006.

Incluso se piensa que planetas como Urano y Neptuno puedan tener por debajo de las capas gaseosas más externas una capa de agua que correspondería a una parte importante de su masa. De ahí que se les empiece a denominar *gigantes de hielo*.<sup>31</sup>

Por último, no podemos olvidar los cuerpos menores que también forman el Sistema Solar. Nos referimos a los cometas y asteroides.<sup>32</sup> La distinción entre ambos tipos se debe principalmente a su composición, pero resultados recientes están difuminando cada vez más esa diferenciación. Mientras que los asteroides están compuestos principalmente de minerales y rocas, los cometas están compuestos principalmente de polvo y hielo. Además, los asteroides se formaron más cerca del Sol, impidiendo el desarrollo de hielo cometario debido a la evaporación del agua. Existen cada vez más evidencias que indican la presencia de hielo en las superficies de algunos asteroides, como el 24 Themis, o incluso emisiones de vapor de agua, lo que supondría otra vez la existencia de una reserva de hielo debajo de la superficie (ver Figura 11).



Figura 11. Este montaje de 18 imágenes muestra la evaporación de distintos tipos de hielos (entre ellos el agua) del cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko desde muchos ángulos diferentes como se vio entre el 31 de enero (arriba a la izquierda) y el 25 de marzo (abajo a la derecha), cuando la nave espacial Rosetta (ESA) estaba a distancias de unos 30 a 100 km del cometa. Al mismo tiempo, el cometa estaba a distancias de entre 363 millones y 300 millones de kilómetros del Sol. (ESA/Rosetta/NAVCAM).

<sup>31</sup> Helled, Nettelmann y Guillot, 2020.

<sup>32</sup> Snodgrass *et al.*, 2017.

Por lo tanto, podemos concluir que la abundancia del agua en el Sistema Solar es bastante alta. Sin embargo, encontrarla en su estado líquido se vuelve mucho más improbable, sobre todo si nos centramos en la superficie de los cuerpos celestes. Desde este punto de vista, la Tierra sigue siendo un caso particular que merece ser discutido en mayor detalle.

### FORMACIÓN DE LA TIERRA Y ORIGEN DEL AGUA TERRESTRE<sup>33</sup>

Como ya comentamos anteriormente, la Tierra se formó a partir del disco protoplanetario que estaba compuesto por el material que no acabó formando parte del Sol. En ciertas órbitas, fragmentos sucesivamente más grandes de polvo y rocas se agruparon para acabar formando los planetas. La Tierra se formó de esta manera hace unos 4540 millones de años y se completó en gran parte en 10-20 millones de años.

La proto-Tierra creció por acreción hasta que su interior estuvo lo suficientemente caliente para derretir los metales más pesados, como el hierro y el níquel, que acabaron congregándose en el núcleo debido a su mayor densidad, durante un periodo geológicamente breve. Esta llamada *diferenciación del hierro* resultó en la separación de un manto primitivo y un núcleo (metálico) solo 10 millones de años después de que la Tierra comenzara a formarse, produciendo la conocida estructura en capas de la Tierra y estableciendo la formación del campo magnético terrestre. La creación de dicho campo magnético permitió bloquear la mayor parte de la radiación ionizante, que habría sido letal para creación y evolución de la vida.

Inicialmente la Tierra se habría creado con una atmósfera similar a la de los planetas gaseosos. Sin embargo, una combinación de la intensidad de su gravedad, del viento solar y el calor de la Tierra habría expulsado esta atmósfera primigenia. Con respecto al agua, al igual que en el polvo cósmico (o los cometas y asteroides), las rocas del manto también contienen mucho oxígeno unido a minerales, que puede liberarse en determinadas circunstancias y combinarse con el hidrógeno para formar agua.<sup>34</sup> Además, los geólogos revelaron que algunos materiales rocosos extraídos del manto de la Tierra contienen pequeños rastros de agua, como se explicará en más detalle en el siguiente capítulo. Es posible que ese material nunca se haya mezclado con la materia de la superficie y podría representar el agua primitiva de la Tierra.

---

<sup>33</sup> Christian, 2016.

<sup>34</sup> Peslier *et al.*, 2017.

La teoría más comúnmente aceptada sobre la formación de la Luna y sus características propone que esta se originó después de que un cuerpo del tamaño de Marte golpeará la proto-Tierra de manera indirecta.<sup>35</sup> Este objeto celeste recibe el nombre de «Theia», ya que en la mitología griega se corresponde con la madre de Selene, la diosa de la Luna. Después de este impacto, la Tierra habría liberado gran cantidad de gases volátiles, entre ellos vapor de agua, a partir de su manto debido a las altas temperaturas alcanzadas. Posteriormente, se continuó añadiendo mayor cantidad de estos gases a causa del impacto de meteoritos.

Por un lado, la mayor parte de la materia que se ve atraída por la Tierra sufre una desintegración o vaporización causada por la fricción de la propia atmósfera. Sin embargo, se ha descubierto que las partículas de polvo cósmico que contienen minerales ricos en agua sobreviven a la entrada atmosférica más fácilmente que el polvo cósmico libre de agua. La razón se debe a que este tipo de polvo contiene minerales arcillosos o lodo, que tiene agua atrapada en ellos. Durante el descenso a través de la atmósfera terrestre, el polvo se convierte en pequeñas gotas de roca fundida, conocida como magma, y el agua en su interior hierve. Esto convierte el polvo en una burbuja de espuma de magma, que se expande y se vuelve más liviana y fría, actuando a modo de paracaídas.<sup>36</sup>

Por otro lado, los meteoritos que sobreviven acaban impactando en la superficie terrestre, donde se vaporizan casi completamente debido al impacto. Por último, durante las primeras etapas de la evolución de la Tierra, la corteza terrestre era todavía lo suficientemente débil para que los impactos, mucho más frecuentes durante dicho periodo, acabasen produciendo, a su vez, un aumento de la actividad volcánica. Dicha actividad liberaría aún más gases y vapor de agua, completando una segunda atmósfera rica en gases de efecto invernadero.

La presencia de la Luna supuso además un efecto de protección extra, ya que muchos asteroides con ruta de colisión venían desviados o simplemente acababan impactando en ella en vez de en la Tierra. En consecuencia, al disminuir el número y la intensidad de los impactos de meteoritos y a medida que la Tierra se enfrió, se pudieron formar tanto las nubes como una corteza sólida. Las nubes produjeron lluvia que pudo empezar a acumularse sobre la superficie sólida dando lugar a los primeros océanos. Las evidencias recientes sugieren que los océanos pueden haber comenzado a formarse tan pronto como 140 millones de años después de la formación de la Tierra. El problema era que el

---

<sup>35</sup> Canup y Asphaug, 2001.

<sup>36</sup> Genge, 2017.

Sol se acababa también de formar y emitía solo el 70 % de su energía actual. Con esa cantidad de energía, la Tierra se habría enfriado rápidamente a temperaturas bajo cero, si no hubiera sido por el efecto invernadero producido por su atmósfera. Es decir, el fuerte efecto invernadero que producía la nueva atmósfera evitó que se congelaran los océanos, lo que favoreció la creación de la vida.

Resulta irónico que las colisiones con meteoritos de gran tamaño que podrían significar la muerte de la humanidad puedan ser la razón por la que estamos vivos hoy. Las colisiones de asteroides y cometas pueden haber aportado al planeta una gran parte de los gases de efecto invernadero, del agua en la atmósfera y la superficie terrestre y otras moléculas a base de carbono que permitieron que la vida evolucionara. De hecho, diversos estudios sobre meteoritos encontrados en la Tierra han detectado la presencia de aminoácidos y otras moléculas orgánicas relacionadas, sugiriendo que procesos químicos que tienen lugar en los asteroides pueden producir algunos de los bioingredientes esenciales para la vida. Estos resultados apoyarían la noción de panspermia, es decir, que el origen de los elementos necesarios para la vida terrestre estaría en el espacio.

### **¿POR QUÉ LA TIERRA ES EL ÚNICO PLANETA DEL SISTEMA SOLAR QUE TIENE AGUA LÍQUIDA EN SU SUPERFICIE?<sup>37</sup>**

Como hemos visto anteriormente, planetas como Marte o Venus pudieron llegar a tener agua líquida en su superficie, pero se evaporó y fueron perdiendo ese vapor de agua poco a poco. Así que parece que la única manera de retener el agua es manteniéndola en forma de hielo o guardada en el subsuelo. Esta es la manera habitual en la que encontramos el agua en el resto de los cuerpos celestes del Sistema Solar.

Entonces, ¿por qué la Tierra es especial desde este punto de vista? Habría que tener en cuenta muchos factores para responder a esta pregunta, pero los factores principales serían cuatro: su órbita, su tamaño, tener un campo magnético y la presencia de vida. La primera característica necesaria para la presencia de agua líquida en la superficie de un planeta es la temperatura que tiene esa superficie. Dicha temperatura no puede estar bajo cero porque entonces toda el agua estaría congelada y tampoco puede alcanzar temperaturas por encima de los 100 °C porque entonces se evaporaría. Esta característica nos marca una

---

<sup>37</sup> Hartmann, 2015.

zona u órbita de habitabilidad, es decir, una distancia óptima con respecto a la estrella. Obviamente, dicha zona de habitabilidad dependerá del tipo de estrella que estemos considerando: en estrellas débiles, la zona de habitabilidad será mucho más cercana para alcanzar las temperaturas superiores a  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , mientras que para estrellas grandes y brillantes la zona estará más alejada para evitar que las temperaturas superen los  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . En el caso del Sol, la zona de habitabilidad estaría entre la órbita de Venus y a mitad de camino entre la órbita terrestre y la de Marte.

Pero otro factor importante, que está directamente relacionado, es la presencia de una atmósfera que produzca un efecto invernadero que ayude a mantener una temperatura más o menos constante y, a ser posible, con las temperaturas adecuadas para la presencia de agua líquida. Como ya explicamos anteriormente, el poder retener los gases que forman una atmósfera planetaria y, en un primer momento, su composición, depende principalmente de la masa y la atracción gravitatoria del planeta. Los planetas rocosos no son lo suficientemente masivos como para retener las moléculas más ligeras, como el hidrógeno y el helio. Al mismo tiempo, los planetas más pequeños, como Mercurio o Marte, tienen tan poca masa que ni siquiera pueden retener moléculas más grandes, por lo que prácticamente han perdido toda su atmósfera. Por lo tanto, vemos que la masa ideal para retener una atmósfera que no esté dominada por el hidrógeno y el helio es precisamente la masa de la Tierra o Venus.

El hecho de ser capaz de retener una atmósfera, y que esta contenga una proporción relativamente importante de agua, es crucial para que la Tierra mantenga una temperatura estable por encima de  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Si solo tenemos en cuenta la distancia de la Tierra al Sol, la temperatura de la superficie terrestre debería ser de  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Es decir, la presencia de agua líquida en su superficie sería prácticamente imposible, como sucede en Marte. Que se mantengan temperaturas por encima de  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  se debe al efecto invernadero que producen algunos gases presentes en la atmósfera, como son el propio vapor de agua, el dióxido de carbono y el metano. La radiación incidente proveniente del Sol es capaz de calentar la superficie terrestre. Al calentarse la Tierra, a su vez emite calor en forma de radiación infrarroja. Sin la presencia de una atmósfera, toda esa radiación se escaparía al espacio y la Tierra se enfriaría hasta la temperatura que mencionábamos antes. El efecto de la atmósfera es que parte de esa radiación queda retenida por las moléculas de los gases de efecto invernadero y es reemitida de nuevo a la superficie. El efecto neto final es que se consiguen temperaturas más altas y estables en la superficie. En esto consiste el efecto

invernadero. Es parecido a las temperaturas más altas que se producen en los invernaderos (de ahí su nombre) o dentro de los coches en un día soleado. De hecho, gracias al efecto invernadero la temperatura media global está en torno a los 15 °C. Sin embargo, tendemos a asociar el efecto invernadero a algo negativo, pero, como acabamos de describir, es un efecto muy necesario para que las condiciones del planeta sean las que llevamos disfrutando desde hace millones de años, y de manera mucho más estable durante los últimos 10 000 años.

Otra particularidad de la Tierra surge durante su proceso de formación. Debido a que el núcleo terrestre es metálico, se produce un efecto de dinamo que crea un campo magnético a su alrededor. Entre otras muchas ventajas, la principal es que protege a la Tierra de la radiación más energética proveniente del Sol y del espacio interestelar. Sin un campo magnético, como en el caso de Venus o Marte, dicha radiación tiene una probabilidad mucho mayor de romper las moléculas que componen la atmósfera, en particular el agua. Como ya comentamos, la atracción de la gravedad de la Tierra no es suficiente para retener moléculas ligeras como el hidrógeno. Así que, sin la presencia del campo magnético, acabaríamos perdiendo el vapor de agua presente en la atmósfera, como ha sucedido en Venus.

Por último, la presencia de vida en la Tierra ha tenido y tiene un papel muy importante para la composición actual de la atmósfera y la regulación de la temperatura terrestre. Las primeras bacterias y células de los fondos oceánicos empezaron a emitir oxígeno como producto de la fotosíntesis, lo que acabó creando la capa de ozono (tres átomos de oxígeno unidos). La capa de ozono es una barrera adicional ante la radiación ultravioleta del Sol, que es muy dañina para los microorganismos y las cadenas de ADN y, por lo tanto, para la evolución de la vida. Eso permitió que la vida evolucionase y pudiera abandonar los océanos para colonizar la superficie terrestre (plantas y animales).

A su vez, el papel regulador de la temperatura a través de la biosfera se debe al ciclo de emisión-captación del metano y el dióxido de carbono, dos de los gases de efecto invernadero más importantes. Tanto las plantas como los corales, las bacterias del fondo marino, etc., capturan dióxido de carbono a lo largo de su vida y lo mantienen en su estructura (como los árboles o las conchas) y cuando mueren lo acumulan en los fondos marinos o el suelo. Pero si la captura es muy eficiente, como sucedió en épocas tempranas de la evolución de la vida, se reduce la cantidad de dióxido de carbono disponible y, en consecuencia, también se reduce la temperatura media al disminuir el efecto

invernadero. Ante condiciones adversas, la biosfera disminuye su actividad y, por lo tanto, los niveles de dióxido de carbono se pueden restaurar y, con él, la temperatura media. El efecto neto es la autorregulación del clima debido a la acción de la biosfera.



Figura 12. Fotografía de las capas superiores de la atmósfera terrestre con su característico color azulado. La capas inferiores se encuentran completamente cubiertas por distintos tipos de nubes. También se puede observar la silueta de la Luna al fondo. (NASA Earth Observatory).

### EL PAPEL REGULADOR DEL AGUA PARA EL CLIMA TERRESTRE<sup>38</sup>

Como ya hemos visto anteriormente, gracias a la existencia de una atmósfera, y en particular a la presencia de vapor de agua, la temperatura media de la superficie terrestre se mantiene en unos 15 °C. Esas condiciones favorecen la presencia de agua en estado líquido en la superficie del planeta, pero, al mismo tiempo, la propia presencia del agua tiene un papel muy relevante precisamente en la regulación de dicha temperatura.

---

<sup>38</sup> Hartmann, 2015.

En primer lugar, el agua es uno de los principales gases de efecto invernadero en la atmósfera terrestre. Por sí sola, la presencia del vapor de agua en la atmósfera produce alrededor del 80 % del efecto invernadero total. Sin embargo, su distribución está muy concentrada en las capas más bajas de la atmósfera y varía bastante a lo largo del planeta (ver Figura 12): hay zonas con una fuerte abundancia de vapor de agua, como las tropicales, y otras con una presencia muy baja, como los grandes desiertos. Por esta razón, su contribución es más difícil de predecir a largo plazo con respecto a los otros gases de efecto invernadero que se instalan de manera más homogénea en las capas más altas de la atmósfera, como el dióxido de carbono y el metano.

En segundo lugar, la estructura atómica de la molécula de agua no es completamente simétrica y eso le aporta unas propiedades físicas interesantes que la distinguen de otro tipo de gases. Los dos átomos de hidrógeno se encuentran desplazados hacia un mismo lado respecto al átomo de oxígeno (ver Figura 6). Esto produce una pequeña diferencia de carga en cada lado, o estructura dipolar: en el lado que dominan los átomos de hidrógeno se crea un pequeño exceso de carga positiva, mientras que en el lado del oxígeno aparece un exceso de carga negativa. Esta propiedad física le permite a la molécula de agua producir enlaces moleculares con mayor facilidad que otro tipo de gases, lo que se traduce en que puede cambiar de estado, es decir, condensarse (convertirse en agua líquida) o congelarse (convertirse en hielo) a temperaturas más altas que el resto de los gases, como el dióxido de carbono o el nitrógeno. Estas propiedades del agua son la base física detrás de la mayor parte de los fenómenos meteorológicos (nubes, lluvia, borrascas...). En función de la dirección en que se realice ese cambio de estado, se cede o acumula una cierta cantidad de energía. De hecho, el agua tiene una alta capacidad para regular y transferir energía: por ejemplo, en un día soleado de verano, la superficie se calienta mucho, lo que aumenta la evaporación del agua, que al ascender se condensa y acaba formando una tormenta de verano, que, al descargar grandes cantidades de agua en forma de precipitación, enfría de nuevo la superficie.

Y precisamente la formación de nubosidad es el tercer aspecto. La presencia de nubes afecta también a la cantidad de radiación solar que puede llegar a la superficie, ya que las nubes son capaces de reflejar una parte. Todos estamos acostumbrados a que en un día nublado acabe haciendo menos calor durante el día que en un día soleado. Pero acabamos de comentar que el vapor de agua también causa el efecto invernadero: si el cielo está nublado, las temperaturas mínimas durante la noche no bajan tanto como lo hacen con el cielo despejado.

Al final, el balance entre los dos efectos que pueden producir las nubes depende principalmente de su altitud. Las nubes más altas ayudan a calentar la superficie terrestre, mientras que las nubes bajas contribuyen a enfriarla. El cálculo preciso del efecto global de la nubosidad a nivel planetario es muy complejo, pero se piensa que puede tener un balance neto nulo; es decir, que la nubosidad tenga simplemente un efecto regulador del clima.

## CONCLUSIONES

El agua es un producto natural del proceso de evolución del universo. Continuamente podemos observarla en otras regiones del universo o en nuestra galaxia; en particular, en nuestro entorno más cercano, el Sistema Solar. Es fascinante pensar que el agua pudo haber existido tan temprano en el universo, ya que también está en el corazón de la vida tal y como la conocemos. Así que se puede afirmar sin problemas que es una molécula cuya presencia no es exclusiva del planeta Tierra. Sin embargo, hasta el momento, la Tierra es el único planeta conocido que ha sido capaz de mantener agua líquida en su superficie durante un periodo largo de tiempo a escala geológica o, si queremos, cosmológica. Este hecho se debe a las características propias de la Tierra, junto con una serie de circunstancias particulares durante su formación y evolución. La propia presencia del agua en su superficie y atmósfera, así como la creación (gracias a su vez al agua) e influencia de la vida, han ayudado a regular la temperatura y clima del planeta hasta nuestros días. Es decir, no solo estamos formados por agua, sino que la propia permanencia del agua en la Tierra depende de la vida y, en particular, de las acciones de la humanidad.

## REFERENCIAS

ALPHER, Ralf A. y HERMAN, Robert C.: «Evolution of the Universe», *Nature*, 162, (1948), 774–775.

BENNETT, Charles L., *et al.*: «The Microwave Anisotropy Probe Mission», *The Astrophysical Journal*, 583, (2003), 1–23.

BERTAUX, Jean-Loup, *et al.*: «A warm layer in Venus' cryosphere and high-altitude measurements of HF, HCl, H<sub>2</sub>O and HDO», *Nature*, 450, (2007), 646–649.

BIALY, Shmuel, STERNBERG, Amiel, LOEB, Abraham: «Water formation during the epoch of first metal enrichment», *The Astrophysical Journal*, 804, (2015), L29.

BONDI, Hermann y GOLD, Thomas: «The Steady-State Theory of the Expanding Universe», *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 108, (1948), 252-270.

CANUP, Robin M. y ASPHAUG, Erik: «Origin of the Moon in a giant impact near the end of the Earth's formation», *Nature*, 412, (2001), 708-712.

CARR, Michael H.: *Water on Mars*, Nueva York: Oxford University Press, 1996.

CARROLL, Bradley W. y OSTLIE, Dale A.: *An Introduction to Modern Astrophysics*, Cambridge: Cambridge University Press, 2017.

CLEEVES, L. Ilse et al.: «The ancient heritage of water ice in the solar system», *Science*, 345, (2014), 1590.

CHRISTIAN, David: *Big History*, DK Penguin Random House, 2016.

FIXEN, Dale J.: «The Temperature of the Cosmic Microwave Background», *The Astrophysical Journal*, 707, (2009), 916-920.

GENGE, Matthew J.: «The Temperature of the Cosmic Microwave Background», *Geophysical Research Letters*, 44, (2017), 1679-1686

HANSEN, Candice J., et al.: «Enceladus' Water Vapor Plume», *Science*, 311, (2006), 1422-1435.

HARTMANN, Dennis: «Global Physical Climatology», *Elsevier Science*, 2015.

HELLED, Ravit, NETTELMANN, Nadine y GUILLOT, Tristan: «Uranus and Neptune: Origin, Evolution and Internal Structure», *Space Science Review*, 216, (2020), 38.

HOYLE, Fred: «A New Model for the Expanding Universe», *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 108, (1948), 372-382.

HUBBLE, Edwin: «A relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae», *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 15, (1929), 3.

LEMAÎTRE, Georges: «Un Univers homogène de masse constante et de rayon croissant rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extra-galactiques», *Annales de la Société Scientifique de Bruxelles*, A47, (1927), p. 49-59.

MAOZ, Dan: *Astrophysics in a Nutshell*, Princeton: Princeton University Press, 2016.

OROSEI, Roberto et al.: «Radar evidence of subglacial liquid water on Mars», *Science*, 361, (2018), 490-493.

PARTRIDGE, R. Bruce: *3K: The Cosmic Microwave Background Radiation*, Cambridge: Cambridge University Press, 1995.

PEACOCK, John: *Cosmological Physics*, Cambridge: Cambridge University Press, 1998.

PENZIAS, Arno A. y WILSON, Robert W.: «A Measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 Mc/s», *The Astrophysical Journal*, 142, (1965), 419-421.

PESLIER, Anne H. *et al.*: «Water in the Earth's Interior: Distribution and Origin», *Space Sci Rev*, 212, (2017), 743-810.

PIETERS, Carle M., *et al.*: «Character and Spatial Distribution of OH/H<sub>2</sub>O on the Surface of the Moon Seen by m<sup>3</sup> on Chandrayaan-1», *Science*, 326, (2009), 568-572.

PLANCK COLLABORATION, *et al.*: «Planck early results. I. The Planck mission», *Astronomy & Astrophysics*, 536, (2011), A1.

——— «Planck 2018 results. I. Cosmological parameters», *Astronomy & Astrophysics*, 641, (2020), A6.

RUBIÑO-MARTÍN, Jose Alberto, *et al.*: «The Quijote CMB Experiment», *Proceedings of the VIII Scientific Meeting of the Spanish Astronomical Society (SEA)*, 2008.

SNODGRASS, Colin, *et al.*: «The Main Belt Comets and Isce in the Solar System», *Astronomy & Astrophysics Review*, 25, (2017), 5.



### III. EL AGUA EN LA TIERRA

**Olga García Moreno**

Departamento de Geología, Universidad de Oviedo

#### **EL PLANETA AZUL**

El libro de Carl Sagan que se tituló en nuestro idioma *Un punto azul pálido*<sup>1</sup> es considerado la secuela de su famoso *Cosmos*,<sup>2</sup> que a su vez inspiró la famosa serie documental que tantas vocaciones científicas ha motivado en la sociedad occidental. Ese libro, publicado en la última década del siglo xx, está inspirado en la fotografía que la nave espacial Voyager 1 tomó en 1990 hacia atrás, hacia sus espaldas, mientras se alejaba de la Tierra a una distancia de 6000 millones de kilómetros. La idea de que la cámara de la Voyager se girara para tomar esa fotografía fue del mismo Sagan. Esa imagen ayudó a afianzar la idea que ya había comenzado a surgir con la publicación de la famosa foto del amanecer terrestre (*Earthrise*) en el año 1969, imagen captada el 24 de diciembre de 1968. Esa foto fue tomada por Bill Anders, uno de los tripulantes del Apolo 8, y nos mostró cómo todos estamos en el mismo barco, que ese hermoso planeta visto desde su satélite, la Luna, es nuestro hogar, y todos los recursos (excepto la luz del Sol) de los que disponemos los seres humanos están ahí y, por lo tanto, son limitados. En psicología, a este proceso se le denomina el efecto perspectiva, del

---

<sup>1</sup> Sagan, 1995

<sup>2</sup> Sagan, 2006

inglés *overview effect*. Este término fue acuñado por Frank White en 1987<sup>3</sup> y explica cómo la visión de nuestro planeta flotando en el espacio vacío provoca un cambio en la manera de entender el mundo y el lugar de los seres humanos en él. Desde el espacio no hay fronteras, no hay apenas rastro de huellas humanas y, gracias a esta nueva manera de ver el mundo, se produce un importante cambio de perspectiva. En este sentido estoy completamente de acuerdo con uno de los pioneros de la gran historia, Fred Spier, quien en sus obras nos describe cómo la gran historia nos permite obtener esta nueva perspectiva del lugar de los seres humanos en el cosmos, al igual que lo hace el *overview effect*.



Figura 1. La canica azul. Imagen de la Tierra desde el espacio”

De NASA tomada por la tripulación del Apolo 17, bien H. Schmitt or R. Evans.  
Link:<https://web.archive.org/web/20160112123725/http://grin.hq.nasa.gov/ABS-TRACTS/GPN-2000-001138.html> (image link); see also [https://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/image\\_feature\\_329.html](https://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/image_feature_329.html), Dominio público, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=43894484>

---

<sup>3</sup>White, 1987

Entre las dos imágenes de la Tierra, la de finales de los 60 y la de principios de los 90, otra famosa foto nos ofreció una nueva representación de nuestro planeta. A finales de 1972, esta vez la imagen fue tomada por la tripulación del Apolo 17, y en ella pudimos ver la Tierra como una canica azul (*blue marble*).

Aunque ya lo sabíamos, la canica es azul y no de otro color por el agua de los océanos. Esta es la imagen con la que comienzo mis clases de Ciencias Ambientales con los estudiantes que aspiran a ser futuros maestros. Solo con una foto podemos decir tanto de nuestro planeta y de la importancia de sus condiciones ambientales que empleamos estos primeros momentos del curso haciendo un repaso de todos sus conocimientos sobre la materia observando y comentando esta foto. Lo que primero llama la atención es que nuestro planeta, aun siendo un planeta rocoso, tiene abundante agua: cerca del 70 % de la superficie del mismo está cubierta por mares y océanos. Sin embargo, el agua de todos los océanos está estimada en unos  $1,34 \times 10^{21}$  kg, lo que corresponde tan solo a aproximadamente 1/4500 de la masa de la Tierra. Sobre si esto es poca o mucha agua trataremos en este y en sucesivos capítulos. Desde luego, una cosa está clara: esta cantidad fue y sigue siendo suficiente para el desarrollo de la biosfera y también de los seres humanos.

También veremos que el agua no se encuentra solo en la superficie del planeta y que la cantidad de esta peculiar molécula en la Tierra es superior a la que acabamos de mencionar. Tras entender en el capítulo 2 cómo llegó el agua a nuestro planeta y cómo se ha quedado en él, veremos en detalle a continuación cuál es el papel del líquido elemento en la dinámica de nuestro planeta, es decir, en los procesos que tienen lugar en la Tierra y que son diferentes de los que ocurren en otros planetas rocosos de nuestro vecindario solar, debido, en gran parte, a su presencia. En el anterior capítulo hemos visto, de nuevo volviendo a las palabras de Carl Sagan, que somos agua (recordemos la famosa frase «somos polvo de estrellas» con la que en *Cosmos* nos explicaba cómo todos los elementos químicos que encontramos en la Tierra, incluidos los que forman la materia de los seres vivos y nosotros mismos, proceden de la muerte de estrellas más antiguas que nuestro Sol), y en este capítulo entenderemos la apostilla de otro gran historiador, Walter Alvarez, a esta famosa frase: «somos polvo de estrellas, reconcentrado por la Tierra», explicada en su libro *El viaje más improbable*.<sup>4</sup> Aquí analizaremos cómo se ha reconcentrado el agua en la hidrosfera, y

---

<sup>4</sup> Álvarez, 2017

por lo tanto en la superficie del planeta y a nuestra disposición, pero también cómo ha podido quedar atrapada en zonas profundas, donde hace pocos años no podíamos imaginar que pudiera existir esta preciada molécula para los seres vivos. Los usos del agua por los seres humanos serán tratados más adelante en este libro, en el capítulo 5.

### **DÓNDE ESTÁ EL AGUA EN LA TIERRA**

En el capítulo anterior se explicó la manera en la que se ha acumulado agua en el Sistema Solar y cómo se distribuye en las diferentes partes o componentes del mismo. Entendimos cómo el agua líquida es excepcional en este y también cómo se mantiene en este estado en la Tierra gracias, entre otros procesos, al efecto invernadero.

Nos hemos centrado en el agua líquida, como explicábamos, debido a que es en este estado en el cual verdaderamente funciona como medio facilitador de multitud de complicadas reacciones químicas que son esenciales para explicar el origen y el mantenimiento de la complejidad de la vida. También porque realmente es el agua líquida la que nos sirve como recurso para las actividades cotidianas de los seres humanos, desde nuestros procesos fisiológicos basados en la hidratación hasta el agua que necesitamos para mantener las cosechas por medio de regadíos. No es el objeto de este capítulo tratar sobre los usos del agua por parte del ser humano, que serán revisados en capítulos posteriores; sin embargo, es necesario destacar que gran parte del agua en nuestro planeta no está a nuestra disposición en forma de agua líquida en la superficie y que la mayor parte de esta agua es salada y no es, por lo tanto, útil para los organismos vivos ni para nuestras actividades.

Debemos por lo tanto explicar el concepto de hidrosfera y ciclo del agua para entender esta distribución del agua a nuestra disposición. La hidrosfera es la parte del Sistema Tierra que contiene el agua en la superficie del planeta. Las otras partes de este Sistema son: la geosfera, que es la parte rocosa, siendo la litosfera la parte más superficial de la misma (o la denominaremos *corteza* si nos basamos en una clasificación química de los materiales rocosos que la conforman); la atmósfera, que es la capa de gases que envuelve a la geosfera y la hidrosfera; la biosfera, que comprende los organismos vivos que habitan las anteriores partes descritas; y la tecnosfera, que se refiere a la parte del Sistema Tierra en la que los seres humanos desarrollamos nuestras actividades, y que también está repartida en todas las anteriores.

El agua en la hidrosfera se encuentra en estado líquido, sólido y vapor en distintos reservorios, o lugares donde, siempre temporalmente, se almacena el agua. Con esta temporalidad nos referimos a que el agua se encuentra siempre en movimiento en la hidrosfera y hay un intercambio entre los distintos reservorios. En algunos de ellos el agua permanece por periodos de tiempo muy largos y, en la escala de tiempo humana, puede parecer que permanece inmóvil, aunque no sea así en la escala de tiempo geológico. Este es el caso del agua ubicada en los glaciares o en los océanos donde puede permanecer (lo que denominamos tiempo de residencia) durante miles de años. Entre otros reservorios el intercambio de agua es muy rápido y la permanencia, por ejemplo, del agua en la atmósfera es de apenas días o semanas.



Figura 2. El ciclo del agua, de dominio público por USGS. Link: [https://www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/science/el-ciclo-del-agua-water-cycle-spanish?qt-science\\_center\\_objects=0#qt-science\\_center\\_objects](https://www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/science/el-ciclo-del-agua-water-cycle-spanish?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects)

En la figura 2<sup>5</sup> se resume este movimiento del agua en lo que es conocido como el ciclo del agua, que no es otra cosa que el resumen de los posibles intercambios entre los reservorios de este recurso. Todos conocemos bien este

<sup>5</sup> USGS, 2022

ciclo, que se estudia ya en las escuelas de educación primaria, aunque quizá partes de él no sean tan conocidas o las tengamos tan presentes. Convendría destacar aquí en este ciclo la interacción de la hidrosfera con la geosfera y la atmósfera, pero también con la biosfera, por ejemplo, en el proceso de evapotranspiración. Este sería el ciclo denominado *natural* del agua. Si consideramos los usos antrópicos de este recurso y su relación con el ciclo natural, debemos hablar del ciclo *integral* del agua, donde se consideran también los usos que los seres humanos hacemos del agua. Este ciclo integral incluye la captación, tratamiento, distribución y el abastecimiento de agua para los seres humanos.

Según el Servicio Geológico de los EE. UU. (usgs) el 96,5 % de las aguas superficiales está localizada en los mares y océanos, por lo que en el resto de los reservorios solo encontraríamos el 3,5 %. Este escaso porcentaje es el agua dulce disponible en el Sistema Tierra y de esta, casi un 70 %, estaría en forma de hielo en los glaciares y nieves permanentes. En cifras, de los aproximadamente 1400 millones de km<sup>3</sup> de agua de la hidrosfera, tan solo unos 16 millones estaría en forma de ríos, lagos y aguas subterráneas. Parece mucho, pero todos sabemos que no lo es y que no está igualmente repartida en todas las partes del mundo.

Como hemos visto, el ciclo del agua en la hidrosfera nos permite conocer la disponibilidad del agua para los seres vivos. Sin embargo, es importante además conocer que esta molécula está también presente en otras partes en la geosfera, en el interior del planeta, y aunque no es agua líquida disponible para su uso, su papel es también fundamental para mantener esas condiciones *goldilocks* que hacen posible la vida en nuestro planeta.

En este punto nos es útil recordar aquella definición que aprendimos en la escuela de las capas de la geosfera (la parte rocosa –silicatada– de la Tierra) de la que ya hemos hablado anteriormente. Esta definición nos decía que, en su interior, la Tierra tiene una corteza, un manto y un núcleo. Esta estructuración en capas de la geosfera se corresponde con una clasificación desde el punto de vista de la química de los materiales que componen el interior de la geosfera. Como vimos en el capítulo anterior, un proceso temprano en la historia de nuestro planeta (y de los otros planetas) fue la diferenciación de un núcleo rico en hierro y níquel. Alrededor de ese núcleo se solidificaron los minerales silicatados que actualmente, con miles de millones de años de enfriamiento, pasaron a formar el manto. Mediante procesos de fusión parcial de las rocas del manto y su enfriamiento, y también después de miles de millones de años de evolución geoquímica de nuestro planeta, se formó una corteza, también silicatada, en la parte más externa de la geosfera, por el enfriamiento de los magmas procedentes

de esa fusión parcial de las rocas mantélicas. La composición química de las rocas con silicatos que forman el manto y la corteza es obviamente distinta, ya que unas proceden de las otras. Solo si el proceso de fusión del manto hubiese sido total, y no parcial como es el caso, las dos composiciones podrían ser las mismas. Es decir, si del todo saco una parte, esa parte no puede tener la misma composición del todo: esto solo ocurriría si la parte fuese el 100 % del todo. Es esencial entender este proceso, que parece obvio y un poco de Perogrullo, para comprender la dinámica interna de nuestro planeta, que ha sido fundamental para el mantenimiento de las condiciones idóneas para la vida en el mismo, y en el que, como veremos, el agua tiene un papel primordial.

Esa agua, que es tan importante para explicar la gran historia de nuestro planeta y de todo lo que hay en él, incluyendo la biosfera y la tecnosfera, es, precisamente, el agua mantélica. Agua que no podemos usar como recurso, como hacemos con la de la hidrosfera, pero que ha tenido un papel clave en los procesos que han hecho posible el mantenimiento de las condiciones de habitabilidad en nuestro planeta. El agua puede introducirse en el interior de la geosfera hasta las zonas del manto inferior e incluso la zona de transición con el núcleo (a temperaturas de 4400 °C) a través del proceso de transporte que se produce en la subducción de las placas litosféricas. Y aquí debemos detenernos para recordar el funcionamiento interno de nuestro planeta. La manera que la Tierra tiene de enfriarse, es decir, de repartir su calor interno hacia el exterior y así ir perdiéndolo, es mediante convección mantélica, que es uno de los mecanismos, junto a la gravedad, que pone en marcha la tectónica de placas. Porque, sí, nuestro planeta se está enfriando y esto no debe ser algo sorprendente ni contradictorio con el conocido concepto de calentamiento global o el proceso de cambio climático, como deberíamos realmente denominarlo. Son dos cosas diferentes. El cambio climático que estamos sufriendo en la actualidad, y que está claramente relacionado con las actividades antrópicas que están modificando tanto la composición de la atmósfera como los usos del suelo, se refiere al calentamiento de las capas bajas de la atmósfera por aumento en el efecto invernadero y también a un incremento en la temperatura media de los océanos. Pero en la escala de la historia geológica, este proceso es muy reciente y puntual, si también observamos la escala planetaria. La geosfera, de mucho mayor tamaño que la atmósfera, se está enfriando desde su formación, hace 4600 millones de años: en el momento de la acreción planetaria y la posterior diferenciación, y cuando cesó el intenso bombardeo de meteoritos y cometas sobre la superficie de nuestro planeta, la geosfera comenzó un lento enfriamiento.

También el enfriamiento fue debido al agotamiento de la radiactividad emitida por los isótopos radiogénicos de más corta vida media que se acumularon en nuestro planeta en el proceso de acreción. Una vez se desintegraron se acabó este aporte de calor radiactivo y hasta el momento solo queda el aporte de los isótopos inestables de vida media más larga. La manera de enfriarse la geosfera, como hemos dicho, es a través de las corrientes de convección que se generan en el manto. Este proceso, que funciona desde etapas bien tempranas en la historia de la Tierra, aunque no desde su formación, consiste en el movimiento de corrientes, denominadas de convección, que transportan el calor desde el interior de la geosfera a la superficie. Y este proceso tiene una importante consecuencia: la litosfera, que está en la parte superior de la geosfera, es rígida y no continua, es decir, está constituida por distintos fragmentos o placas litosféricas.

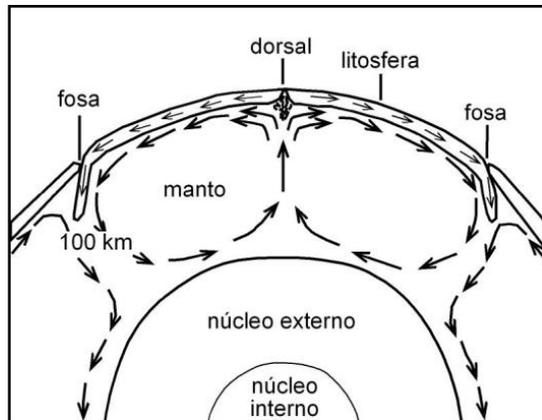


Figura 3. Esquema del funcionamiento interno de la geosfera: tectónica de placas y corrientes de convección mantélicas.

Estas placas se mueven sobre la astenosfera, que se encuentra inmediatamente por debajo. Quizá ahora el lector esté pensando por qué, si antes habíamos definido esas capas internas de la Tierra como corteza, manto y núcleo, tenemos ahora que utilizar nuevos y más complicados términos como los de *litosfera* y *astenosfera*. Tenemos una razón para la jerga, sin la cual no podemos continuar con nuestra aproximación a la gran historia del agua. Si recordamos la definición que vimos anteriormente, en ella se usaba el criterio de composición química de los materiales, es decir, de qué componentes químicos y mineralógicos están compuestas las diferentes capas de la geosfera. Sin embargo, para

explicar la tectónica de placas y cómo este proceso está en marcha debido al modo de enfriamiento de nuestro planeta, debemos tener en cuenta las propiedades mecánicas de los materiales y no solo su quimismo. ¿A qué nos referimos con estas propiedades? Es bien sencillo imaginar un material con propiedades dúctiles o plásticas: este será un material que tiende a deformarse, como la plastilina, y casi a fluir, como unas natillas. De la misma manera, también podemos pensar en un material rígido o frágil, que tiende a romperse en vez de a deformarse, como una lámina de vidrio o una galleta. En la geosfera, las galletas serían las placas tectónicas, es decir, los fragmentos de litosfera, moviéndose lentamente encima de las natillas, que serían la astenosfera. Ya tenemos un buen postre. La litosfera está formada por la corteza y la parte superior del manto superior, y la astenosfera es la parte restante del manto superior que hay por debajo. Gracias a este proceso y a las propiedades mecánicas de las distintas capas, en los puntos en los que dos partes ascendentes de las células de convección mantélica coinciden, se rompe la litosfera, formándose un límite de placas, para permitir la salida hacia la superficie de material caliente y fundido (magmas que proceden de la fusión parcial del manto que explicábamos antes), formando nueva litosfera en lo que se conoce como un borde de placas divergente. El material nuevo procedente del manto y la distribución de calor en el interior en esa zona generan un empuje lateral en sentidos opuestos de dos fragmentos de litosfera, tal y como se ilustra en la Figura 3. Este es el proceso que tiene lugar en las dorsales centroceánicas, esas cordilleras submarinas compuestas por volcanes subacuáticos que expulsan hacia la superficie el producto de la fusión parcial del manto y que, con el enfriamiento, forman las rocas basálticas que, con el paso de los años y la expansión oceánica, constituirán los fondos oceánicos. Pero nuestro planeta no está creciendo en superficie indefinidamente por esta expansión. Existe el proceso opuesto por el cual, en vez de formarse nueva litosfera, como acabamos de explicar, se destruye. Esto ocurre en las zonas de subducción, en lo que constituyen los bordes de placa convergentes. Aquí, en el interior, las partes más frías de dos células de convección confluyen en superficie, como se puede ver en la Figura 3. Los movimientos de las placas en estos puntos son convergentes, y de ahí su denominación. Las dos placas se mueven hacia el mismo punto y aquí es donde la gravedad toma protagonismo en este proceso y lo que ocurre es que la más densa y fría, constituida siempre por una placa litosférica con corteza oceánica en su parte superior, penetra por debajo de otra placa, generalmente de litosfera continental, aunque pueden darse casos, como actualmente en Japón, donde tenemos subducción de oceánica bajo

oceánica. En este tipo de bordes, los convergentes, también hay procesos de fusión parcial, aunque algo más complejos que los que ocurren en las dorsales centroceánicas, pero a los que tenemos que recurrir para explicar nuestra gran historia del agua. Aunque no es del todo relevante para esta historia, como ya hemos explicado dos de los tres tipos de bordes de placas litosféricas, nos gustaría mencionar el último, para que no quede en el olvido y para que el lector lo identifique, porque quizá sea el tipo más famoso por su mala fama en relación a la actividad sísmica que en él se produce. Nos estamos refiriendo a los bordes transformantes, cuyo ejemplo más conocido es la famosa falla de San Andrés en California. En este tipo de bordes, no se crea ni se destruye litosfera como en los casos anteriores y no hay actividad volcánica asociada a ellos. Se trata de un movimiento lateral relativo de una placa con respecto a la otra, donde las placas se mueven en la misma dirección, pero en sentidos opuestos, como en los dos carriles de una carretera, uno para cada sentido.

Conocido ahora el funcionamiento interno de nuestro planeta, podemos llegar a entender cómo puede haber llegado agua al manto inferior y casi al núcleo. Mediante el proceso de subducción, como hemos mencionado, se pueden transportar materiales de los fragmentos de placas litosféricas subducentes a grandes profundidades. Como si se tratara de una cinta transportadora, los materiales hidratados de los fondos oceánicos y, lo que es más importante, los materiales procedentes de la erosión (se explicarán este proceso y el ciclo externo más adelante) de los continentes de la placa suprayacente (Figura 3) son introducidos a zonas profundas, cambiando paulatinamente la composición geoquímica y el contenido en agua del manto con el paso de millones de años de evolución terrestre. Los métodos geofísicos, mediante el estudio de la propagación de las ondas sísmicas, nos permiten «observar» de modo indirecto el gran viaje hacia el interior que pueden hacer estos fragmentos (slabs). También, mediante estudios experimentales en el laboratorio, se puede estimar la cantidad de agua que pueden incorporar los distintos minerales que forman el manto a distintas profundidades y temperaturas que son simuladas en los equipos de los laboratorios de alta presión y alta temperatura. De esta manera sabemos que la zona más profunda del manto, en la denominada zona de transición, en contacto con el núcleo externo, los minerales tienen una mayor capacidad de incorporar agua en su estructura cristalina que en los del manto por encima de esta zona. Las estimaciones más recientes<sup>6</sup> indican que el manto inferior puede

---

<sup>6</sup> Ohtani, y Zhao, 2009

albergar una cantidad de agua equivalente a dos veces la masa oceánica (OM), la zona de transición entre 0,2 y 1 OM y el manto superior alrededor de 0,04 OM. Recordemos que esto es debido a la distinta capacidad de los minerales de albergar la molécula de agua o los grupos OH en su estructura en función de las condiciones de presión y temperatura, siempre mayor hacia zonas más profundas.

Pero este contenido de agua en el manto no siempre ha sido el mismo, ha variado a lo largo de la historia de la Tierra, debido a su enfriamiento. En la Tierra primitiva, el manto estaba mucho más caliente y la estructura cristalina de los minerales no era capaz de albergar agua, por lo que esta debería estar fundamentalmente en superficie. La masa oceánica en el Arcaico, la época más antigua de la que tenemos registro en la Tierra, debería ser superior a la actual. Este hecho es de gran importancia, ya que la cantidad de agua disponible para el proceso de fusión parcial en el manto y, por lo tanto, para el desarrollo de la tectónica de placas es clave como veremos en el siguiente epígrafe.

#### **EL PLANETA DEL AGUA Y DE LA VIDA**

Es inevitable asociar la idea de un planeta con vida y un planeta con agua. Ya hemos dado algunas pistas de cuál es la explicación para esta dependencia (que puede llegar a ser interdependencia) anteriormente. Analicemos ahora en más profundidad esta relación entre agua y vida.

Dejando para el siguiente capítulo el tema del origen de la vida y la necesidad de agua señalada en los escenarios propuestos como posibles ambientes donde pudo darse el gran salto del mundo inorgánico a los seres vivos, vamos a destacar aquí la importancia del agua en la Tierra para mantener un planeta «vivo» en el que pueda desarrollarse la vida. Con planeta vivo nos referimos a un planeta con dinámica interna y externa.

Hemos visto en el epígrafe anterior cómo funciona la tectónica de placas. La existencia de tectónica de placas en un planeta ayuda a estabilizar su hidrosfera y su atmósfera y, a largo plazo, también su clima. El enfriamiento del manto por la subducción de placas impulsa y retroalimenta la convección mantélica. Este proceso es muy importante también porque a su vez acciona la dinamo en el núcleo externo líquido (conversión de la energía mecánica en eléctrica). Esta acción de dinamo, por su parte, produce el campo electromagnético, que protege a la atmósfera y a la superficie de la Tierra de los vientos solares, como puede observarse en la Figura 4.

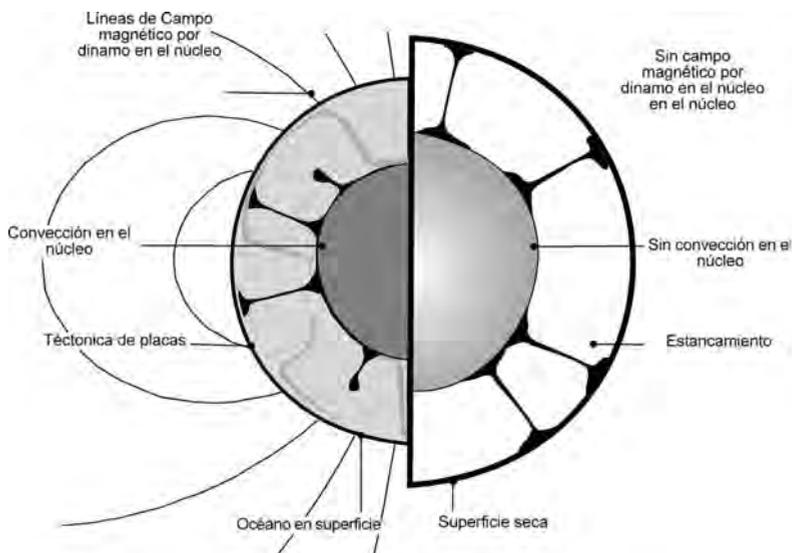


Figura 4. A la derecha planeta no habitable, sin agua en superficie, a la izquierda, planeta habitable, con hidrosfera. La tectónica de placas produce la convección en el manto que a su vez genera el efecto dinamo en el núcleo externo, produciendo el campo magnético que protege al planeta de los vientos solares.

De la autora. Modificada de Shahar A, Driscoll P, Weinberger A, Cody G (2019)

What makes a planet habitable? *Science* 364(6439): 434.

En la actualidad, de hecho, la búsqueda de geomarcadores para la identificación de posible vida en otros planetas y satélites utiliza las «huellas» de la tectónica de placas, entre otros indicadores. Si logra identificarse, por ejemplo, la presencia de rocas graníticas en un planeta, se puede deducir si este ha tenido (o tiene) tectónica de placas, y probablemente también agua en superficie. Uno de los retos en la exploración de nuestros planetas vecinos en el Sistema Solar, en concreto en Venus, es conocer si este tiene aún tectónica de placas. Marte parece haberla tenido en su pasado, pero ya no está activa, el planeta se ha enfriado y la dinámica interna ha cesado. En Venus se está intentando conocer la composición de la capa rocosa más externa, su corteza, para intentar identificar este tipo de rocas graníticas que evidenciarían este tipo de actividad tectónica. Pero la tarea es dura, su espesa y ardiente atmósfera (más de 450 °C) nos impiden explorar la superficie como podemos hacerlo en Marte. Si identificáramos

granitos presentes en grandes volúmenes en la corteza venusina, sabemos que, en general, estos solo pueden formarse por procesos de fusión parcial relacionados con la subducción de las placas. Como los basaltos de los fondos oceánicos, los granitos se forman por fusión parcial, pero se requiere la presencia de agua en este proceso para que los magmas tengan composición granítica, entre otros factores. Si se reconocen granitos en la corteza de un planeta es muy probable que su modelo de enfriamiento sea muy similar al terrestre. Por otro lado, aunque hemos dicho que la convección mantélica también produce el campo magnético terrestre, la presencia de un campo magnético en un planeta no es debida exclusivamente a este proceso, es decir, hay otros mecanismos por los que puede producirse un campo magnético y ello no implica la existencia de tectónica de placas. Por ejemplo, Venus tiene un intenso campo magnético que sabemos que es debido a las corrientes eléctricas de su peculiar atmósfera. Así que la búsqueda de granitos y la identificación de estructuras en superficie que evidencien actividad tectónica reciente son la clave para saber si nuestro planeta gemelo está, o ha estado recientemente, internamente activo.

En el caso de la Tierra, la existencia de una dinámica interna, como decíamos, ha ayudado a consolidar la atmósfera y la hidrosfera. Esto es debido a la estabilización del proceso de enfriamiento que acabamos de explicar y a una retroalimentación en la que tenemos que incluir los fenómenos que tienen lugar en la corteza. Sumemos ahora los procesos externos a los mencionados procesos internos.

Los procesos externos incluyen los fenómenos de meteorización, erosión, transporte y sedimentación. En todos ellos el agua tiene un papel primordial. En el proceso de meteorización, o lo que es lo mismo, la alteración mecánica y química que sufren los materiales de la corteza (minerales y rocas) en contacto con los agentes externos (agua, atmósfera, ciclos de hielo-deshielo, etc.) el agua puede pasar de formar parte de la hidrosfera a parte de la corteza, por la hidratación de minerales. Los minerales se desestabilizan en las condiciones ambientales y pueden darse las reacciones químicas de hidratación que introducen agua en su estructura cristalina. Este mecanismo es muy importante ya que explica cómo puede penetrar el agua en el manto mediante el proceso de subducción. Pero sigamos con el ciclo externo. Los materiales meteorizados son susceptibles de sufrir la erosión, fenómeno por el cual estos minerales o fragmentos de roca pueden ser arrancados de la roca madre a la cual pertenecían y de esta manera pueden seguir el ciclo mediante el transporte de los mismos en medio acuoso (ríos, torrentes...), por el hielo (glaciares) o por el

viento (materiales en suspensión en la atmósfera). Todos estos materiales que son erosionados y transportados, en un momento dado serán depositados en otro lugar, lo que conocemos como sedimentación. Esta puede tener lugar en cualquier localización donde se detenga el transporte, pero los mayores volúmenes de sedimentos se acumulan en las cuencas sedimentarias en los mares y océanos. Las aguas continentales finalmente arrastran estos materiales, previamente meteorizados, erosionados y transportados, hacia las fosas oceánicas que se encuentran en las zonas de subducción (Figura 5). Si recordamos el epígrafe anterior, necesitamos de estos materiales sedimentarios con minerales hidratados que puedan entrar hacia el manto por el canal de subducción (la cinta transportadora) para retroalimentar la tectónica de placas mediante el enfriamiento del manto.

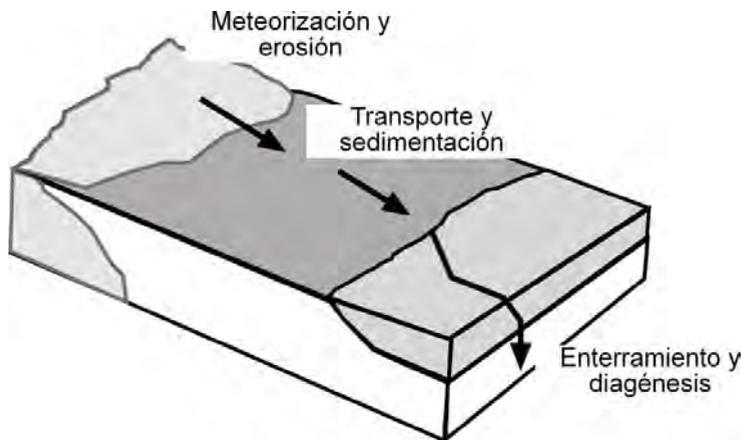


Figura 5. Procesos geológicos del ciclo externo. De la autora.

La acción conjunta de los procesos internos y externos en la Tierra junto con la actividad biológica han determinado la evolución del agua en nuestro planeta. Con el cese de los impactos hace 4000 millones de años, la Tierra llegó a una etapa de cierta calma con las condiciones idóneas para el desarrollo de las primeras formas de vida, como será explicado con más detalle en el siguiente capítulo. Estas primeras formas de vida se desarrollaron en medio acuático y en condiciones de bajo contenido en oxígeno. Se estima que hace 3800 millones de años ya existían las condiciones idóneas en las que se pudo dar el gran salto

de complejidad que implica la aparición de la vida en nuestro planeta. A partir de moléculas orgánicas complejas, formadas en nuestro propio planeta y muy probablemente también adquiridas del exterior a través de los meteoritos y cometas que bombardearon la Tierra en sus etapas más jóvenes, se formaron las primeras estructuras protocelulares, que se aislaron del ambiente en el que se formaron mediante una membrana. Mediante este aislamiento pudieron seguir dándose, gracias a un intercambio de energía con el exterior, las complejas reacciones orgánicas que, en un momento dado, dieron lugar a un metabolismo y a un autocopiado de la estructura, lo que definiría ya la aparición de un organismo vivo.

De esta etapa de la gran historia aún tenemos muchas sombras, pero sí conocemos, mediante los increíbles estudios genéticos realizados en los últimos 60 años, que debió de haber un ancestro común para todos los seres vivos hace unos 3500 millones de años, al que llamamos LUCA (del inglés *Last Universal Common Ancestor*), a partir del cual, como veremos en el siguiente capítulo, hemos evolucionado todas las especies del planeta. Las investigaciones continúan para conocer cómo era el medio en el que surgieron los primeros organismos vivos. Todas ellas tienen en común el medio acuoso para explicar las condiciones donde se pudo dar el gran salto hacia las formas complejas que somos los organismos vivos, los cuales producimos un flujo de energía mucho mayor que cualquier reacción en el mundo inorgánico, precisamente para mantener nuestra complejidad. También con la aparición de los seres vivos la velocidad de los procesos se acelera, lo que está relacionado asimismo con ese mayor flujo de energía para mantenernos vivos. Estas dos características nos permiten definir en gran historia, el comienzo de un nuevo régimen, distinto al del cosmos o mundo físico-químico, para pasar al de la vida o mundo biológico. Como también veremos más adelante, en gran historia estudiamos otro gran salto cuando una especie, en ese proceso de evolución de los organismos vivos, de nuevo aumenta los flujos de energía y la velocidad de los procesos para su mantenimiento, definiendo así el comienzo del régimen de la humanidad.

Volviendo a las condiciones en las que pudo originarse la vida, el escenario acuático, más estudiado y con unas características aparentemente idóneas para explicar la formación de estructuras orgánicas complejas que pudieron ser los precursores de la vida, es el medio de las chimeneas hidrotermales alcalinas.<sup>7</sup> Estas fuentes de fluidos hidrotermales (agua a alta temperatura) están en zonas

---

<sup>7</sup> Colín-García et al., 2016

del fondo del océano y aún existen en la actualidad, en relación con los bordes divergentes o dorsales (o rifts) centroceánicos. Estas chimeneas no se sitúan justo en la dorsal, sino a unos pocos kilómetros a los lados de las zonas más calientes donde se está generando nueva corteza basáltica. La actividad hidrotermal en las chimeneas hidrotermales alcalinas, también llamadas *chimeneas blancas* (*white smokers*) no está relacionada tanto con la actividad magmática de la dorsal como con el proceso de alteración (meteorización) o de interacción química de la corteza basáltica ya enfriándose en contacto con el agua del océano. Esta interacción produce una serie de reacciones químicas que denominamos *de serpentinización*. Estas reacciones son exotérmicas, es decir, al producirse se genera calor, y esto es lo que hace que la temperatura sea más elevada (unos 80 °C) en comparación con la del fondo del océano. En la actualidad existen estos medios y se han estudiado recientemente, como, por ejemplo, la denominada *Lost city* en las cercanías de la dorsal mesoatlántica, descubierta hace apenas 20 años. Estos medios en relación con la serpentinización son extremadamente ricos en biodiversidad en la actualidad y son el objetivo de numerosos experimentos de simulación de reacciones químicas en busca del gran salto del mundo inorgánico al biológico. En estos experimentos se ajustan las condiciones físico-químicas para hacerlas semejantes a las del océano primitivo, muy diferente al actual, sobre todo, como explicaremos a continuación, en cuanto al contenido de oxígeno disuelto en las aguas. Pero no todos los experimentos en busca del origen de la vida se centran en medios totalmente acuosos como el que acabamos de describir. Otra hipótesis que también está siendo investigada requiere la presencia de agua, pero no de manera permanente. Se trata de ambientes con presencia de agua intermitente, como charcas que son susceptibles de inundarse y secarse periódicamente. Los investigadores que están a favor de esta hipótesis argumentan que, aunque el agua es esencial para la vida tal y como la conocemos, esta también produce la hidrólisis de moléculas orgánicas, lo cual es contraproducente a la hora de explicar el desarrollo de las reacciones químicas que pueden haber dado lugar al origen de la vida. Si consideramos en la actualidad a los seres vivos, estas reacciones estarían protegidas en el interior de los mismos por una membrana, pero en los escenarios prebióticos, la hidrólisis parece inevitable y, por lo tanto, contraproducente. Si por el contrario a la hipótesis del fondo del océano, se consideran ambientes en los que la actividad de agua fuese restringida, como esas charcas que eventualmente se secan, podría explicarse el desarrollo de esos entornos prebióticos protegidos de la hidrólisis. El tema es complejo y va más allá de los objetivos de este libro,

pero la hipótesis de las chimeneas hidrotermales no está reñida con la cuestión de la ruptura de las moléculas orgánicas complejas en presencia de agua, ya que la actividad de agua en esos medios también puede verse restringida por las propias características físico-químicas y estructurales (sustratos porosos donde se dan las reacciones que liberan hidrógeno) y, por lo tanto, no tiene por qué ser descartada.

Mencionábamos que las condiciones del océano primitivo fueron muy diferentes a las del océano actual y esto fue debido al primer gran cambio global que sufrió nuestro planeta como consecuencia de la interacción de la biosfera con el resto de las partes del sistema. Esto ocurrió en la denominada catástrofe del oxígeno o evento de gran oxidación (GOE por sus siglas en inglés: *Great Oxidation Event*), que ocurrió hace unos 2400 millones de años. Con el desarrollo de la respiración aeróbica de ciertos microorganismos, comenzó el aumento del contenido de este gas que ahora constituye el 21 % de la atmósfera. Antes de oxigenarse la atmósfera, tuvieron que oxigenarse los océanos (y toda la hidrosfera), pero esto no ocurrió hasta que los materiales orgánicos y los sedimentos con hierro se oxidaron por completo en sus fondos. Por lo tanto, en la evolución de la hidrosfera, podemos decir que esta se oxigenó antes que la atmósfera, pero después que la parte más externa y superficial de la geosfera. Este hecho es importante, ya que la aparición de este gas forzó condiciones oxidantes en los ambientes externos, lo que a su vez produjo la aparición de nuevos minerales en la corteza. Estos nuevos materiales aparecieron gracias a que estas nuevas condiciones dan lugar a minerales distintos de los que se producen en ausencia de oxígeno, por el proceso de meteorización química. Gracias al ciclo externo, estos nuevos minerales son susceptibles de entrar en el ciclo interno a través de las zonas de subducción. Muchos de estos «nuevos» minerales son arcillas, con alto contenido en agua en su estructura cristalina, lo que pudo hacer que la subducción fuera más «hidratada» que en épocas anteriores. Todo esto ocurre alrededor del final del Arcaico y el comienzo del Paleoproterozoico. En esta época se observan grandes cambios en las rocas que constituyen esta parte del registro geológico y que evidencian cambios en la dinámica interna. Aunque estos cambios coinciden también con variaciones en la distribución del calor en el manto, debido al enfriamiento del planeta, parece que la influencia de las modificaciones de los procesos externos en los internos puede haber sido un importante punto de inflexión. Todos estos cambios son objeto de investigación en la actualidad, ya que los registros de rocas tan antiguas son bastante escasos y son muchas las variables que deben tenerse en

cuenta para entender el funcionamiento global de nuestro planeta, con la interacción continua entre biosfera, atmósfera, hidrosfera y geosfera. Esta interacción es muy evidente si observamos el mundo actual. Es más fácil entender los mecanismos hoy en día, ya que podemos hacer observaciones y medidas, y casi ver esas interacciones. De hecho, entendemos muy bien incluso la influencia de las actividades humanas en los ciclos biogeoquímicos (el del carbono, nitrógeno, fósforo o azufre, por ejemplo), y por ello se ha definido el Antropoceno, que, aunque no es una etapa geológica aceptada por la Unión Internacional de Ciencias Geológicas, se ha convertido en un término muy usado para entender cómo la huella de los seres humanos está cambiando el equilibrio dinámico del Sistema Tierra. Como decíamos, cómo ha ido cambiando ese equilibrio dinámico en la historia del planeta es algo más difícil de entender. Los geólogos observamos las rocas, hacemos experimentos y construimos modelos numéricos para entender todos esos cambios, pero debemos tener en cuenta para ello todas las variables posibles y no obviar la actividad biológica en esos procesos. Un ejemplo de investigación geológica, con esta amplitud de miras que utilizamos en gran historia para entender nuestro pasado, es el que se muestra en un artículo de 2012 en la revista *Geology*.<sup>8</sup> En ese trabajo se ha estudiado el aumento de la disponibilidad de metales traza en los océanos antiguos, del Mesoproterozoico, hace 1600 millones de años. Antes de esta época, estos metales traza, como el cobre, el zinc o el molibdeno, eran muy escasos y el aumento en la abundancia de los mismos en los océanos está relacionado con los procesos de erosión de una corteza continental que creció extraordinariamente unos 200 millones de años antes debido a la formación masiva de granitos en esa época, en el Paleoproterozoico. Este crecimiento cortical anómalo aún es tema de investigación y no entendemos muy bien todas las variables del proceso que lo desencadenó, pero sí sabemos que, a consecuencia de ello, los procesos de meteorización, erosión y transporte de los granitos de esta corteza continental engrosada alimentaron a los océanos con estos metales que hasta entonces eran muy escasos en los mismos. Esta disponibilidad de metales traza se sabe por medio de estudios biogeoquímicos y genómicos, que son esenciales para la evolución progresiva de la vida en la Tierra. Los autores de este trabajo relacionan la radiación de las formas de vida eucariota (con reproducción sexual) que ocurrió en el Mesoproterozoico con esta nueva disponibilidad de metales traza en los océanos donde se estaba desarrollando la vida: una clara relación

---

<sup>8</sup> Parnell *et al.*, 2012.

entre el funcionamiento interno y externo de la geosfera con la hidrosfera y la biosfera, en este caso.

Nos adentramos a partir de aquí en la evolución de la vida, que se describe en el siguiente capítulo, en el que seguiremos viendo que el medio acuoso es fundamental para entender cómo los seres vivos han ido evolucionando hasta constituir la actual biosfera.

## REFERENCIAS

ALVAREZ, Walter: *El viaje más improbable*, Barcelona: Crítica, 2017.

COLÍN-GARCÍA, María, HEREDIA, Alejandro, CORDERO, Guadalupe, CAMPRUBÍ, Antoni, NEGRÓN-MENDOZA, Alicia, ORTEGA-GUTIÉRREZ, Fernando, BERARDI, Hugo y RAMOS-BERNAL, S.: «Hydrothermal vents and prebiotic chemistry: a review», *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 68, 3 (2016), 599-620.

OHTANI, Eiji y ZHAO, Dapeng: «The role of water in the deep upper mantle and transition zone: dehydration of stagnant slabs and its effects on the big mantle wedge», *Russian Geology and Geophysics*, 50, 12 (2009), 1073-1078.

PARNELL, John, HOLE, Malcolm, BOYCE, Adrian J., SPINKS, Samuel y BOWDEN, Stephen: «Heavy metal, sex and granites: crustal differentiation and bioavailability in the mid-Proterozoic», *Geology*, 40, 8 (2012), 751-754.

SAGAN, Carl: *Un punto azul pálido*, Buenos Aires: Planeta, 1996.

——— *Cosmos* (Vol. 1), Barcelona: Edicions Universitat Barcelona, 2006.

USGS: *El ciclo del agua*. Disponible en: [https://www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/science/el-ciclo-del-agua-water-cycle-spanish?qt-science\\_center\\_objects=0#qt-science\\_center\\_objects](https://www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/science/el-ciclo-del-agua-water-cycle-spanish?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects).

WHITE, Frank: «The overview effect- A study of the impact of space exploration on individual and social awareness», *Space manufacturing 6 Nonterrestrial resources, biosciences, and space engineering*, (1987), 120-125.



## IV. LA VIDA Y EL AGUA

**Andrés Arias,\* Antonio Torralba-Burrial\*\* y  
Belén López Martínez\***

\* Departamento de Biología de Organismos y Sistemas,  
Universidad de Oviedo

\*\* Departamento de Ciencias de la Educación e Instituto de Recursos  
Naturales y Ordenación del Territorio (Indurot),  
Universidad de Oviedo

### INTRODUCCIÓN

La evolución de la vida está ligada al agua desde su origen. De hecho, durante mucho tiempo se pensó que, en el agua o en medios acuosos, podía originarse vida una y otra vez de forma espontánea, y el agua, de una forma u otra, fue parte principal de los tres siglos (XVII-XIX) de sucesivos experimentos que acabaron desterrando las teorías de la generación espontánea continua de la vida.<sup>1</sup> Y, no obstante, la vida sí surgió en el agua, aunque no en las condiciones actuales. Charles Darwin ya elucubraba sobre las condiciones que podrían haber tenido las charcas calientes de la Tierra primitiva para haber podido desarrollarse la vida en ellas, y recientemente se sigue discutiendo sobre las opciones de estas charcas cálidas y las surgencias hidrotermales para las primeras moléculas de ARN;<sup>2</sup> en todo caso, asociadas al agua. Como se vio en el capítulo

---

<sup>1</sup> Martínez y Arsuaga, 2002.

<sup>2</sup> Pearce, Pudritz, Semenov y Henning, 2017.

anterior,<sup>3</sup> en el agua apareció el antepasado común a todos los seres vivos actuales (abreviado LUCA, por las siglas de *Last Universal Common Ancestor*) algo antes de los fósiles más antiguos conocidos, de unos 3500 millones de años. Representaría pues las primeras células procariotas. Y en el agua se desarrolló la mayor parte de su historia, puesto que la vida tardó unos 3000 millones de años en salir del agua y empezar a colonizar las tierras emergidas.

Los cambios más importantes, la evolución hacia el surgimiento de los principales arquetipos de seres vivos, ocurrieron también en un ambiente acuático. Así, de los 35 filos en los que clasificamos a los animales, 34 han surgido en ambientes acuáticos, y el único del que solo hay registradas especies terrestres actuales, los onicóforos, está limitado a hábitats con una humedad muy elevada y posiblemente su origen también ha sido acuático. Y las adaptaciones a la vida, en cuanto a su gradual independencia del agua exterior, han generado la amplia biodiversidad a la que nos encontramos más acostumbrados. En cuanto a las plantas, han sido precisamente la progresiva conquista de la tierra emergida y esa independencia paulatina del agua exterior las que han marcado las principales divisiones reconocidas. Así, seis divisiones de plantas son exclusivas de ambientes terrestres (antocerotófitos, psilófitas, ginkgófitas, gnetófitas, cica-dófitas y coniferófitas), si bien las dos primeras requieren hábitats con agua libre para la fecundación.<sup>4</sup> En este capítulo vamos a seguir precisamente la evolución de la vida desde la perspectiva de su relación con el agua.

#### LUCA EVOLUCIONA, SE DIVERSIFICA EN EL AGUA Y SUS DESCENDIENTES LIBERAN OXÍGENO

El paso desde la primera célula, LUCA, hasta la diversidad actual no está claro. Como sería de esperar desde un inicio simple, se han ido alcanzando en unos casos nuevas formas de complejidad durante la evolución, al tiempo que otros organismos se han diversificado dentro del mismo grado de complejidad. Actualmente se considera que los seres vivos pertenecen a tres dominios distintos, arqueas, bacterias y eucariotas, de los cuales no presentan núcleo definido por una membrana los dos primeros, frente al último que sí. Esta primera desigualdad indica precisamente diferencias de complejidad, tanto de la estructura interna de la célula, como derivadas, también de tamaño (las células eucarióticas son mayores que las procariotas) y la posibilidad de originar organismos

---

<sup>3</sup> García Moreno, 2022.

<sup>4</sup> Moss, 2010.

verdaderamente pluricelulares (distintos de las colonias de células procariotas). Este planteamiento de los tres dominios implica categorizar a los seres vivos en, al menos, siete reinos, conformando los dos primeros dominios sendos reinos, y correspondiéndose con los eucariotas los cinco restantes (protozoos, cromistas, plantas, hongos y animales).<sup>5</sup> Las rutas de manejo de información y los ribosomas más semejantes entre las arqueas y los eucariotas parece determinar su mayor proximidad. En todo caso, los eucariotas habrían surgido posteriormente a los otros dos, a través de una endosimbiosis seriada, como la propuesta por Lynn Margulis, al menos para dar cuenta de mitocondrias, plastos y la formación de membranas nucleares.<sup>6</sup> No se han conservado fósiles de los primeros organismos, y todos los estimados más antiguos de 3500 millones de años han resultado sumamente dudosos,<sup>7</sup> por lo que las rutas metabólicas y el ADN se convierten en las únicas guías en las que apoyarnos.

Dentro de los procariotas, los heterótrofos consumen materia orgánica, mientras que los autótrofos generan su propia materia orgánica a partir de materia inorgánica (generalmente dióxido de carbono). No todos los autótrofos lo hacen de la misma forma, sino que en unos casos obtienen la energía de las propias reacciones químicas (quimiotrofos), mientras que otros la obtienen de la luz solar (fotosintéticos). Existen quimiosintéticos que emplean en el proceso sulfuro de hidrógeno; otros, amoníaco, o varios compuestos de hierro (de hecho, asignaron a unas bacterias del hierro de surgencias hidrotermales marinas unos dudosos fósiles de hace 3800 millones de años).<sup>8</sup> También hay organismos fotosintéticos que emplean sulfuro de hidrógeno, mientras que otros emplean la molécula objeto de este libro, el agua. Esto es, ya no solo había bacterias capaces de sintetizar materia orgánica empleando el hidrógeno del sulfuro de hidrógeno (y liberando el azufre), sino que surgieron otras que empleaban hidrógeno del agua, liberando oxígeno. Esas bacterias reciben el nombre de cianobacterias y, al contrario que otras bacterias, sus colonias pueden ser visibles a simple vista, bien formando tapetes microbianos de varias capas sobre el barro de zonas húmedas, bien formando unas estructuras mucilaginosas en el agua dulce o en ambientes terrestres algo húmedos (por ejemplo, *Nostoc*).

---

<sup>5</sup> Ruggiero, Gordon, Orrell, Bailly, Bourgoin, Brusca... y Kirk, 2015.

<sup>6</sup> Archibald, 2015.

<sup>7</sup> Javaux, 2019.

<sup>8</sup> Dodd, Papineau, Grenne, Slack, Rittner, Pirajno... y Little, 2017.

Las cianobacterias también pueden acabar generando rocas sedimentarias, que se denominan estromatolitos y pueden observarse en la actualidad, así como fósiles. De hecho, hay estromatolitos fósiles en Pilbara (Australia), y en otros lugares del mundo, de hace casi 3500 millones de años, y en el registro fósil se ha encontrado variedad de estromatolitos de distintos hábitats acuáticos más recientes (Figura 1),<sup>9</sup> mostrando así evolución y adaptación. En los estromatolitos actuales, así como en los tapetes microbianos, hay tanto organismos autótrofos como heterótrofos, lo que sería también esperable en su versión pretérita. Su acción continuada representaba una ventaja competitiva, ya que el oxígeno liberado resultaba tóxico para los organismos no resistentes. Hace unos 2500 millones de años, el oxígeno producido por estos procariotas tanto en los estromatolitos como probablemente por cianobacterias libres cambió las condiciones existentes en las aguas someras.<sup>10</sup> Parte había estado formando óxidos de hierro, combinado en otras reacciones químicas, o escapado a la atmósfera, pero ya se estaba produciendo lo suficiente para oxigenar las aguas circundantes. Y en los 500 millones de años posteriores oxigenó la superficie del planeta y la atmósfera. Además, una pequeña parte de ese oxígeno ( $O_2$ ) acabó transformándose en la parte alta de la atmósfera en ozono ( $O_3$ ), filtrando parcialmente los rayos ultravioletas, dañinos para la vida. La producción de oxígeno en grandes cantidades a partir del agua se trató del mayor cambio ambiental planetario y generó nuevos nichos evolutivos.

#### **SURGIMIENTO DE LOS EUCARIOTAS EN EL AGUA**

El paso entre procariotas y eucariotas no fue lineal, sino que parece que se produjo una simbiosis entre linajes distintos, esto es, organismos que no pertenecían a la misma línea de descendencia acaban juntándose, cooperando, de alguna manera, y conformando un linaje distinto a los anteriores. Las nuevas células, eucariotas, presentan un núcleo rodeado por una membrana, así como distintos orgánulos celulares, membranosos. En procariotas, sí que es factible un intercambio de genes entre linajes muy distintos, a través por ejemplo de los plásmidos, pero en este caso estamos ante la incorporación de un organismo en otro, dando lugar a la aparición de un nuevo nivel de complejidad en la vida. Atendiendo a esta complejidad, las diferencias entre procariotas y eucariotas

---

<sup>9</sup> Fortey, 1997.

<sup>10</sup> Cowen (2013).

son, probablemente, las más dramáticas que podemos encontrar en la evolución de la vida.<sup>11</sup>



Figura 1. Estromatolitos. Trombolitos en el Parque Nacional de Yalgorup, Australia - Adaptado de Wikimedia Commons- (izquierda).

Estromatolito fósil del desierto del Sahara, Marruecos (derecha).

Parece ser que la simbiosis se produjo entre alfa-proteobacterias que darían lugar a mitocondrias, y arqueas de Asgard que serían las hospedadoras de las primeras. Con este nombre de reminiscencias mitológicas nórdicas se define a unas arqueas de sedimentos acuáticos encontradas primeramente en las cercanías de unas surgencias hidrotermales marinas, denominadas *Castillo de Loki*, y situadas en el Atlántico, entre Noruega y Groenlandia. Dentro de ellas, precisamente serían las arqueas de Loki, o *Lokiarcheota*, las candidatas a esa simbiosis que daría lugar a los eucariotas, atendiendo a datos genómicos que muestran su relativa complejidad celular y similitudes con los genomas eucariotas.<sup>12, 13</sup> Estos primeros eucariotas (LUCA o último antecesor común de los eucariotas) se piensa habrían vivido hace alrededor de 1866-1679 millones de años, y tendrían un aspecto similar a un ameboide desnudo,<sup>14</sup> tal vez con

<sup>11</sup> Margulis and Sagan, 1986.

<sup>12</sup> Zaremba-Niedzwiedzka, Caceres, Saw, Bäckström, Juzokaite, Vancaester... y Ettema, 2017.

<sup>13</sup> Eme, Spang, Lombard, Stairs y Ettema, 2017.

<sup>14</sup> Butterfield, 2015.

dos flagelos para moverse en el agua.<sup>15</sup> No obstante, se trata de una morfología poco propicia para dejar fósiles, siendo los primeros fósiles de eucariotas los de un alga pluricelular de 1870 millones de años, *Grypania* (de filiación no resuelta y presenta grandes parecidos con las cianobacterias) y el protista no asignado a grupo, *Tappania* (1630 millones de años, India y China).<sup>16</sup>

Los grupos basales de eucariotas son muy variados, con relaciones complejas y simbiosis, convergencias y radiaciones evolutivas, que tuvieron lugar en el agua. El incremento de la movilidad, la capacidad de obtener energía a partir de la luz solar, la forma de obtener y generar materia orgánica, fueron definiendo los distintos grupos de eucariotas basales (protozoos y cromistas, si bien análisis meramente genómicos generan muchos más grupos basales),<sup>17</sup> con afinidades posteriores con los reinos pluricelulares que nos resultan más conocidos (hongos, plantas, animales).

Los protozoos son organismos unicelulares y están íntimamente asociados al agua. Fueron descubiertos y descritos por primera vez por Anton van Leeuwenhoek en el siglo XVII en el agua, concretamente en el agua de un lago. Con sus microscopios iniciales, Leeuwenhoek describió estos pequeños seres (*dier-tgens*, pequeños animales, en holandés, *animalcules* en traducciones iniciales), más pequeños que todos los que se habían descrito hasta el momento, y permitiendo que la Biología comenzara a mirar hacia la microbiología, preguntándose por esos seres algo difíciles de clasificar en las categorías tradicionales de animales y vegetales y que resultaban invisibles al ojo humano desnudo. Los protozoos actualmente abarcan algunos grupos distintos mientras que otros pasaron a ser considerados cromistas. Dentro de los protozoos, que mantienen su parafilia, se encuentran los euglenozoos (euglenas, que habrían incorporado de forma secundaria plastos de un alga verde, tripanosomas y Bonodida), excavata (loukooos, metamonadas y percolooos) y sarcomastigotas (amebas, coanoflagelados, microsporidios y sulcozoos).<sup>18</sup>

Los cromistas agruparían algas unicelulares con cloroplastos procedentes de endosimbiosis secundarias (o terciarias) desde algas rojas (que fueron incluidas en diatomeas, cocolitofóridos, dinoflagelados y algas pardas en los océanos del Mesozoico) o verdes (de donde fueron incorporadas en los

---

<sup>15</sup> Derelle, Torruella, Klimeš, Brinkmann, Kim, Vlček... y Eliáš, 2015.

<sup>16</sup> Butterfield, 2015.

<sup>17</sup> Burki, Roger, Brown and Simpson, 2020.

<sup>18</sup> Ruggiero, Gordon, Orrell, Bailly, Bourgoïn, Brusca... y Kirk, 2015.

océanos del Paleozoico, Ediacara y Criogénico).<sup>19</sup> Entre esas algas pardas estarían los cromistas de mayor tamaño, alcanzando decenas de metros en los bosques de laminarias marinas. Además, también incluye a los Pseudofungi, y a los anteriormente considerados protozoos *Heliozoa*, miozoos, ciliados, esporozoos, foraminíferos y radiolarios, entre otros. Numerosos y variados grupos, parafiléticos según casos, que incluyen en sus subdivisiones algunos anteriormente considerados vegetales y otros animales (sin que se correspondan tampoco con dos clados concretos). Mirando en detalle los árboles filogenéticos actuales puede dar algo de vértigo, y probablemente sus relaciones sean modificadas en los próximos años, pero los patrones siguen resultando reconocibles viéndolos desde la suficiente perspectiva.<sup>20</sup> En todo caso, se trata de grupos que permanecen en el agua, en ambientes muy húmedos, o son parásitos de otros organismos.

#### PREPARANDO EL ACCESO VEGETAL A LA TIERRA

Anteriormente incluidas dentro del cajón de sastre de los protistas (conjunto de eucariotas unicelulares con afinidades vegetales o animales), las algas se integran actualmente en el reino de las plantas.<sup>21</sup> Se trataría, en efecto, de las primeras células vegetales, formadas por endosimbiosis al incorporar cianobacterias a protistas, y dichas cianobacterias acabarían originando los cloroplastos vegetales. Con tres linajes distintos, glaucobiontes, rodobiontes (algas rojas) y clorobiontes (algas verdes). Ya hemos comentado el caso de *Grypania*, fósil considerado un alga pluricelular de 1870 millones de años, pero no asignado a grupo. Por el contrario, *Bangiomorpha* (unos 1200 millones de años) sí que puede ser asignado a uno de esos grupos, las algas rojas,<sup>22</sup> y habría que esperar hasta hace 1000 millones de años para encontrar fósiles de algas verdes (si bien ya macroscópicos, pluricelulares y con células diferenciadas: *Proterocladus*).<sup>23</sup> Los demás grupos de algas provendrían de sucesivas endosimbiosis secundarias con otros eucariotas heterótrofos,<sup>24</sup> posteriores, por tanto, y quedarían asignados como hemos visto con anterioridad a los cromistas.

---

<sup>19</sup> Keeling, 2013.

<sup>20</sup> Hinchliff, Smith, Allman, Burleigh, Chaudhary, Coghill... y Cranston, 2015.

<sup>21</sup> Ruggiero, Gordon, Orrell, Bailly, Bourgoin, Brusca... y Kirk, 2015.

<sup>22</sup> Butterfield, 2015.

<sup>23</sup> Tang, Pang, Yuan, y Xiao, 2020.

<sup>24</sup> Site, Weiler, Kadereit, Bresinsky y Krörner, 2002.

Hace unos 450 millones de años aparecieron los carófitos, algas verdes de agua dulce como las actuales *Spirogyra* y *Chara*, emparentadas con las plantas terrestres. En el caso de las carófitas, se ha alcanzado una mayor complejidad que en el resto de las algas verdes: sus talos presentan una división regular, con discos nodales y ejes laterales ramificados, y con estructuras reproductoras características, que habitan desde aguas salobres a dulces, en ríos y charcas. Precisamente en el borde de estas aguas dulces fue desde donde comenzaron a conquistar la tierra las plantas. De hecho, se ha expuesto que esas algas verdes podrían haber ocupado hábitats temporales y haber sido resistentes a la desecación, pudiendo además generar unas primeras cutículas para reducir la desecación, si bien de no mucha eficiencia,<sup>25</sup> como veremos más adelante.

#### **DONDE TAMBIÉN SE ENCUENTRAN LOS HONGOS**

Todavía no se tiene claro si el último antecesor común de los hongos (*Fungi*) vivía en los mares (solo se conocen unas pocas especies de hongos marinos) o en el agua dulce,<sup>26</sup> pero sí que las principales radiaciones han sido terrestres.<sup>27</sup> En todo caso, hay registros fósiles de finales del Precámbrico o principios del Paleozoico, y los grupos principales han sido encontrados en el Devónico y Carbonífero, con radiaciones importantes asociadas a las relaciones simbióticas con plantas.<sup>28</sup> Los líquenes, hongos con algas simbiotes, que presentan especies con gran capacidad para colonizar y empezar a degradar roca desnuda, incluso en condiciones de poca humedad, parece que no surgieron hasta después de que las plantas empezaran a colonizar las tierras emergidas.<sup>29</sup>

#### **ORIGEN DE LOS PRIMEROS ANIMALES O METAZOOS**

Durante encuentros coloniales entre protozoos flagelados ancestrales se empezó a esbozar un sistema que consistía en un perfeccionamiento de la «conjugación», que es la fusión de dos células de una especie para formar una nueva con una carga genética doble, consecuencia de la fusión de los dos núcleos celulares en uno.<sup>30</sup> Aparece así un organismo con un patrimonio genético

---

<sup>25</sup> Graham y Gray, 2001.

<sup>26</sup> James, Kauff, Schoch, Matheny, Hofstetter, Cox y Vilgalys, 2006.

<sup>27</sup> Carr y Baldauf, 2011.

<sup>28</sup> Tripathi, 2011.

<sup>29</sup> Nelsen, Lücking, Boyce, Lumbsch y Ree, 2020.

<sup>30</sup> Massa, 2011.

diploide ( $2n$ ). Este hecho representó un gran avance para la vida, ya que, si una copia del material genético se daña, la supervivencia del individuo estaría garantizada por la presencia de una segunda copia intacta.<sup>31</sup> Esta existencia diploide con meiosis gamética (ciclo cromosómico diplobióntico), unida a la pluricelularidad, son dos de las características fundamentales (diagnósticas) de los organismos conocidos como animales o metazoos. Otras características propias de estos son la posesión de una primera etapa de desarrollo embrionario común (el estadio de blástula, etapa embrionaria con una única capa de células), la capacidad para formar una proteína exclusiva de los animales, el colágeno, y que están, generalmente, dotados de capacidad de movimiento y sensibilidad.<sup>32, 33</sup>

Tradicionalmente, se ha considerado que hace unos 550 millones de años en los mares primitivos, la vida pluricelular se diversificó en los primeros animales en un fenómeno conocido como «Explosión Cámbrica» y que ha quedado plasmado en el registro fósil de algunos yacimientos, entre los que destaca el famoso yacimiento de Burgess (o Burgess-Shale), descubierto en 1909 por C. D. Walcott en la Columbia Británica (Canadá).<sup>34, 35</sup> La mayor parte de los fósiles de la fauna de Burgess son artrópodos acorazados, aunque también se han encontrado formas ligeramente esqueletizadas de esponjas, moluscos, equinodermos, gusanos anélidos y priapúlidos y otras que no pueden ser clasificadas entre los grupos de animales modernos.<sup>36</sup> En un periodo de la historia de la Tierra anterior, conocido como *Vendianse* o *Ediacariense*, se han encontrado evidencias fósiles en forma de impresiones o moldes de una gran diversidad de animales sin estructuras esqueléticas datados de hace 580 a 560 millones de años.<sup>37</sup> Entre estos animales, conocidos como la «fauna de Ediacara», por las colinas del Sur de Australia donde R. C. Springg encontró el yacimiento en 1949, parecen encontrarse posibles cnidarios (medusas y plumas de mar), gusanos de tipo anelidiano, artrópodos y otros. Para algunos autores, como el paleontólogo alemán Adolf Seilacher, algunos organismos ediacáricos como los similares a cnidarios, no eran tales en realidad, sino que representarían un grupo totalmente distinto y no presente actualmente. Este

---

<sup>31</sup> *Idem.*

<sup>32</sup> *Idem.*

<sup>33</sup> Hickman, Roberts y Larson, 2018.

<sup>34</sup> Massa, 2011.

<sup>35</sup> Gould, 1993.

<sup>36</sup> *Idem.*

<sup>37</sup> Gould, 1993.

grupo, denominado el «Jardín de Ediacara» o «Vendobionta» estaría constituido por formas sin esqueleto con apariencia acolchada, capacidad fotosintética y es interpretado como un experimento fallido de la evolución. Sin embargo, el «reloj molecular», metodología de datación que se basa en el estudio de la acumulación de mutaciones regulares a lo largo del tiempo, parece indicar que los metazoos aparecieron mucho antes, hace unos 1200 millones de años.<sup>38</sup> Por tanto, parece probable que los primeros animales surgieran en tiempos precámbricos, pero que al carecer de partes duras (esqueléticas), no habrían conseguido fosilizar fácilmente, lo que explicaría su ausencia en el registro fósil de esa época.<sup>39</sup> Si esto es así, la «Explosión Cámbrica» sería un fenómeno solo aparente de radiación evolutiva caracterizado por la aparición de animales con esqueleto, que pudieron fosilizar y conservarse en el tiempo. Sea como fuere, pertenecientes a este periodo, se han encontrado prácticamente la gran mayoría de los filos o grupos animales existentes en la actualidad.<sup>40</sup>

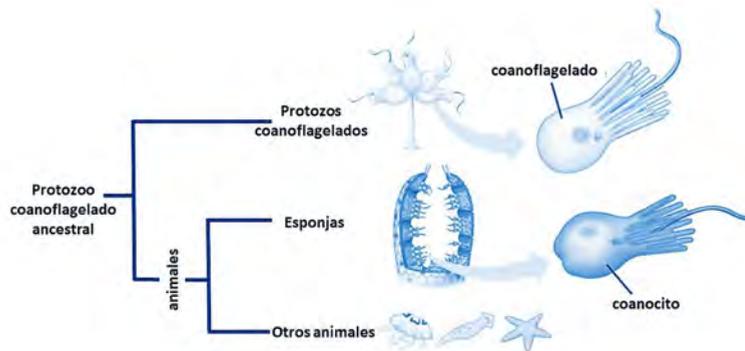


Figura 2. Relaciones filogenéticas de los protozoos coanoflagelados con los animales. Modificado de Pearse Education Inc. 2008.

El origen de los animales o metazoos a partir de un antecesor unicelular es quizá una de las cuestiones filogenéticas más enigmáticas. La mayoría de las pruebas actuales apuntan que los metazoos surgieron a partir de un protozoo coanoflagelado ancestral (Figura 2).<sup>41</sup> Estos protozoos flagelados son

<sup>38</sup> Massa, 2011.

<sup>39</sup> *Idem.*

<sup>40</sup> Hickman, Roberts y Larson, 2018.

<sup>41</sup> *Idem.*

considerados como el grupo hermano de los metazoos y comparten una característica fundamental con un filo de animales basales (las esponjas o poríferos), que es la posesión de células con collar monoflageladas, esencialmente idénticas a los coanocitos (células exclusivas de esponjas). La versión actual de la denominada «teoría colonial», originalmente propuesta por Haeckel en 1874, postula que las células de un protozoo coanoflagelado primitivo no se separaron después de dividirse por mitosis y permanecieron unidas formando una colonia de células que, con el tiempo, se fueron especializando en diferentes funciones (células somáticas, reproductoras...) y dieron lugar a un organismo multicelular ancestral similar a una esponja (Figura 2).<sup>42</sup>

### **LAS ESPONJAS**

Se cree que las esponjas, también conocidas como poríferos, fueron uno de los primeros grupos animales que poblaron los mares precámbricos. Las esponjas tienen una diversidad actual de unas 15 000 especies, los adultos son sésiles (viven fijos al sustrato) y son mayoritariamente marinas, solo el 1 % se encuentra en agua dulce.<sup>43</sup> Son animales con un nivel de organización celular muy simple, la mayoría carecen de verdaderos tejidos (es decir, sus células no presentan uniones estrechas entre ellas y carecen de membrana basal) y son asimétricos o bien poseen una simetría radial superficial (como una adaptación a su modo de vida). Se alimentan por filtración y tienen el cuerpo perforado por poros (de ahí su nombre científico *Porifera* «portadores de poros»), con canales y cámaras que sirven para el paso del agua. Presentan células totipotentes dispuestas en dos capas: pinacodermo (células aplanadas de revestimiento) y coanodermo formado por los coanocitos (células monoflageladas con collar que provocan corrientes de agua). Entre ambas capas existe una matriz interna gelatinosa mesohilo (o mesoglea) siempre con amebocitos y, normalmente, con elementos esqueléticos. Pueden presentar un endoesqueleto inorgánico, formado por espículas de carbonato cálcico o dióxido de sílice u orgánico formado por fibras de colágeno diversamente modificado. Las esponjas carecen de aparato digestivo (la digestión es intracelular), de sistema excretor (excreción y osmoregulación por difusión) y de un sistema nervioso desarrollado. Combinan la reproducción sexual (a través de células gaméticas especializadas, línea germinal) y asexual (a partir de células del cuerpo o somáticas) y la mayoría de las

---

<sup>42</sup> *Idem.*

<sup>43</sup> *Idem.*

especies conocidas son hermafroditas (un mismo individuo es capaz de generar tanto gametos masculinos como femeninos). Al ser organismos filtradores, tienden a aumentar (mejorar) la eficiencia del filtrado, lo que se consigue gracias al aumento del coanodermo (conjunto de coanocitos), que es la superficie que actúa como filtro, y que se hace cada vez más compleja aumentando el número de estas células. Así, se pueden encontrar tres modelos de organización corporal: 1) «asconoide», el más simple y el más común en las especies primitivas y en las fósiles; 2) «siconoide», el primer estado de plegamiento del coanodermo, y 3) «leuconoide», la condición más compleja con cámaras de coanocitos aisladas, sistema de canales y engrosamiento del mesohilo (es el más eficiente y el más común en las especies actuales).<sup>44</sup>

#### CNIDARIOS, CTENÓFOROS Y LA SIMETRÍA RADIAL

El siguiente hito evolutivo en la historia de los animales es la aparición de los primeros animales con verdaderos tejidos (con uniones estrechas entre células y membrana basal), también conocidos como «eumetazoos». Entre los primeros eumetazoos, destacan dos filos animales que tradicionalmente han sido agrupados bajo el nombre de «radiados», por poseer un cuerpo con simetría de tipo radial o birradial, los cnidarios (Cnidaria) y los ctenóforos (Ctenophora, conocidos comúnmente como «nueces de mar»). Este tipo de simetría aparece asociada a una vida sedentaria, incluso sésil, o que se deja llevar a la deriva por las corrientes marinas, contactando por todos los lados del cuerpo con el ambiente. Los cnidarios pudieron haber evolucionado a partir de una larva primitiva de una esponja tipo homoescleromorfa.<sup>45</sup> Son animales con orgánulos celulares urticantes, llamados nematocistos o cnidos tanto en la epidermis como en la gastrodermis, lo que constituye una de las características más distintas del grupo. Los cnidarios son animales dimórficos, es decir presentan dos tipos básicos de individuos: el pólipo y la medusa. Poseen un cuerpo con dos capas de células (diblasticos), epidermis (externa) y gastrodermis (interna), con una estructura entre ellas llamada *mesoglea*. Su tubo digestivo (cavidad gastrovacular) es ciego o incompleto, con una única abertura que comunica con el exterior que, aunque recibe el nombre de «boca», realiza las funciones de boca y ano. Presentan además otras innovaciones importantes, que se mantendrán en el resto de los animales: 1) la aparición de un sistema

---

<sup>44</sup> *Idem.*

<sup>45</sup> Nielsen, 2008.

nervioso, conocido como plexo nervioso con sinapsis simétricas, conducción difusa y con algunos órganos sensoriales, y 2) aparición de musculatura de tipo epitelio-muscular. Carecen de sistema excretor, respiratorio y de cavidad celómica. Combinan mecanismos de reproducción asexual y sexual. Los pólipos se reproducen asexualmente, mientras que las medusas, por el contrario, lo hacen de forma sexual. La fecundación es externa en agua de mar circundante y su desarrollo es de tipo indirecto por medio de una larva llamada «plánula». A este grupo pertenecen las medusas, las anémonas, los corales, las plumas de mar y las gorgonias o abanicos de mar, entre otros.

Los ctenóforos, son el grupo de animales exclusivamente marinos, que forman junto con los cnidarios el clado de los radiados. Son organismos complejos, con un tubo digestivo completo y funcionalmente tripartido (zona de ingestión, zona de distribución y zona de eliminación de residuos), como el de otros animales más avanzados.<sup>46</sup> Presentan una mesoglea muy desarrollada, que es considerada por algunos especialistas como derivada de una tercera hoja embrionaria (mesodermo).<sup>47</sup> En los últimos años, gracias a los nuevos estudios moleculares y filogenéticos, una corriente de pensamiento científico está empezando a considerar a los ctenóforos como un grupo basal respecto al resto de los animales, que pudo haber surgido incluso antes que las esponjas.<sup>48</sup>

### LOS GUSANOS PLANOS Y LA APARICIÓN DE LA BILATERALIDAD

Con la aparición de los gusanos planos (acelomorfos y platelmintos), gracias a su modo de vida más activo a la hora de buscar alimento, refugio o pareja, surge un nuevo plan corporal que se va a mantener en todos los restantes grupos animales actuales, la bilateralidad. Este nuevo plan estructural está caracterizado por la presencia de un único plano de simetría bilateral (denominado plano sagital) que implica que las mitades izquierda y derecha del animal son imágenes especulares la una de la otra. El plan corporal de los animales bilaterales está asociado a la adquisición de una tercera hoja embrionaria (blastodérmica), denominada *mesodermo*, lo que hace que se los conozca también como animales triblásticos. La bilateralidad está relacionada con la tendencia de estos animales a mantener el mismo extremo del cuerpo hacia delante y la misma superficie hacia abajo mientras nadan o se arrastran. Esto genera que

---

<sup>46</sup> Presnell, Vandepas, Warren, Swalla, Amemiya y Browne, 2016.

<sup>47</sup> Nielsen, 2008.

<sup>48</sup> Whelan, Kocot, Moroz, Mukherjee, Williams, Paulay, Moroz y Halanych, 2017.

su sistema nervioso y sus órganos de los sentidos tiendan a concentrarse en el extremo anterior (el conductor, el que normalmente va por delante). De igual modo, la boca también tiende a ubicarse en ese mismo extremo anterior, lo que facilita la ingestión del alimento que ha sido previamente detectado por los órganos sensoriales de la parte delantera. Así, se explica que la bilateralidad esté estrechamente unida a otro proceso muy importante, la aparición de una cabeza o proceso de cefalización.

Los gusanos acelomorfos son de pequeño tamaño (normalmente menores de 5 mm), habitan en ambientes marinos o estuarinos y la mayoría de las especies del grupo son de vida libre. Actualmente, son considerados el linaje más antiguo dentro de los animales bilaterales (Figura 3). Con relación a los platelmintos, uno de sus principales avances con respecto a los animales diblásticos, es que han desarrollado un sistema excretor, formado por unas estructuras especializadas denominadas *células en llama* que están conectadas por túbulos colectores formando una red nefridial que terminan en uno o varios poros que vierten al exterior.

### **MOLUSCOS, ANÉLIDOS Y OTROS INVERTEBRADOS MARINOS**

Tras su aparición a principios del Cámbrico, algunos grupos animales como los anélidos y los moluscos se diversificaron en un revoltijo de nuevas formas de vida que marcó el final del Cámbrico y el principio del Ordovícico. Esta explosión de biodiversidad multiplicó por tres el número de especies conocidas en un lapso de unos 50 millones de años. Aparecieron nuevos grupos de moluscos como los gasterópodos y los cefalópodos, y estos últimos elevaron y afilaron sus conchas, las tabicaron y rellenaron de gas, pudiendo así abandonar la vida bentónica (en el fondo marino) y colonizar la columna de agua (medio nectónico o nécton).<sup>49</sup> Otro de los avances más significativos que experimentaron estos grupos fue la aparición de un sistema circulatorio, con corazones que bombean el líquido circulatorio o sangre que discurre por los vasos sanguíneos y senos y transporta oxígeno gracias a la posesión de diferentes pigmentos respiratorios (hemoglobina, hemocianina, clorocruorina etc.). También surgen nuevas estructuras respiratorias como las branquias o ctenidios.<sup>50</sup>

Los braquiópodos articulados, un grupo de invertebrados con concha bivalva, se expandieron en algunos hábitats marinos y un grupo de artrópodos,

---

<sup>49</sup> Gould, 1993.

<sup>50</sup> Hickman, Roberts y Larson, 2018.

los delgados ostrácodos calcáreos, radiaron en diversas formas y modalidades de vida como filtradores (suspensívoros) y carroñeros.<sup>51</sup>

A principios del Ordovícico apareció un nuevo grupo de animales, los briozoos o «animales musgo», pequeños invertebrados filtradores coloniales que forman tapices sobre diferentes sustratos duros marinos y que eran desconocidos en el periodo Cámbrico.<sup>52</sup> A nivel global, la ecología de las comunidades marinas se reorganizó en esta época y las especies clave se alimentaban mayoritariamente de plancton o materia orgánica en suspensión y habitaban sobre el fondo marino. Un ejemplo de estas especies fueron los corales que formaban grandes arrecifes tropicales, que a su vez albergaban una gran diversidad de fauna marina asociada.<sup>53</sup>

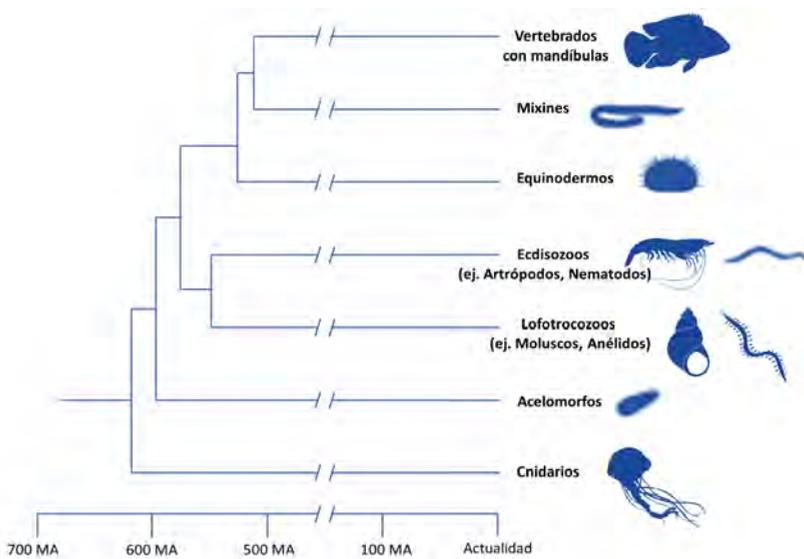


Figura 3. Árbol filogenético simplificado de la vida animal.

### LOS EQUINODERMOS Y LOS PRIMEROS CORDADOS

Los equinodermos (del griego, *echinos*, espina, y *dermos*, piel) son un grupo de animales exclusivamente marinos que engloba a los lirios de mar, las estrellas, las ofiuras, los pepinos y erizos de mar. Una de sus características más evidentes

<sup>51</sup> Gould, 1993.

<sup>52</sup> *Idem.*

<sup>53</sup> *Idem.*

es su cuerpo con simetría radial pentámera, aunque esta es un rasgo adquirido secundariamente como una adaptación al modo de vida sésil y sedentario de los primeros equinodermos que fueron los lirios de mar (crinoideos).<sup>54, 55</sup> Los antepasados inmediatos de los equinodermos, así como sus larvas tempranas, tienen simetría bilateral. Incluso algunos grupos, como los pepinos de mar, han vuelto a superponer una simetría bilateral superficial sobre la simetría radial que aún se les puede apreciar en su organización interna (Figura 4). Los equinodermos, gracias a su endoesqueleto, que puede ser continuo, formado por placas unidas (por ejemplo, erizos de mar), o formado por pequeños osículos o escleritos calcáreos (por ejemplo, estrellas de mar), tienen un buen registro fósil. Estos animales invertebrados experimentaron una gran radiación evolutiva en el Cámbrico. Ya en el Ordovícico se pueden reconocer representantes de todos los grupos actuales a excepción de los pepinos de mar u holoturias que aparecieron posteriormente.



Figura 4. Equinodermos. Crinoideo fósil de la especie *Cyathocrinites iowensis* del Carbonífero Misisipiense, Indiana, EE. UU. (izquierda). Estrella de mar actual, *Marthasterias glacialis*, en el intermareal rocoso del mar Cantábrico (derecha).

<sup>54</sup> *Idem.*

<sup>55</sup> Hickman, Roberts y Larson, 2018.

Los cordados son un tipo de animales, entre los que nos encontramos los humanos, caracterizados por la posesión de una varilla flexible de sostén que discurre por la parte dorsal del cuerpo, denominada notocorda.<sup>56</sup> Los resultados obtenidos por los estudios morfológicos, anatómicos, embriológicos y moleculares sugieren que el grupo más próximo a los cordados es el de los equinodermos. Un grupo animal fósil, los calicicordados, podría ser el eslabón intermedio entre los equinodermos y los cordados.<sup>57</sup> Actualmente, equinodermos y cordados se engloban bajo la denominación de *deuteróstomos*, un grupo de animales que comparte una característica embrionaria única: la boca definitiva del animal se forma secundariamente, sin dependencia alguna del blastoporo (abertura inicial embrionaria que comunica el futuro tubo digestivo [arquén-teron] con el exterior), el cual da lugar al ano. Por el contrario, en los animales que llamamos protóstomos (gusanos planos, moluscos y anélidos, entre otros), el blastoporo da lugar a la boca, y el ano es una neoformación.<sup>58</sup> A finales del siglo XIX, Garstang postuló una hipótesis sobre el origen de los cordados a partir de una larva de ascidia (procordado) que, aunque hoy en día parece no estar respaldada por los últimos estudios moleculares, resulta bastante verosímil. Garstang propuso que una larva móvil de una ascidia ancestral (que en esta fase de su desarrollo presenta una notocorda que posteriormente se pierde cuando se fija y se transforma en el adulto) dio lugar a los primeros cordados por un proceso de paedomorfosis (un proceso de retención de caracteres juveniles en el adulto).

#### LA APARICIÓN DE LOS PECES

Coloquialmente, el término *pez* hace referencia a un animal vertebrado acuático, que respira por medio de branquias, posee extremidades en forma de aletas y que, generalmente, presenta una piel cubierta por escamas. No obstante, desde el punto de vista zoológico es un concepto ambiguo, sin definición ni límites claros y que no tiene valor taxonómico.<sup>59</sup> Los peces son un grupo de animales que no es monofilético (del griego *mónos*, solo, único, y *phyl(o)*, raza, estirpe, origen), es decir, no reúne al antecesor común más próximo y a todos sus descendientes bajo su manto, y que podrían definirse desde un punto de

---

<sup>56</sup> Gould, 1993.

<sup>57</sup> *Idem.*

<sup>58</sup> Hickman, Roberts y Larson, 2018.

<sup>59</sup> *Idem.*

vista evolutivo como «vertebrados no tetrápodos».<sup>60</sup> Los peces son el grupo más antiguo y diverso de todos los vertebrados y es muy probable que se hayan originado a partir de un procordado primitivo (¿una larva de ascidia?) hace unos 550 millones de años en el periodo Cámbrico o incluso antes. Los primeros vertebrados fueron una constelación parafilética (del griego *para*, al lado, cerca de, y *phyl(o)*, raza, estirpe, origen) de peces sin mandíbulas (agnatos) denominados *ostracodermos* (peces acorazados actualmente extintos).<sup>61</sup> Posteriormente, un grupo de estos daría lugar a los vertebrados con mandíbulas (gnatostomados). Los agnatos actuales están solamente representados por los mixines y las lampreas, peces con cuerpo anguiliforme, sin extremidades pares y adaptados a una vida carroñera o parásita. Todos los demás peces actuales tienen aletas pares y mandíbulas, y están incluidos junto con los tetrápodos (vertebrados semi-acuáticos y terrestres) en el grupo de los gnatostomados, considerado como monofilético. Los peces con mandíbulas irrumpen en el registro fósil en el periodo Silúrico y alcanzan una gran radiación evolutiva en el Devónico, también conocido como «la era de los peces». Entre los peces gnatostomados podemos diferenciar los condriictios (tiburones, torpedos, rayas y quimeras), que tienen un esqueleto cartilaginoso y que han tenido un gran éxito evolutivo, y los peces óseos. Estos últimos se pueden dividir en dos grupos: 1) los sarcopterigios, peces con aletas lobuladas representados actualmente por el celacanto y los peces pulmonados, y que habrían dado lugar a los tetrápodos terrestres, y 2) los actinopterigios, el mayor grupo de peces marinos y de agua dulce actual, que presentan aletas radiadas y, a veces, con radios espinosos.<sup>62</sup>

#### **EL PALEOZOICO, EL ABANDONO DEL AGUA Y LAS PRINCIPALES INNOVACIONES EVOLUTIVAS**

En el Paleozoico (~540–252 millones de años) casi todas las tierras emergidas se encontraban en el hemisferio sur, desde el ecuador hasta el polo (supercontinente Gondwana). La exigua existencia de vida terrestre se limitaba a algunas cianobacterias y algas dulceacuícolas y no han proporcionado buena información sobre el clima. Se cree que comenzó siendo una época estable, de clima eminentemente oceánico y poco estacional. El efecto invernadero debido a las altas concentraciones de CO<sub>2</sub> elevó la temperatura de la superficie del

---

<sup>60</sup> *Idem.*

<sup>61</sup> *Idem.*

<sup>62</sup> *Idem.*

mar entre 20 y 25 grados centígrados. Esta situación de calentamiento pudo haberse mantenido, al menos, hasta el Silúrico (444-419 millones de años) e incluso el comienzo del Devónico (419-359 millones de años), momento en el que el nivel de los océanos alcanzó un gran máximo y se intensificó la construcción de arrecifes por parte de los corales, lo que originó la diversificación de los organismos asociados a los mismos.<sup>63</sup>

A mediados del Devónico medio (~375 millones de años) un cambio drástico en las condiciones de vida imperantes hasta ese momento estuvo detrás de la extinción en masa que hizo desaparecer al 70 % de las especies animales marinas.<sup>64</sup> Los científicos han buscado una explicación relacionada con el agotamiento de oxígeno en las aguas superficiales y la extinción de fauna asociada a los arrecifes. Sumado a ello se habría evidenciado un secuestro de carbono en los fondos oceánicos, que, unido a una significativa producción primaria de las plantas terrestres, determinó una reducción de la cantidad de CO<sub>2</sub> atmosférico. El resultado podría estar relacionado con un enfriamiento global que conllevó la formación de glaciares en las proximidades al polo sur.<sup>65</sup>

Progresivamente las plantas, los invertebrados y finalmente los vertebrados evolucionaron para adaptarse a la vida en tierra firme. Abandonar el agua supuso grandes desafíos relacionados con la exposición al aire y el propio hecho de dejar de estar cubiertos por agua. Así que, por muy húmedo que fuera el aire terrestre que los acogiera, los organismos tuvieron que encontrar mecanismos que evitaran su desecación. Los estadios de desarrollo embrionario y las primeras fases de la vida son especialmente sensibles a la pérdida de agua. Igualmente influye el tamaño del organismo: en los cuerpos de menor tamaño la vulnerabilidad a la deshidratación aumenta dada su relativa gran superficie en relación con las escasas reservas de agua. El peso también es un aspecto que considerar: en el aire los organismos pesan más que en el agua, así que el soporte del peso corporal fue una dificultad añadida en los primeros animales terrestres. Por otro lado, las temperaturas sobre la superficie de la Tierra son más extremas que en el agua y tuvieron que hacer frente a situaciones de frío y calor. En cuanto a los gases, ni el O<sub>2</sub> ni el CO<sub>2</sub> tienen las mismas propiedades en el agua que sobre la superficie terrestre, por lo que fue necesaria una transformación de los mecanismos fisiológicos de intercambio de gases. Es evidente que algunos de los sentidos, como la vista y el oído, difieren de un organismo acuático a uno

---

<sup>63</sup> Hearing, Harvey, Williams, Leng, Lamb, Wilby... y Donnadieu, 2018.

<sup>64</sup> McGhee, 1988.

<sup>65</sup> McGhee, 2005.

terrestre y, por tanto, se vieron modificados para poder adaptarse al abandono del medio acuático.<sup>66</sup>

Cabe señalar que el modo de vida terrestre supuso superar también retos ecológicos que tienen que ver con las fuentes de alimentación que están disponibles. Un ente acuático tiene a su disposición nutrientes disueltos en ese medio líquido que no son solubles en el aire. Así que para que los organismos, sobre todo los de pequeño tamaño, atravesaran esa importante barrera ecológica hacia el medio terrestre, se hicieron necesarios cambios sustanciales en el modo de alimentación.<sup>67</sup>

Es conveniente indicar que, lógicamente, todas estas adaptaciones para la vida sobre la tierra evolucionaron como adaptaciones en el agua y solo una vez que estuvieron bien establecidas allí, pudieron ser aprovechadas por los organismos para pasar largos periodos en tierra firme (por ejemplo, el pulmón de algunos peces osteíctios).

#### **EL ORIGEN DE LAS PLANTAS TERRESTRES Y LOS PRIMEROS ARTRÓPODOS**

Estamos a punto de describir el momento en el que, por primera vez, los animales van a conquistar la tierra firme, pero antes es necesario dar cuenta, aunque sea muy brevemente, de los aspectos más significativos del origen de las plantas terrestres o embriofitas. Después de todo, mucho tiempo antes de que los animales se atrevieran a dar el primer paso hacia la superficie terrestre, las plantas ya lo habían conseguido —en compañía de hongos y bacterias—. Podemos incluso decir que, sin esa primera colonización por parte de los organismos vegetales, el poblamiento de la fauna terrestre no habría sido posible y hoy nosotros no estaríamos aquí.

El organismo vegetal pionero y antepasado común de todas las plantas terrestres también tuvo que hacer frente a condiciones ambientales terrestres retadoras, debido a la sequedad, al aire, la insolación, la oscilación térmica, etc. Y, por supuesto, a un nuevo modo de alimentarse, concretamente al modo de adquirir eficazmente los nutrientes minerales. Al igual que en los animales, fueron los cambios evolutivos surgidos en el medio acuático y relacionados con su morfología y su fisiología los que permitieron hacer frente a esas nuevas circunstancias. Este antepasado común de las embriofitas fue un alga de agua dulce, genéticamente preadaptada para relacionarse con hongos y bacterias

---

<sup>66</sup> Cowen, 2013.

<sup>67</sup> Agustí, 2003.

(relaciones simbióticas),<sup>68</sup> tal y como lo hacen las plantas terrestres para capturar agua y nutrirse del suelo (por ejemplo, la asociación de las legumbres con bacterias fijadoras de nitrógeno). Por lo tanto, las bacterias que colonizaron el medio terrestre (hace aproximadamente 3200 millones de años) habrían preparado el camino para la posterior llegada de las primeras plantas a ese medio.<sup>69</sup>

En los últimos años, la aplicación de métodos filogenéticos ha puesto de manifiesto la estrecha cercanía de las embriofitas con una clase de algas, *Zygnematophyceae* (algas verdes conjugadas de agua dulce).<sup>70</sup> Los representantes actuales de estas algas son todos acuáticos excepto dos especies que, al igual que los musgos, viven en ambientes terrestres húmedos. Pues bien, se cree que el antepasado común de las embriofitas y las *Zygnematophyceae* se habría adaptado a una forma de vida terrestre y tal vez habría colonizado este medio hace más de 500 millones de años.<sup>71</sup>

No es posible conocer cuál fue el lugar que acogió por primera vez a estas plantas pioneras. Se piensa que fue en un entorno de clima cálido con lluvias estacionales, cerca de lugares donde las aguas dulces se unían con las marinas y, además, con fluctuaciones en el nivel del agua que alternaría inundaciones estacionales y sequías. Aunque parece ser que las primeras evidencias de plantas (esporas fosilizadas) proceden del Ordovícico, lo cierto es que la escasez de sus microfósiles (visibles sin necesidad de microscopio) y las dudas sobre su posición estratigráfica hacen que, para muchos autores, el registro fósil sea poco fiable. Estudios recientes basados en el reloj genético molecular –diferencias en el ADN entre las especies vivientes y las fósiles– indican un origen de las embriofitas en un intervalo Cámbrico–Ordovícico temprano. Ese grupo se divide a su vez en briófitas o plantas terrestres no vasculares (musgos, hepáticas y antoceras) y traqueófitas o plantas con sistema vascular (licopodios, helechos, gimnospermas y angiospermas). La primera cobertura vegetal que colonizó la superficie emergida correspondería a una capa de simples briófitas de tipo musgo que, como los actuales, carecían de conductos internos para el transporte del agua y los nutrientes del suelo. Las edades estimadas para las traqueófitas varían desde el Ordovícico tardío (~458 millones de años) hasta el Silúrico tardío (~427 millones de años). Estos periodos de establecimiento temprano de

---

<sup>68</sup> Delaux, Radhakrishnan, Jayaraman, Cheema, Malbreil, Volkening... y Ané, 2015.

<sup>69</sup> Martin, Uroz, y Barker, 2017.

<sup>70</sup> Delwiche y Cooper, 2015.

<sup>71</sup> Cheng, Xian, Fu, Marin, Keller, Wu... y Melkonian, 2019.

las plantas en los ecosistemas terrestres están en estrecha concordancia con las estimaciones recientes sobre el origen de los linajes de animales en ese medio.<sup>72</sup>

A partir del Devónico (~419 millones de años) las plantas ocuparon hábitats cada vez más áridos y eso fue posible gracias a que desarrollaron modos de retener el agua y proteger los estadios embrionarios de la pérdida de ese líquido.<sup>73</sup> Uno de los mayores avances fue la semilla, que es el embrión fecundado y protegido en un contenedor estanco con nutrientes que lo mantendrán hasta su posterior dispersión y germinación en un lugar adecuado. Incluso la plántula seguirá alimentándose de la misma manera hasta que sus raíces y hojas sean capaces de sostener y nutrir a la planta.<sup>74</sup>

Nadie duda de la relación entre la expansión de las plantas terrestres y la alteración radical del clima. La vegetación terrestre ha sido un elemento esencial para la evolución de nuestro planeta, contribuyendo al desgaste químico de las rocas continentales, un proceso que es clave en el ciclo del carbono y que ha regulado la atmósfera y el clima de la Tierra a lo largo de millones de años. La colonización de las plantas supuso, por ejemplo, una disminución drástica de los niveles de dióxido de carbono (un gas que tiene efecto invernadero) en la atmósfera y ello favoreció el enfriamiento global.<sup>75</sup> En definitiva, las plantas son las protagonistas de una profunda transformación del medio terrestre. Desde su aparición fueron progresivamente sentando las bases para la vida de la vasta diversidad animal que estaría por llegar a los recién enverdecidos ecosistemas.

Los animales marinos mejor preadaptados para la vida en la tierra, sin duda, fueron los artrópodos consumidores de desechos vegetales y otros artrópodos que se alimentaban de los primeros. Posiblemente llegaron a tierra firme a finales del Silúrico y se conocen principalmente por sus huellas fósiles. Había arañas, ciempiés y milpiés, colémbolos y ácaros. Algunos de ellos colonizaron, por diferentes vías, el medio aéreo, sobre todo a medida que las plantas se hacían más altas y tridimensionales.<sup>76</sup> A partir del Devónico inferior, el número de pequeños artrópodos se incrementa notablemente y se alimentan tanto de plantas muertas como vivas. A su vez, algunos de estos sirvieron de alimento para artrópodos carnívoros como las arañas primitivas.<sup>77</sup>

---

<sup>72</sup> Morris, Puttick, Clark, Edwards, Kenrick, Pressel... y Donoghue, 2018.

<sup>73</sup> Gerrienne, Gensel, Strullu-Derrien, Lardeux, Steemans y Prestianni, 2011.

<sup>74</sup> Decombeix, Meyer-Berthaud y Galtier, 2011.

<sup>75</sup> Cowen, 2013.

<sup>76</sup> Labandeira, 2007.

<sup>77</sup> Cowen, 2013.

### LOS PRIMEROS ANFIBIOS

El abandono del medio acuático y la llegada a los continentes de los vertebrados (385-360 millones de años) es una de las transiciones evolutivas más importantes. Los antepasados del primer vertebrado terrestre hacía tiempo que venían preparándose para ese gran salto. Algunos de los peces sarcopterigios como *Eusthepnotheron* (385 millones de años), *Panderichthys* (380 millones de años) o *Tiktaalik* (375 millones de años) ya poseían aletas fuertes con la estructura del quiridio (extremidad tipo de los vertebrados tetrápodos) y una interesante combinación de pulmones y branquias. Progresivamente su cuello se fue haciendo más móvil, y sus movimientos, independientes del resto del cuerpo, lo que les permitía cazar más fácilmente. Algunos peces sarcopterigios estaban adaptados a vivir en aguas someras y salobres, respiraban aire a través de una coana y de los pulmones. Su cuerpo estaba cubierto por escamas y tenían aletas lobuladas que no soportaban el peso del cuerpo, pero que les permitían desplazarse por el fondo.<sup>78,79</sup>

Algunos autores consideran que *Acanthostega* (365 millones de años) representa el tránsito de peces a tetrápodos o incluso que podría ser el primer anfibio. Otros se inclinan por *Ichtyostega* (365 millones de años), con sus pseudopatas de siete dedos y con hábitos aún más acuáticos que terrestres, aunque no todos los expertos están de acuerdo. Para otros especialistas, esa primera forma anfibia estaría representada por *Hynnerpeton* (365-360 millones de años), un carnívoro de pulmones evolucionados, y *Tulerpeton* (365 millones de años) con seis dedos y sin branquias. Los primeros anfibios pierden las escamas y tienen extremidades más fuertes con dedos. Los huesos de la mandíbula se transforman en un sistema auditivo que les permite detectar el sonido en el aire. Además, al perder las branquias la excreción del amoníaco, que es tóxico, se hace, en forma de urea, a través de los riñones.<sup>15,16</sup>

Lo que sí sabemos es que este primer tetrápodo que salió del agua lo hizo a un mundo sin competidores (aunque los artrópodos, algunos moluscos como babosas y caracoles de tierra y las plantas habían colonizado antes los continentes). Estos primeros vertebrados, lo mismo que los actuales anfibios, aún no habían desarrollado adaptaciones para vivir muy lejos del agua. Sobre todo, no eran capaces de reproducirse fuera de ella ya que, como los peces y los anfibios actuales, eran anamniotas o, lo que es lo mismo, su embrión se desarrolla sin una membrana que lo envuelva (sin amnios). Sus huevos son

---

<sup>78</sup> Zardoya, 2012.

<sup>79</sup> Agustí, 2003.

pequeños y gelatinosos y se hinchan al contacto con el agua, pero no cuentan con una barrera de protección que permita prosperar al embrión en un medio seco.<sup>80</sup> Por otro lado, la pionera toma de la tierra por parte de plantas y los artrópodos, que utilizaban a las primeras como alimento y refugio, dio lugar a un incremento de nutrientes orgánicos a orillas de las aguas y esos recursos fueron aprovechados por aquellos primeros anfibios.

A pesar de sus aparentes carencias, los antepasados de los actuales anfibios protagonizaron una importante explosión de su diversidad. De hecho, algunos, como los antracosaurios, con el tiempo fueron adquiriendo más adaptaciones terrestres y se sitúan en el origen de los saurópsidos (antiguamente reptiles y aves) y los sinápsidos (mamíferos).<sup>81, 82</sup>

#### **LOS TERÁPSIDOS DEL PÉRMICO Y EL AMBIENTE ACUOSO DEL HUEVO AMNIOTA**

Como se ha mencionado en varias ocasiones, las alteraciones en las condiciones climáticas y ambientales han sido habituales a lo largo de la historia de nuestro planeta, lo que ha influido significativamente en la aparición y desaparición de grupos de organismos terrestres.<sup>83</sup> En la última parte del periodo Carbonífero (~320 millones de años) se produce un nuevo cambio: en el supercontinente sur de Gondwana se constata una intensa glaciación que afectó a los continentes que hoy se localizan en el hemisferio sur (Sudamérica, África, Australia y la Antártida). En Laurasia, que era la agrupación de tierras al norte (actualmente Norteamérica, Europa y Asia), el clima se vuelve más continental. Es en este momento cuando surgen las primeras formas reptilianas, unos tetrápodos con cuatro extremidades a ambos lados del tronco que incorporaron una innovación fundamental: el huevo amniota (Figura 5). En este tipo de huevo el embrión crece protegido por cuatro capas extraembriónicas: 1) el corion, que es la capa más externa y en cuyo alrededor se localiza la albúmina, que es el reservorio de agua; 2) el alantoides, que es la membrana para el intercambio de gases y desechos; 3) el saco amniótico, que es el que proporciona el ambiente acuoso y que se conecta con 4) el saco vitelino, que aporta los nutrientes al embrión. Finalmente, una cáscara de carbonato cálcico protege todo el huevo, permitiendo al mismo tiempo el intercambio de gases

---

<sup>80</sup> San Mauro 2012.

<sup>81</sup> Cowen, 2013.

<sup>82</sup> Schoch, 2014.

<sup>83</sup> Hallam y Wignall, 1999.

con el medio (vapor de agua, dióxido de carbono y oxígeno).<sup>84</sup> Este exceso de protección, comparativamente con el huevo anamniota de los peces y anfibios, también está vinculado con un necesario proceso de fecundación interna que precede a la formación del huevo y que evolucionó en los primeros saurópsidos o en sus inmediatos ascendientes. Este proceso fue crítico para la independencia de los tetrápodos del medio acuático y la conquista definitiva de la superficie terrestre.<sup>19</sup>

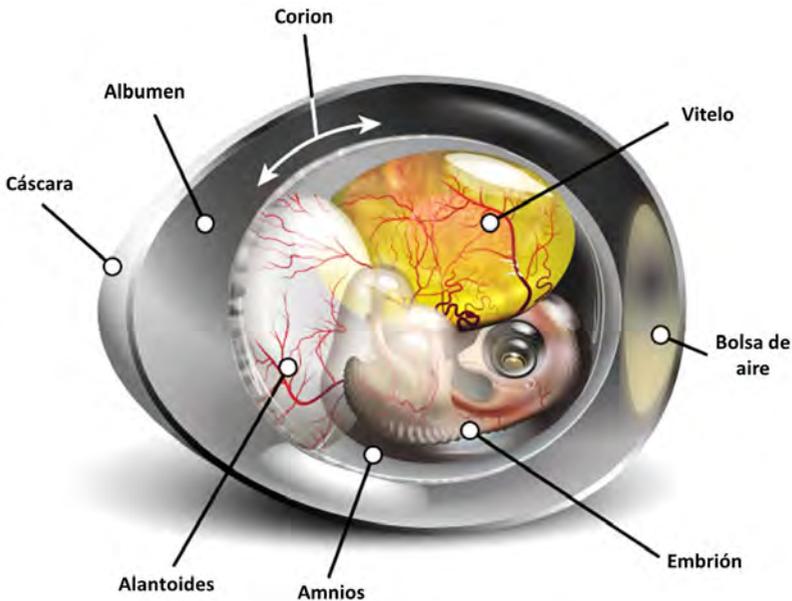


Figura.5. Esquema del huevo amniota. Adaptado de Wikimedia Commons.

A finales del Carbonífero, un calentamiento generalizado retiró los hielos polares y las temperaturas en latitudes elevadas se suavizaron. En las áreas continentales próximas al ecuador, la pluviosidad descendió y el clima se volvió más seco. Bajo estas condiciones aparecieron los saurópsidos, que, en la siguiente época, el Pérmico (~299-252 millones de años), se diversificaron. Esas innovaciones reproductoras que hemos descrito les permitieron el acceso a lugares prohibidos para los anfibios.

<sup>84</sup> Hickman, Roberts y Larson, 2006.

De entre todos los grupos de la época (hace unos 300 millones de años), solo vamos a mencionar a uno de ellos, el grupo de los pelicosaurios (sinápsidos), ya que fue ese grupo el que desarrolló una serie de adaptaciones que están en el origen de los mamíferos.<sup>85</sup> Los pelicosaurios tenían grandes crestas dorsales, como velas, que se cree tenían una función de regulación de la temperatura corporal. Su cráneo exhibía una característica fosa temporal detrás de la órbita (fenestra temporal) y una dentición heterodonta (con dientes de distintos tamaños y agrupados en zonas). Aunque es muy probable que su comienzo estuviera en Laurasia (Euroamérica), desde mediados del Pérmico estuvieron extendidos por Gondwana. A mediados del Pérmico (~275 millones de años) alguno de estos pelicosaurios dará lugar a los primeros terápsidos (o mal llamados reptiles mamíferoides), con anatomía craneal y extremidades más afines con los mamíferos; incluso algunos podían ser ya homeotermos y haber tenido pelo. Con sus mandíbulas más potentes y una mejor locomoción, desplazaron definitivamente a los demás pelicosaurios. Sin embargo, los terápsidos aún conservan muchas características reptilianas, como una mandíbula formada por varios huesos. Estos aparecen por primera vez en latitudes altas del supercontinente sur, lo que hace sospechar que tenían una termorregulación avanzada. Los mamíferos (mamaliformes, para ser exactos) evolucionaron a partir de algunos de los últimos terápsidos de finales de Triásico que sobrevivieron a uno de los mayores eventos de extinción.<sup>86</sup>

Hace 252 millones de años la gran extinción del Pérmico-Triásico (la Gran Mortandad) hizo sucumbir a la mayor parte de las especies animales terrestres y marinas (con porcentajes de extinción del 70 y 95 % respectivamente). Se trató de la mayor catástrofe ambiental detectada en el registro fósil y se sospecha que fue debida a la intensa actividad volcánica en los *traps* (formaciones volcánicas de basalto) de Siberia. Posiblemente influyera la emisión de metano desde el fondo del mar y también las descomunales emisiones de magma, que provocaron un calentamiento global que condujo a una sucesión de catástrofes que convirtieron a la Tierra, en unos pocos miles de años, en un lugar absolutamente inhóspito.<sup>87</sup> La vida tardó mucho en recuperarse, hasta nueve millones de años, según señalan algunos estudios. El aspecto positivo de la recuperación fue la aparición de grupos completamente nuevos, como los reptiles marinos y los crustáceos decápodos, así como nuevos tetrápodos, incluidos los saurópsidos (antepasados

---

<sup>85</sup> Kemp, 2005.

<sup>86</sup> Kemp, 2006.

<sup>87</sup> Jurikova, Gutjahr, Wallmann, Flögel, Liebetrau, Posenato... y Eisenhauer, 2020.

de pterosaurios y dinosaurios), que radiaron posteriormente y dieron lugar a formas carnívoras y herbívoras. En general, en respiración y locomoción eran muy superiores a otros vertebrados terrestres.<sup>88</sup> Afortunadamente, un grupo de terápsidos sobrevivió a la catástrofe y se diversificó en el Triásico. Algunas formas ya adelantan la inminente llegada de los mamíferos, con unas extremidades con articulaciones extensibles y un cráneo con paladar secundario, que independiza la cavidad nasal de la cavidad oral, lo que supone la gran ventaja de deglutir los alimentos y respirar al mismo tiempo.<sup>89</sup> Hay evidencias de que algunos de ellos podrían haber tenido pelo y ser endotermos. Pero lo más interesante, lo que de verdad caracterizó a todos los mamíferos de esa época y de las posteriores, es la modificación que se produjo en los huesos que unían la mandíbula al cráneo en sus ancestros. A partir de entonces se transforman en una única pieza ósea que se articula en las fosas glenoideas del hueso temporal en el cráneo. El resto de los huesos evolucionarán hasta convertirse en los huesecillos del oído medio, con una nueva función, que es la transmisión del sonido.<sup>90</sup>

#### **DINOSAURIOS (INCLUIDAS LAS AVES), MAMÍFEROS Y PLANTAS CONTINENTALES**

Los primeros dinosaurios aparecen en Gondwana a mediados del Triásico, hace unos 235 millones de años. Al principio muchos de ellos eran pequeños, ágiles, bípedos y carnívoros y descendían de algún pequeño arcosaurio (reptil) bípedo. El enorme tamaño de algunos de los últimos representantes evolucionaría mucho más tarde. Esos primeros dinosaurios se cree que vivían en una suerte de equilibrio de fuerzas con otros muchos organismos, pero tiempo después se produjeron cambios ecológicos y los dinosaurios reemplazaron a los últimos terápsidos carnívoros y herbívoros. Los dinosaurios se volvieron dominantes y se diversificaron en grupos como los terópodos (bípedos y carnívoros), que incluyen algunos de los más avanzados dinosaurios y a las aves y los ornitiquios (bípedos y herbívoros), que fueron los responsables de la gran radiación de los dinosaurios herbívoros o los sauropodomorfos (grandes y robustos herbívoros), con pies grandes y extremidades columnares. Estos, en una temprana radiación, darán lugar a los prosaurópodos y en una posterior a los célebres saurópodos, que son los que representan las formas más conocidas de dinosaurios y entre los que se encontraron los animales terrestres más grandes

---

<sup>88</sup> Chen y Benton, 2012.

<sup>89</sup> Rubidge y Sidor, 2001.

<sup>90</sup> Agustí, 2003.

conocidos.<sup>91</sup> Se cree que eran animales que, a pesar de su tamaño, debido a sus hábitos herbívoros, realizaban grandes desplazamientos, tal y como hacen hoy muchos otros herbívoros, por ejemplo, en el continente africano. El tamaño es posible que supusiera una ventaja a la hora de desplazarse, ya que podrían recorrer grandes distancias en relativo poco tiempo.

También en ese periodo entran en escena los mamaliformes, pero lo hacen de una manera muy discreta. Eran de tamaño muy reducido, insectívoros y probablemente de hábitos nocturnos.<sup>92</sup> El primer mamífero verdadero apareció en el Triásico tardío (~200 millones de años), unos 70 millones de años después de los primeros terápsidos y unos 30 millones de años después de la aparición de los primeros mamaliformes.<sup>93</sup>

En esa época se produce la radiación de las plantas continentales (su origen podría remontarse al Devónico ~395-359 millones de años).<sup>94</sup> Después de la gran extinción del Triásico, los ecosistemas siguen dominados por los helechos de tipo arborescente, pero a partir de mediados del Triásico aparece un nuevo tipo de plantas que se hará dominante. Son las plantas con semillas (gimnospermas) y mayoritariamente serán las coníferas quienes tomen ventaja en la colonización de los ecosistemas terrestres. Precisamente de esa época han llegado hasta nuestros días algunos de aquellos representantes, como las araucarias, las cícadas o los ginkgos.<sup>95</sup> La ventaja de estas plantas con semillas es su resistencia a la sequía estacional y unos sistemas de polinización eficientes en un mundo repleto de insectos.<sup>96</sup>

En el Jurásico (201-146 millones de años) la estabilidad ambiental aumenta con temperaturas medias altas, sin diferencias latitudinales. Es un periodo en que, como en el Cretácico, se producen importantes desplazamientos de las masas continentales que dejarán el planeta diseñado tal y como es en la actualidad.<sup>97</sup> Muchas zonas anteriormente terrestres son invadidas por masas de agua y de ahí la importancia de los océanos en la vida del periodo. En esa época vivió uno de los grandes depredadores de los mares (~248-94 millones de años), el ictiosauro, un ejemplo paradigmático de convergencia evolutiva. Con su morfología parecida a la de un delfín (en las formas evolucionadas del Jurásico),

---

<sup>91</sup> Brusatte, Nesbitt, Irmis, Butler, Benton y Norell, 2010.

<sup>92</sup> Kemp, 2005.

<sup>93</sup> Vargas, 2012.

<sup>94</sup> Biswas y Johri, 1997.

<sup>95</sup> Wang y Ran, 2014.

<sup>96</sup> Cowen, 2013.

<sup>97</sup> Levin, y King, 2016.

los ictiosaurios mesozoicos son iconos de la evolución, reptiles oceánicos con especializaciones anatómicas hacia una existencia marina obligada. Es decir, estamos hablando de un reptil absolutamente independiente del medio terrestre. Se cree que eran vivíparos y parían crías directamente en las aguas del mar.<sup>98</sup>

Las aves evolucionaron, probablemente en Gondwana durante el Jurásico (hace alrededor de 165-150 millones de años), a partir de dinosaurios terópodos. Las características que mayoritariamente definen hoy a las aves se fueron adquiriendo gradualmente a lo largo de varios de millones de años de evolución. Inicialmente hubo una importante diversificación de esas primeras aves a largo del Jurásico y del Cretácico. A finales del Cretácico, las aves fueron diezmadas junto con sus parientes los dinosaurios. Después de la extinción masiva, se diversificaron (radiación adaptativa) de nuevo, culminando en las más de diez mil especies actuales distribuidas en todo el mundo. Todas ellas pertenecen a las neornites (cuyos fósiles más antiguos son del Cretácico tardío), que fue el único grupo que sobrevivió a otra extinción masiva a finales del Cretácico. Es posible que las aves se beneficiaran de la desaparición de los dinosaurios y de los pterosaurios (primeros tetrápodos en conquistar el aire) con los que competían por el alimento.<sup>99</sup>

*Archaeopteryx lithographica* es, posiblemente, uno de los fósiles de aves mejor conocidos por presentar características intermedias entre reptil y ave, y es un ejemplo clásico de evolución en mosaico en los libros de texto.<sup>100</sup> Sus restos, adscritos al Jurásico tardío, fueron descubiertos en depósitos de calizas en Alemania en 1861, tan solo dos años después de que Darwin publicara su obra sobre el origen de las especies. A pesar de que sus fósiles se conocían desde el siglo XIX, durante mucho tiempo la posibilidad de que las aves tuvieran un antepasado entre los dinosaurios era mayoritariamente rechazada. Las primeras descripciones del fósil fueron hechas por dos antidarwinistas de la época que, curiosamente, llegaron a conclusiones opuestas: Andreas Wagner (1862) pensaba que este animal representaba claramente un lagarto un tanto extraño, mientras que Richard Owen (1863) opinaba que el fósil, sin duda, se correspondía con un pájaro.<sup>101</sup>

Hoy ya nadie duda de la estrecha relación de los dinosaurios con las aves. Un elemento clave de esta conexión lo encontramos en la fúrcula, que deriva

---

<sup>98</sup> Gutarra, Moon, Rahman, Palmer, Lautenschlager, Brimacombe y Benton, 2019.

<sup>99</sup> Ericson, 2012.

<sup>100</sup> Hickman, Roberts, y Larson, 2006.

<sup>101</sup> Rauhut y Foth, 2020.

de la fusión de las dos clavículas y cuya presencia es fundamental para poder volar. Lo cierto es que los fósiles de dinosaurios con clavículas tardaron en aparecer y la ausencia de esta pieza que, sin embargo, sí estaba presente en reptiles ancestrales, era un obstáculo para el establecimiento de la relación entre los dos grupos de organismos. Afortunadamente, aparecieron varios esqueletos de carnosaurios, un tipo de pequeño dinosaurio del Cretácico, claviculado y muy parecido a *Archaeopteryx* en muchos de sus caracteres, excepto que no tenían plumas. Hoy sabemos que la presencia de clavículas en los terópodos es bastante antigua, incluso hay ejemplos de estos dinosaurios con fúrcula.<sup>102</sup> Además, en las últimas décadas, son numerosos los fósiles de dinosaurios emplumados que se han descrito (Figura 6). El descubrimiento de plumas bien preservadas y pertenecientes a terópodos no aviáres representa la confirmación definitiva del origen de este grupo en los dinosaurios.<sup>103</sup> Aun así, el debate sobre los detalles de las relaciones filogenéticas de los dinosaurios terópodos y, por lo tanto, sobre la génesis de las aves, sigue existiendo.<sup>104</sup>



Figura 6. Reproducciones de dinosaurios emplumados expuestas en el Museo del Jurásico de Asturias. Izquierda, *Dromaeosaurus*; derecha, *Oviraptor*.

Las aves son el linaje más diverso de vertebrados tetrápodos existentes. En la actualidad hay más de diez mil especies,<sup>105</sup> que muestran una gran variedad

<sup>102</sup> Nesbitt, Turner, Spaulding, Conrad y Norell, 2009.

<sup>103</sup> Zelenitsky, Therrien, Erickson, DeBuhr, Kobayashi, Eberth y Hadfield, 2012.

<sup>104</sup> Hackett, Kimball, Reddy, Bowie, Braun, Braun... y Yuri, 2008.

<sup>105</sup> Gill, Donsker y Rasmussen, 2022.

de formas, comportamientos y, además, una significativa heterogeneidad ecológica. Tratar de establecer relaciones evolutivas en las aves es difícil, dada la rápida y temprana divergencia evolutiva que ha resultado en muchos grupos distintivos.<sup>106</sup> Un gran número de las especies de aves son acuáticas y su vida en mayor o menor medida depende de este hábitat. Algunas de ellas dividen su tiempo entre ambientes acuáticos y terrestres, mientras que otras pasan la mayor parte de su vida en el agua y regresan a la tierra solo para reproducirse.<sup>107</sup>

Las aves acuáticas son numerosas. Solo las que dependen del medio marino, al menos en una parte de su ciclo de vida, representan unas 350 especies (3,5 % de todas las aves). La vida en ambientes acuáticos las ha llevado a desarrollar, a lo largo de decenas de millones de años, una serie de adaptaciones especiales para su supervivencia. Estos rasgos que han ido incorporando están sobre todo relacionados con su estilo de alimentación, basado principalmente en organismos acuáticos (peces, invertebrados, plancton...) y la acomodación de su cuerpo al buceo (plumas hidrófobas, capacidad de apnea, fisionomía apta para la natación...). Las especies buceadoras de agua salada poseen, además, unas glándulas salinas especiales que ayudan a excretar el exceso de sal que resulta de beber agua de mar. Pueden tener membranas alrededor de sus dedos o patas alargadas que les permiten caminar fácilmente por el agua mientras mantienen seco el resto de su cuerpo. Algunas especies zancudas encuentran alimento removiendo el agua con sus pies; otras, en cambio, usan sus picos para filtrar la comida. Las especies más grandes con patas largas también poseen cuellos largos y flexibles que les permiten obtener la comida de debajo de la superficie del agua.<sup>108</sup>

Algunos estudios sugieren que muchas adaptaciones terrestres y acuáticas de las aves son convergentes dentro del grupo de las aves acuáticas. Parece que hubo una gradual adquisición de las características acuáticas que ha culminado en especies como los pingüinos, que representan, entre otros, a los habitantes obligados de los medios acuáticos.<sup>109</sup> Los pingüinos son aves no voladoras cuyo origen se remonta a hace unos 30 millones de años, cuando sus antepasados comenzaron a capturar alimento bajo las aguas del mar. Se caracterizan por tener una gruesa capa de grasa y una cobertura muy densa de plumas que les ayuda a flotar y a mantener la temperatura corporal adecuada en aguas muy

---

<sup>106</sup> Brusatte, O'Connor y Jarvis, 2015.

<sup>107</sup> Vierling y Sullivan, 2018.

<sup>108</sup> Frederick, 2001.

<sup>109</sup> Brusatte, O'Connor y Jarvis, 2015.

frías. Poseen una figura extraordinariamente hidrodinámica y están muy bien adaptados a la natación bajo el agua, alcanzando velocidades de hasta 25 kilómetros por hora. También pueden llegar a sumergirse a más de 500 metros de profundidad. Ello fue posible porque los huesos de las alas se comprimieron progresivamente y las articulaciones perdieron su función hasta que definitivamente adquirieron la forma y las competencias de una aleta.<sup>110, 111</sup>

Sobre tierra firme los mamíferos se diversifican en varios grupos y, además de las formas insectívoras, aparecen especializaciones herbívoras y carnívoras. Algunos de esos mamíferos del Jurásico son los docodontos, los multituberculados (grupo más numeroso y diversificado), que persistirán hasta el Eoceno, y los triconodontos.<sup>112</sup>

### LOS MAMÍFEROS MARINOS DEL CRETÁCICO

El protagonismo de los mamíferos en la evolución de la vida en la Tierra no fue relevante hasta el Cretácico (145-66 millones de años), a pesar de existir, diversificados en grupos, desde finales del Triásico (~220 millones de años). Antes de la caída del meteorito que, supuestamente, llevó a la desaparición de los dinosaurios y otros grupos (cabe recordar que existen otras hipótesis que relacionan estas extinciones con un momento de intensa actividad volcánica), no hay apenas evidencia fósil de su existencia.

En la segunda parte del Cretácico la situación mejora notablemente para los mamíferos. Se extendían por el Viejo Mundo (Asia central) y el Nuevo Mundo (las dos Américas), lo cual podría estar relacionado con los cambios de vegetación.<sup>113</sup> En esa época, junto con los multituberculados, aparecen otros tres grupos: los marsupiales, los placentarios y los monotremas, un grupo de mamíferos que pone huevos (actuales ornitorrincos y equidnas) y que fue el primero en diferenciarse de los tres. De las cinco especies de monotremas vivientes (todas ellas en Oceanía), el ornitorrinco de pico de pato (*Ornithorhynchus anatinus*) es el único semiacuático y vive en arroyos, lagos y lagunas en el este de Australia y Tasmania. Hoy sabemos que los mamíferos marsupiales se originaron en Sudamérica y de allí pasaron a Australia por la Antártida (sin hielo por entonces), alcanzaron incluso África y Europa, aunque con una

---

<sup>110</sup> Boersma, 2008.

<sup>111</sup> Davis y Renner, 2003.

<sup>112</sup> Agustí, 2003.

<sup>113</sup> Chen, Strömberg y Wilson, 2019.

existencia fugaz. La única especie verdaderamente semiacuática dentro de los marsupiales es la zarigüeya acuática sudamericana (*Chironectes minimus*). Por su parte, los mamíferos placentarios se originaron en algún lugar del Viejo Mundo (Asia central) y desde allí se extendieron al Nuevo Mundo, pero nunca llegaron a Australia, con la excepción de los murciélagos. Entre los placentarios se reconocen varias especies semiacuáticas, pero solo los cetáceos y los sirenios son estrictamente acuáticos.<sup>114, 115</sup>

Los mamíferos placentarios son el grupo dominante y más diverso de los tres linajes que actualmente existen (placentarios, marsupiales y monotremas). *Eomaia* fue un mamífero placentario (eutherio) que se cree que podría estar en el origen de la radiación evolutiva que dio lugar a casi todas las formas de mamíferos continentales.<sup>116</sup>

Esta aparición, extinción y distribución de grupos tiene un elemento condicionante y no es otro que el clima, cuya progresión desde el inicio del Cretácico nos habla de una tendencia hacia un planeta más seco y notablemente más frío (por supuesto con sus altibajos). Este periodo de recrudescimiento climático comenzó con la formación de un casquete polar en la Antártida que, probablemente, determinó que la concentración de dióxido de carbono fuera menor (otros autores apuntan a la formación de grandes cadenas montañosas y a procesos de tectónica de placas). Sabemos que este gas tiene un importante efecto invernadero y el descenso de su concentración fue la principal causa del descenso de la temperatura. Hay quien opina que, aunque la catástrofe del meteorito de Yucatán no hubiera tenido lugar, el descenso de las temperaturas habría llevado irremediablemente a la extinción de los dinosaurios y a su sustitución por los mamíferos, con su ventajosa termorregulación.

Un hábito recurrente en la evolución de los tetrápodos es el retorno a los ecosistemas acuáticos. En el caso de los anfibios, hemos visto que nunca consiguieron independizarse totalmente del agua. Sin embargo, todos los demás grupos de tetrápodos (reptiles, aves y mamíferos) tienen varios representantes que han regresado a ese medio para una existencia completamente acuática o, al menos, para desarrollar un estilo de vida anfibio o semiacuático. Los mamíferos en particular han retornado al agua en al menos siete ocasiones dando lugar a siete linajes, de los que solo cinco han llegado hasta nuestros días.<sup>117</sup>

---

<sup>114</sup> Arsuaga, 2019.

<sup>115</sup> Veron, Patterson y Reeves, 2007.

<sup>116</sup> Ji, Luo, Yuan, Wible, Zhang y Georgi, 2002.

<sup>117</sup> Uhen, 2007.

El origen de los mamíferos marinos es relativamente tardío, a principios del Cenozoico (~66 millones de años). Los cetáceos (ballenas, delfines y marsopas) y sirenios (manatíes y dugongos) emergieron durante la época del Eoceno, hace unos 50 millones de años. Los pinnípedos (focas, leones marinos y morsas) aparecen en el Oligoceno (~29-23 millones de años), la nutria marina del Pacífico norte hace unos 7 millones de años, a finales del Mioceno, y los primeros osos polares son de finales del Pleistoceno (hace unos 500 000 años). Algunos de estos linajes han conservado la mayor parte de su forma terrestre mientras pasan mucho tiempo en el agua; sin embargo, otros han cambiado su morfología drásticamente y pasan casi todo, si no todo, su tiempo en el agua.<sup>118</sup>

Los mamíferos marinos, a pesar de sus orígenes evolutivos independientes, comparten varios rasgos fenotípicos adaptados a ese medio y, por ello, representan un ejemplo de evolución convergente. Muchas de las características acuáticas evolucionaron independientemente en cada uno de estos grupos como soluciones morfológicas a las mismas circunstancias. Los pinnípedos, sirenios y cetáceos comparten una serie de adaptaciones a los desafíos locomotores, térmicos, sensoriales, de comunicación y anaeróbicos de una existencia acuática, incluidas las extremidades adaptadas para nadar, la densidad ósea preparada para controlar la flotabilidad y una gran reserva de oxígeno en relación con el tamaño corporal. Los primeros representantes de estos grupos muestran características morfológicas que indican que ya se alimentaban en el agua, lo que sugiere que la ecología de la alimentación es un factor clave en la evolución de los mamíferos marinos.<sup>119</sup>

### LA EMERGENCIA DE LAS ANGIOSPERMAS

Un suceso que no puede pasarse por alto en este recorrido evolutivo por los organismos terrestres es el que tuvo lugar a finales del Mesozoico, en la época conocida como Cretácico: la radiación de las plantas angiospermas o plantas con flores completas que producen frutos.<sup>120</sup> Actualmente suponen el 90 % de las plantas terrestres e incluyen unas 250 000 especies (algunos autores mencionan hasta 400 000).<sup>121</sup>

---

<sup>118</sup> Berta y Sumich, 1999.

<sup>119</sup> Foote, Liu, Thomas, Vinař, Alföldi, Deng... y Gibbs 2015.

<sup>120</sup> Una flor completa implica la presencia de sépalos, pétalos, estambres y ovario, pudiendo darse tanto reducciones como modificaciones. Además, las semillas se encuentran encerradas en frutos que resultan de la fecundación de la flor.

<sup>121</sup> Bell, Soltis y Soltis, 2010.

El tímido origen de las angiospermas, según estimaciones moleculares, pudo ser en el Jurásico (180-140 millones de años).<sup>51</sup> Se cree que aparecieron cerca del ecuador, en lo que hoy es Sudamérica, África y sudeste de Asia, cuando el clima se estaba volviendo seco y caluroso. A pesar de ese temprano origen, no se diversificarán ampliamente hasta comienzos del Cretácico.<sup>122</sup> Hasta ese momento las masas forestales seguían gobernadas por las grandes coníferas de tipo secuoyas y otras gimnospermas (plantas con semillas desnudas), cada vez más adaptadas a esos climas calurosos y que se concentraban cerca de lugares húmedos como las líneas de costa, ríos, lagos y zonas pantanosas. La reproducción de las plantas con semillas tiene dos fases: la fecundación por parte de un organismo polinizador y la dispersión de la semilla formada a un lugar favorable para que tenga lugar la germinación. Una ventaja de las angiospermas es que los organismos animales pueden encargarse de los dos procesos. El éxito evolutivo de este grupo de plantas terrestres se debe principalmente a su forma de reproducción, más eficaz que la de las gimnospermas. Esta implica la presencia de unas estructuras anatómicas mucho más avanzadas, que ofrecen, por ejemplo, protección de la oosfera (ovocélula) en el interior del ovario de la flor. Todo esto permitió el desarrollo de una nueva estrategia de colonización terrestre.

Los fósiles más antiguos que se conservan de angiospermas son granos de polen de hace unos 135 millones de años. El desfase respecto a los datos moleculares podría explicarse porque estas primeras plantas con flor vivieron en un ambiente con un bajo potencial de preservación de fósiles. Las primeras angiospermas tenían formas arborescentes, parecidas a las actuales magnolias y otras plantas con flores adaptadas a medios más áridos. Fueron desplazando a las coníferas hasta que finalmente estas últimas quedaron relegadas a las zonas más altas. Una continua y activa interacción de las angiospermas con otros organismos (simbiontes, polinizadores, etc.) ha permitido que estas fueran dominando numerosos medios desde su aparición, desde hábitats acuáticos hasta ambientes extremos, debido a la falta de agua o de luz. Una vez diferenciados los primeros tipos de angiospermas, en tan solo unos 5 millones de años se generaron los linajes que darán lugar al 97 % de las especies. Hace 130 millones de años podemos decir que las plantas con flor estaban bien distribuidas por el ecuador, alcanzando latitudes hasta los 45° norte y sur. Las latitudes elevadas, dada la limitación de luz y temperatura, supusieron un reto que consiguieron

---

<sup>122</sup> Wikstrom, Savolainen y Chase, 2001.

superar hace tan solo 100 millones de años, por lo que su diversidad en esas zonas es mucho menor. A pesar de ello, salvo en las regiones polares, estas plantas se volvieron dominantes hace unos 65-75 millones de años y son la base de la vegetación moderna.

Dentro del grupo, es importante destacar a las fanerógamas marinas, como las posidonias o las zoosteras, entre otras. Se trata de plantas con tallo, hojas, flores, frutos y semillas similares a las plantas terrestres, que se han adaptado a la vida submarina y que se conocen con el nombre de praderas o pastos submarinos (*seagrasses* en inglés). Las praderas submarinas, a pesar de la baja diversidad de especies y de sus características fisiológicas únicas, han colonizado con éxito todos los mares someros menos los más polares. Se trata de especies monocotiledóneas, con una baja diversidad taxonómica. Existen unas 60 especies en todo el mundo (en comparación con las aproximadamente 250 000 angiospermas terrestres), que evolucionaron a partir de plantas terrestres que reconquistaron los océanos entre hace 100 y 70 millones de años. Influyen profundamente en los entornos físicos, químicos y biológicos de las aguas costeras actuando como ingenieros o arquitectos ecosistémicos.<sup>123</sup> Su existencia resulta imprescindible para el mantenimiento de los ecosistemas marinos costeros de los que depende la vida de miles de especies marinas de plantas y animales. Esto es debido a que son importantes productores primarios, es decir, convierten la luz solar y el dióxido de carbono de manera eficiente en forma orgánica (son lugares de cría y alimentación), oxigenan las aguas a través de la fotosíntesis e igualmente estabilizan y estructuran el lecho marino en el que crecen muchos otros organismos.<sup>124</sup>

### ORIGEN DE LOS PRIMATES

Existen diversas hipótesis que tratan de explicar el origen de los primates o, dicho de otro modo, por qué un grupo de mamíferos se convirtió en primates. Una de las más factibles precisamente se relaciona con la radiación de las angiospermas (plantas que producen frutos) y explica que las adaptaciones originales de los primates son para el consumo de frutas que crecen en los extremos terminales. Los primates no son los únicos organismos adaptados al consumo de los frutos: también los insectos, que pasarán a estar disponibles como alimentos para los primates.<sup>125</sup>

---

<sup>123</sup> Orth, Carruthers, Dennison, Duarte, Fourqurean, Heck... y Williams, 2006.

<sup>124</sup> Larkum, Orth, y Duarte (eds.), 2006.

<sup>125</sup> Sussman, Rasmussen y Raven, 2012.

Muy poco después de la desaparición de los dinosaurios no aviares, a finales del Mesozoico, comenzaron a aparecer unos mamíferos que tenían características similares a las de los primates: son los plesiadapiformes, a menudo denominados *primates arcaicos*. Como muchos de los actuales primates, los plesiadapiformes eran pequeños animales arbóreos que generalmente comían frutas, insectos y, ocasionalmente, hojas.<sup>126</sup> Este suborden fósil (no existen representantes actuales) se diversifica durante el Paleoceno (66-56 millones de años) y se extiende por todo el hemisferio norte, que, en aquel momento, formaba una única masa continental que favorecía el intercambio de la fauna (principalmente América del Norte y Eurasia). Tiene bastante éxito durante diez millones de años (algunos de sus representantes persistieron hasta hace 37 millones de años), dando lugar a más de una decena de familias y varias especies. Seguramente la radiación de los plesiadapiformes se vio favorecida por las condiciones climáticas, que en aquella época se asemejan a un clima tropical y subtropical que se extendía hasta las regiones polares, hasta 60° N (húmedo y cálido). Apenas había variaciones estacionales y en concreto en Norteamérica, de donde proceden los restos más antiguos, había selvas tupidas y pantanosas con árboles deciduos y coníferas.<sup>127</sup> A pesar de su enorme éxito, los plesiadapiformes desaparecen a lo largo de la siguiente época, muy probablemente porque no son capaces de competir con los verdaderos primates y los roedores que se diversifican a partir de entonces en el hemisferio norte.

En el Eoceno (56-34), el clima se fue haciendo progresivamente más cálido y húmedo. La vegetación tropical se extendió por el planeta y la jungla llegó a los polos.<sup>128</sup> Al comienzo de esta época aparecen muchos de los actuales órdenes de mamíferos, entre ellos los verdaderos primates, que surgieron abruptamente en América del Norte, Europa y Asia en asociación con ese evento de rápido calentamiento global. Hasta mediados del Eoceno, el Atlántico norte aún no había separado completamente los dos continentes y los mamíferos se movían libres entre América y Eurasia. Los euprimates ya presentan las características propias de los verdaderos primates, como son un anillo óseo que rodea completamente la órbita, ojos frontalizados, uñas en lugar de garras, un cerebro relativamente grande, etc. Se dividen en dos grupos: los adápidos y los omomíidos, siendo estos los predecesores directos de los demás primates. Las relaciones

---

<sup>126</sup> Silcox, Bloch, Boyer, Chester, y López-Torres, 2017.

<sup>127</sup> Zachos, Pagani, Sloan, Thomas y Billups, 2001.

<sup>128</sup> Wilf, 2000.

con los actuales prosimios (lémures, lorísidos y tarseros) parecen bastante claras, pero las afinidades con los antropoideos son inciertas.<sup>129</sup>

Al entrar en el Oligoceno (34–23 millones de años) el mundo se encontraba en pleno proceso de enfriamiento y de intensificación de la estacionalidad. El cambio más significativo de los ecosistemas del Oligoceno es la expansión global de los pastizales y una regresión de los bosques tropicales a la franja ecuatorial.<sup>58</sup> El registro fósil de primates es sorprendentemente diferente a otras épocas. Los primates anteriores (plesiadapiformes, adápidos y omomíidos) desaparecen de Europa y se hacen raros en Norteamérica. Debido al clima, tan poco amable, apenas hay fósiles que procedan del hemisferio norte y el protagonismo corresponde al continente africano. El yacimiento de El Fayum en Egipto es un testigo de la diversificación de los antropoideos (al que pertenecemos los humanos) y encontramos primates que representan a los antepasados comunes de los primates del Nuevo Mundo (platirrininos) y del Viejo Mundo (catarrinos) y otros más avanzados que ya son catarrinos, grupo que incluye a los monos del Viejo Mundo (cecopitecoideos) y a los simios antropomorfos (hominoideos), incluidos nosotros los humanos.<sup>59, 130</sup>

Los primates platirrininos o monos del Nuevo Mundo son mamíferos inmigrantes cuyo registro fósil proviene de sedimentos del Terciario y del Cuaternario de América del Sur y de las caribeñas Antillas Mayores.<sup>131</sup> Este es un momento en el que el agua resulta esencial para explicar y entender la llegada de los primates a Sudamérica, donde juegan un papel fundamental en la preservación de la biodiversidad tropical, gracias a su contribución a la regeneración de los bosques y al mantenimiento de la salud de los ecosistemas.<sup>132</sup>

Hacia finales del Oligoceno los primates (platirrininos) se establecieron en Sudamérica. Los análisis genéticos muestran que, junto con los catarrinos, forman un grupo monofilético (aparece una única vez en un único lugar) o, dicho de otra manera, comparten un antepasado común, africano.<sup>133</sup> El cómo llegaron a Sudamérica estos primates ha dado lugar a diversas hipótesis: puentes de tierra, salto entre isla volcánicas (*island hopping*) o navegación fortuita en islas flotantes. Parece que el modelo de una dispersión transatlántica en balsas naturales es la alternativa más plausible. Sería, además, compatible con la dirección oeste tanto

---

<sup>129</sup> Fleagle, 1999.

<sup>130</sup> Seiffert, 2007.

<sup>131</sup> Tejedor, 2013.

<sup>132</sup> Estrada, Garber, Rylands, Roos, Fernandez-Duque, Di Fiore... y Li, 2017.

<sup>133</sup> Poux, Chevret, Huchon, de Jong y Douzery, 2006.

de las paleocorrientes oceánicas como de los vientos imperantes, que habrían favorecido el rápido desplazamiento desde África al continente americano. Al mismo tiempo, esta migración habría sido facilitada por la existencia de islas de tamaño considerable en el Atlántico sur y hoy sumergidas.<sup>134, 135</sup>

En el Mioceno (23-5 millones de años) tuvieron lugar importantes sucesos geofísicos que afectaron al clima y a la biogeografía de los mamíferos del Viejo Mundo. Así, por ejemplo, se abrió el estrecho de Drake (separación definitiva de América del sur y la Antártida) y las fuertes presiones tectónicas dieron lugar al levantamiento de varias de las grandes cadenas montañosas de hoy. Estos y otros acontecimientos cambiaron definitivamente las pautas existentes de circulación, tanto atmosférica como oceánica. Consecuencia de ello fueron los cambios en la pluviosidad mundial y en la vegetación.

Justo antes del límite Oligoceno-Mioceno (23 millones de años), la placa africana y la euroasiática colisionaron. El continente africano, que anteriormente estaba aislado, entró geológicamente en contacto con Eurasia, permitiendo el intercambio de faunas entre ambos continentes.<sup>136</sup> El Oligoceno tardío se caracterizó en África por la presencia de linajes de mamíferos que habían evolucionado en aislamiento. Después de la unión de África y Eurasia, muchos de esos taxones desaparecieron y las faunas del Mioceno temprano quedaron dominadas por inmigrantes llegados del norte de Eurasia.

El lago Turkana, situado en África Oriental, con sus más de 6400 km<sup>2</sup> en la actualidad, fue un lugar esencial para la vida de muchas especies en aquella época. Se trata de uno de los lagos de entornos desérticos más grandes del mundo. En el Mioceno, el lugar era más húmedo; el lago, más extenso y profundo; y las praderas y los árboles tapizaban el actual desierto. Se han recuperado fósiles de diferentes épocas que, por ejemplo, representan el momento de la radiación evolutiva de los primeros simios (hominoideos).<sup>137</sup> Estos primates aprovecharían la autopista terrestre que se abrió entre Eurasia y África para salir del continente y dispersarse por un nuevo lugar, rico en hábitats y sin competidores (diversificación del grupo). En el lago también se atestiguan los reemplazos de fauna que tuvieron lugar cuando los mamíferos euroasiáticos entraron en África para refugiarse de los fríos del norte.<sup>138</sup>

---

<sup>134</sup> Oliveira, Molina y Marroig, 2009.

<sup>135</sup> De Queiroz, 2014.

<sup>136</sup> Potter y Szatmari, 2009.

<sup>137</sup> Leakey, Grossman, Gutiérrez, y Fleagle, 2011.

<sup>138</sup> Begun, 2015.

## REFERENCIAS

- AGUSTÍ, Jordi: *El ajedrez de la vida. Una reflexión sobre la idea de progreso en la evolución*, Barcelona: Crítica, 2003.
- ARCHIBALD, John M.: «Endosymbiosis and eukaryotic cell evolution», *Current Biology*, 25, 19, (2015), R911-R921.
- ARSUAGA, Juan L.: *Vida, la gran historia: un viaje por el laberinto de la evolución*, Barcelona: Planeta. 2019.
- BEGUN, David R.: *The real planet of the apes: a new story of human origins*, Princeton: Princeton University Press. 2015.
- BELL, Charles D., SOLTIS, Douglas E. y SOLTIS, Pamela S.: «The age and diversification of the angiosperms re-revisited», *American Journal of Botany*, 97, 8, (2010) 1296-1303.
- BERTA, Annalisa, SUMICH, James L. y KOVACS, Kit M.: *Marine mammals: evolutionary biology* (2<sup>nd</sup> ed.), San Francisco: Academic Press, 1999.
- BISWAS Chhaya y JOHRI Brij Mohan: *The gymnosperms*, Berlin: Springer-Verlag. 1997.
- BOERSMA, P. Dee: «Penguins as Marine Sentinels», *BioScience*, 58(7), (2008), 597-607.
- BRUSATTE, Stephen L., NESBITT, Sterling J., IRMIS, Randall B., BUTLER, Richard J., BENTON, Michael J., y NORELL, Mark A.: «The origin and early radiation of dinosaurs», *Earth-Science Reviews*, 101, 1-2, (2010), 68-100.
- BRUSATTE, Stephen L., O'CONNOR, Jingmai K. y JARVIS, Erich D.: «The Origin and Diversification of Birds», *Current Biology*, 25, 19, (2015), R888-R898.
- BURKI, Fabien, ROGER, Andrew J., BROWN, Matthew W. y SIMPSON, Alastair G.: «The new tree of eukaryotes», *Trends in ecology and evolution*, 35, 1, (2020), 43-55.
- BUTTERFIELD, N. J.: «Early evolution of the Eukaryota», *Palaeontology*, 58, 1, (2015) 5-17.
- CARR, Martin, y BALDAUF, Sandra L.: «The Protistan Origins of Animals and Fungi», Pöggeler, S. y J. Wöstemeyer (eds.): *Evolution of Fungi and Fungal-Like Organisms*: Heidelberg: Springer, 2011, 3-23.
- COWEN, Richard: *History of life*. 5.<sup>a</sup> ed: Malden: Wiley-Blackwell. 2013.
- CHEN, Meng, STRÖMBERG, Caroline A. E., y WILSON, Gregory P.: «Assembly of modern mammal community structure driven by Late Cretaceous dental evolution, rise of flowering plants, and dinosaur demise», *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116, 20, (2019), 9931-9940.

CHEN, Zhong-Qiang y BENTON, Michael J.: «The timing and pattern of biotic recovery following the end-Permian mass extinction», *Nature Geoscience*, 5, 6, (2012), 375-383.

CHENG, Shifeng, XIAN, Wenfei, FU, Yuan, MARIN, Birger, KELLER, Jean, WU, Tian... MELKONIAN, Michael: «Genomes of Subaerial Zygnematophyceae Provide Insights into Land Plant Evolution», *Cell*, 179, 5, (2019), 1057-1067. e14.

DAVIS, Lloyd S. y RENNER, Martin: *Penguins*, New Haven (CT): Yale University Press. 2003.

DE QUEIROZ, Alan: *The Monkey's Voyage: How Improbable Journeys Shaped the History of Life*, New York: Basic Books, 2014.

DECOMBEIX, Anne-Laure, MEYER-BERTHAUD, Brigitte y GALTIER, Jean: «Transitional changes in arborescent lignophytes at the Devonian-Carboniferous boundary», *Journal of the Geological Society*, 168, 2, (2011), 547-557.

DELAUX, Pierre-Marc, RADHAKRISHNAN, Guru V., JAYARAMAN, Dhileepkumar, CHEEMA, Jitender, MALBREIL, Mathilde, VOLKENING, Jeremy D... y ANÉ, Jean-Michel M.: «Algal ancestor of land plants was preadapted for symbiosis», *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112, 43, (2015), 13390-13395.

DELWICHE, Charles F y COOPER, Endymion D.: «The Evolutionary Origin of a Terrestrial Flora», *Current Biology*, 25, 19, (2015), R899-R910.

DERELLE, Romain, TORRUELLA, Guifre, KLIMEŠ, Vladimir, BRINKMANN, Henner, KIM, Eunsoo, VLČEK, Āestmír, LANG, Franz y ELIÁŠ, Marek: «Bacterial proteins pinpoint a single eukaryotic root», *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112, 7, (2015), E693-E699.

DODD, Mathew S., PAPINEAU, Dominic, GRENNE, Tor, SLACK, John E., RITTNER, Martin, PIRAJNO, Franco, O'NEIL, Jonathan y LITTLE, Crispin T. S.: «Evidence for early life in Earth's oldest hydrothermal vent precipitates», *Nature*, 543, (2017), 60-64.

EME, Laura, SPANG, Anja, LOMBARD, Jonathan, STAIRS, Courtney W. y ETTEMA, Thijs J. G.: «Archaea and the origin of eukaryotes», *Nature Reviews Microbiology*, 15, 12, (2017) 711.

ERICSON, Per G. P. (2012). «Aves», VARGAS, P. y ZARDOYA, R. (eds.): *El árbol de la vida: sistemática y evolución de los seres vivos*, Madrid: Impulso Global Solutions, 2012, 435-443.

ESTRADA, Alejandro, GARBER, Paul A., RYLANDS, Anthony B., ROOS, Christian, FERNÁNDEZ-DUQUE, Eduardo, DI FIORE, Anthony... y LI, Baoguo:

«Impending extinction crisis of the world's primates: Why primates matter», *Science advances*, 3, 1, (2017), e1600946.

FLEAGLE, John G.: *Primate adaptation and evolution*, New York: Academic Press, 1999.

FOOTE, Andrew D., LIU, Yue, THOMAS, Gregg W. C., VINAŘ, Tomáš, ALFÖLDI, Jessica, DENG, Jixin... y GIBBS, Richard A.: «Convergent evolution of the genomes of marine mammals», *Nature Genetics*, 47, 3, (2015), 272-275.

FORTEY, Richard: *Life: an unauthorised biography. A natural history of the first 4,000,000,000 years of life on Earth*, London: HarperCollins, 1997.

FREDERICK, Peter C.: «Wading birds in the marine environment», Schreiber, E. A. y Burger, J. A., (eds.): *Biology of marine birds*. Hoboken: CRC Press, 2001, 617-656.

GARCÍA MORENO, Olga: «El planeta azul», O. GARCÍA-MORENO y A. MENÉNDEZ VISO (eds.), *La Gran Historia del agua*, Oviedo: Ediciones de la Universidad de Oviedo, 2022.

GERRIENNE, Philippe, GENSEL, Patricia G., STRULLU-DERRIEN, Christine, LARDEUX, Hubert, STEEMANS, Philippe y PRESTIANNI, Cyrille: «A simple type of wood in two Early Devonian plants», *Science*, 333, 6044, (2011), 837-837.

GILL, Frank, DONSKER, David y RASMUSSEN, Pam (Eds.). *IOC World Bird List* (v12.1). 2022.

GOULD, Stephen J.: *El libro de la vida*, Barcelona: Drakontos-Crítica, 1993.

GRAHAM, Linda E. y GRAY, Jane: «The origin, morphology and ecophysiology of early embryophytes: neontological and paleontological perspectives», Gensel & D. Edwards (eds.): *Plants Invade the Land: Evolutionary and Environmental Perspectives*, New York: Columbia University Press, 2001, 140-158.

GUTARRA, Susana, MOON, Benjamin C., RAHMAN, Imran A., PALMER, Colin, LAUTENSCHLAGER, Stephan, BRIMACOMBE, Alison J., y BENTON, Michael J.: «Effects of body plan evolution on the hydrodynamic drag and energy requirements of swimming in ichthyosaurs», *Proceedings of the Royal Society B*, 286, 1898, (2019), 20182786.

HACKETT, Shannon J., KIMBALL, Rebecca T., REDDY, Sushma, BOWIE, Rauri C., BRAUN, Edward L., BRAUN, Michael J... y YURI, Tamaki: «A phylogenomic study of birds reveals their evolutionary history», *Science*, 320, 5884, (2008), 1763-1768.

HALLAM, Anthony y WIGNALL, Paul B.: «Mass extinctions and sea-level changes», *Earth-Sci. Rev.*, 48, 4, (1999), 217-250.

HEARING, Thomas W., HARVEY, Thomas H. P., WILLIAMS, Mark, LENG, Melanie J., LAMB, Angela L., WILBY, Philip. R., GABBOTT, Sarah E., POHL, Alexandre y DONNADIEU, Yannick: «An early Cambrian greenhouse climate», *Science Advances*, 4, 5, (2018), eaar5690.

HICKMAN Cleveland P., ROBERTS, Larry S. y LARSON, Allan: *Principios integrales de zoología* (13.<sup>a</sup> ed.), Madrid: Mac Graw-Hill/Interamericana. 2006.

HICKMAN, Cleveland P., ROBERTS, Larry S. y LARSON, Allan: *Integrated Principles of Zoology*: New York: McGrawHill, 2018.

HINCHLIFF, Cody E., SMITH, Stephen A., ALLMAN, James F., BURLEIGH, J. Gordon, CHAUDHARY, Ruchi, COGHILL, Lyndon M... y CRANSTON, Karen A.: «Synthesis of phylogeny and taxonomy into a comprehensive tree of life», *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112, 41, (2015), 12764-12769.

JAMES, Timothy Y., KAUFF, Frank, SCHOCH, Conrad L., MATHENY, P. Brandon, HOFSTETTER, Valérie, COX, Cymon J... y VILGALYS, Rytas: «Reconstructing the early evolution of Fungi using a six-gene phylogeny», *Nature*, 443, 7113, (2006), 818-822.

JAVAUX, Emmanuelle J.: «Challenges in evidencing the earliest traces of life», *Nature*, 572, (2019), 451-460.

Ji, Qiang, LUO, Zhe-Xi, YUAN, Chong-Xi, WIBLE, Jhon R., ZHANG, Jian-Ping y GEORGI, Justin A.: «The earliest known eutherian mammal». *Nature*, 416, 6883, (2002), 816-822.

JURIKOVA, Hana, GUTJAHR, Marcus, WALLMANN, Klaus, FLÖGEL, Sascha, LIEBETRAU, Volker, POSENATO, Renato... y EISENHAEUER, Anton: «Permian-Triassic mass extinction pulses driven by major marine carbon cycle perturbations», *Nature Geoscience*, 13, 11, (2020), 745-750.

KEELING, Patrick J.: «The number, speed, and impact of plastid endosymbioses in eukaryotic evolution». *Annual review of plant biology*, 64, (2013), 583-607.

KEMP, Tom S.: «The origin and early radiation of the therapsid mammal-like reptiles: a palaeobiological hypothesis», *Journal of Evolutionary Biology*, 19, 4, (2006), 1231-1247.

KEMP, Tom S.: *The Origin and Evolution of Mammals*, Oxford: Oxford Univ. Press. 2005.

LABANDEIRA, Conrad: «The origin of herbivory on land initial patterns of plant tissue consumption by arthropods», *Insect Sci.*, 14, (2007), 259-275.

LARKUM, Anthony W. D., ORTH, Robert J. y DUARTE Carlos: *Seagrasses: Biology, Ecology and Conservation*, Dordrecht: Springer, 2006.

LEAKEY, Meave, GROSSMAN, Ari, GUTIÉRREZ, Mercedes, y FLEAGLE, John G.: «Faunal Change in the Turkana Basin during the Late Oligocene and Miocene», *Evolutionary Anthropology: Issues, News, and Reviews*, 20, 6, (2011), 238-253.

LEVIN, Harold L. y KING David T. Jr.: *The Earth Through Time* (8th Ed): Hoboken, NJ: John Wiley & Sons Inc., 2016.

MARGULIS, Lynn y SAGAN, Dorion: *Microcosmos. Four billion years of microbial evolution*, California: University of California Press, 1986.

MARTIN, Francis M., UROZ, Stéphane, y BARKER, David G.: «Ancestral alliances: plant mutualistic symbioses with fungi and bacteria», *Science*, 356, 6340, (2017), ead4501.

MARTÍNEZ, Ignacio y ARSUAGA, Juan L. (2002). *Amalur. Del átomo a la mente*, Madrid: Ediciones Temas de Hoy, 2002.

MASSA, Renato: *El origen de la vida: La evolución de las especies*, Madrid: Susaeta ediciones, 2011.

MCGHEE, George R.: «Testing Late Devonian extinction hypotheses». OVER, J., MORROW, J. y WIGNALL, P. B. (eds.): *Understanding Late Devonian and Permian-Triassic Biotic and Climatic Events Towards an Integrated Approach. Developments. Developments in Paleontology & Stratigraphy*, Amsterdam: Elsevier Science, 20, 37-50, 2005.

MCGHEE, George R.: «The Late Devonian extinction event: evidence for abrupt ecosystem collapse», *Paleobiology*, 14, 03, (1988), 250-257.

MORRIS, Jennifer L., PUTTICK, Mark N., CLARK, James W., EDWARDS, Dianne, KENRICK, Paul, PRESSEL, Silvia... y DONOGHUE, Philip C. J.: «The timescale of early land plant evolution» *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115, 10, (2018), E2274-E2283.

MOSS, Brian: *Ecology of freshwaters. A view for the Twenty-first Century*. 4<sup>th</sup> ed., Chichester: Wiley-Blackwell. 2010.

NELSEN, Mathew P., LÜCKING, Robert, BOYCE, C. Kevin., LUMBSCH, H. Thorsten., y REE, Richard. H.: «No support for the emergence of lichens prior to the evolution of vascular plants», *Geobiology*, 18, 1, (2020), 3-13.

NESBITT, Sterling J., TURNER, Alan H., SPAULDING, Michael, CONRAD, Jack L. y NORELL, Mark A.: «The theropod furcula», *J Morphol.* 270, (2009), 856-879.

NIELSEN, Claus: «Six major steps in animal evolution: are we derived sponge larvae». *Evolution & Development* 10, (2008), 241-257.

OLIVEIRA, Felipe B. D., MOLINA, Eder C. y MARROIG, Gabriel: «Paleogeography of the South Atlantic: a route for primates and rodents into the New World?», GABER, P.A., ESTRADA, A., BICCA-MARQUES, J. C., HEYMANN,

E.W. y STRIER, K. B. (eds.) *South American primates. Comparative Perspectives in the study of Behavior, Ecology, and conservation*: New York: Springer, 2009, 55-68.

ORTH, Robert J., CARRUTHERS, Tim J. B., DENNISON, William C., DUARTE, Carlos M., FOURQUREAN, James W., HECK, Kenneth L... y WILLIAMS, Susan L.: «A Global Crisis for Seagrass Ecosystems», *BioScience*, 56, 12, (2006), 987-996.

PEARCE, Ben K. D., PUDRITZ, Ralph E., SEMENOV, Dmitry A., y HENNING, Thomas K.: «Origin of the RNA world: The fate of nucleobases in warm little ponds», *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114, 43, (2017), 11327-11332.

POTTER, Paul E., y SZATMARI, Peter: «Global Miocene tectonics and the modern world», *Earth-Science Reviews*, 96, 4, (2009), 279-295.

POUX, Celine, CHEVRET, Pascale, HUCHON, Dorothée, DE JONG, Wilfried W. y DOUZERY, Emmanuel J. P.: «Arrival and diversification of caviomorph rodents and platyrrhine primates in South America», *Syst. Biol.* 55, (2006), 228-244.

PRESNELL, Jason S., VANDEPAS, Lauren E., WARREN, Kaitlyn J., SWALLA, Billie J., AMEMIYA, Chris T. y BROWNE, William E.: «The presence of a functionally tripartite Through-Gut in ctenophora has implications for metazoan character trait evolution», *Current Biology* 26, (2016), 2814-2820

RAUHUT, Oliver W., FOTH, Christian: «The Origin of Birds: Current Consensus, Controversy, and the Occurrence of Feathers». Foth, C., Rauhut, O.W.M. (eds.): *The Evolution of Feathers*: Cham: Springer, 2020, 27-45.

RUBIDGE, Bruce S. y SIDOR, Christian A.: «Evolutionary patterns among Permo-Triassic therapsids», *Ann. Rev. Ecol. Syst.* 32, (2001), 449-480.

RUGGIERO, Michael A., GORDON, Dennis P., ORRELL, Thomas M., BAILLY, Nicolas, BOURGOIN, Thierry, BRUSCA, Richard C. CAVALIER-SMITH, Thomas, GUIRY, Michael D. y KIRK, Paul M.: «A higher-level classification of all living organisms», *PloS One*, 10, 4, (2015), e0119248.

SAN MAURO, Diego: «Anfibios», Vargas, P. y Zardoya, R. (eds.): *El árbol de la vida: sistemática y evolución de los seres vivos*, Madrid: Impulso Global Solutions, 2012. 400-407

SCHOCH, Rainer R.: *Amphibian Evolution. The Life of Early Land Vertebrates*, Wiley-Blackwell. 2014.

SEIFFERT, Erik R.: «Evolution and Extinction of Afro-Arabian Primates Near the Eocene-Oligocene Boundary», *Folia Primatologica*, 78, 5-6, (2007), 314-327.

SILCOX, Mary T., BLOCH, Jonathan I., BOYER, Doug M., CHESTER, Stephen G. B., y LÓPEZ-TORRES, Sergi: «The evolutionary radiation of plesiadapiforms», *Evolutionary Anthropology: Issues, News, & Reviews*, 26, 2, (2017), 74-94.

SITTE, Peter, WEILER, Elmar W., KADEREIT, Joachim W., BRESINSKY, Andreas y KRÖRNER, Christian: *Strasburger – Lehrbuch der Botanik für Hochschulen* (35 ed.), Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag. 2002.

SUSSMAN, Robert W., RASMUSSEN, D. Tab, y RAVEN, Peter H.: «Rethinking Primate Origins Again», *American Journal of Primatology*, 75, 2, (2012), 95-106.

TANG, Qing, PANG, Ke, YUAN, Xunlai y XIAO, Shuhai: «A one-billion-year-old multicellular chlorophyte», *Nature ecology and evolution*, 4, 4, (2020), 543-549.

TEJEDOR, Marcelo F.: «Sistemática, evolución y paleobiogeografía de los primates Platyrrhini», *Rev. Mus. La Plata Sec. Zool.* 20, (2013), 20-39.

TRIPATHI, S. K. M. (2011). «The systematics and evolutionary perspectives of fossil fungi», Misra, J. P. Tewari y S.K. Deshmukh (eds.): *Systematics and evolution of Fungi*, Boca Raton: CRC Press, 2011, 15-27.

UHEN, M. D.: «Evolution of marine mammals: Back to the sea after 300 million years. The Anatomical Record», *Advances in Integrative Anatomy & Evolutionary Biology*, 290, 6, (2007), 514-522.

VARGAS, Pablo: «Mamíferos», VARGAS, P. y ZARDOYA, R. (eds.): *El árbol de la vida: sistemática y evolución de los seres vivos*, Madrid: Impulso Global Solutions, 2012. 409-423.

VERON, Geraldine, PATTERSON, Bruce D. y REEVES, Randall: «Global diversity of mammals (Mammalia) in freshwater», *Hydrobiologia*, 595, 1, 2007, 607-617.

VIERLING, Kerri T. y SULLIVAN, Mažeika S. P.: «Ecosystem and Landscape Management and Planning», Morrison M. L., Rodewald A. D., Voelker G., Colón M. R., Prather J. F. (eds.): *Ornithology: Foundation Analysis and Application*: Baltimore: Johns Hopkins Univ. Press, 2018, 853-881.

WANG, Xiao-Quan, y RAN, Jin-Hua: «Evolution and biogeography of gymnosperms», *Molecular Phylogenetics & Evolution*, 75, (2014), 24-40.

WHELAN, Nathan V., KOCOT, Kevin M., MOROZ, Tatiana P, MUKHERJEE, Krishanu, WILLIAMS, Peter, PAULAY, Gustav, MOROZ, Leonid L. y HALANYCH, Kenneth M.: «Ctenophore relationships and their placement as the sister group to all other animals», *Nature Ecology and Evolution* 1, (2017), 1737-1746.

WIKSTROM, Niklas, SAVOLAINEN, Vincent y CHASE, Mark W.: «Evolution of the angiosperms: calibrating the family tree», *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 268, 1482, (2001), 2211-2220.

WILF, Peter: «Late Paleocene-early Eocene climate changes in southwestern Wyoming: Paleobotanical analysis», *Geological Society of America Bulletin*, 112, 2, (2000), 292-307.

ZACHOS, James, PAGANI, Mark, SLOAN, Lisa, THOMAS, Ellen y BILLUPS, Kathrina: «Trends, Rhythms, and Aberrations in Global Climate 65 Ma to Present». *Science*, 292, 5517, (2001), 686-693.

ZARDOYA, Rafael: «Sarcopterigios», VARGAS, P. y ZARDOYA, R. (eds.): *El árbol de la vida: sistemática y evolución de los seres vivos*, Madrid: Impulso Global Solutions, 2012. 393-399

ZAREMBA-NIEDZWIEDZKA, Katarzyna, CACERES, Eva F., SAW, Jimmy H., BÄCKSTRÖM, Disa, JUZOKAITE, Lina, VANCAESTER, Emmelien... y ETTEMA, Thijs J. G.: «Asgard archaea illuminate the origin of eukaryotic cellular complexity», *Nature*, 541, (2017), 353-358.

ZELENITSKY, Darla K., THERRIEN, François, ERICKSON, Gregory M., DEBUHR, Christopher L., KOBAYASHI, Yoshitsugu, EBERTH, David A., y HADFIELD, Frank: «Feathered Non-Avian Dinosaurs from North America Provide Insight into Wing Origins», *Science*, 338, 6106, (2012), 510-514.



## V. EL SIGNIFICADO DEL AGUA EN LA EVOLUCIÓN Y DISPERSIÓN DE NUESTRA ESPECIE

**Belén López Martínez y Carmen Alonso Llamazares**

Departamento de Biología de Organismos y Sistemas,  
Universidad de Oviedo

### EL AGUA Y LA VIDA

A pesar de lo simple de su estructura, el agua, con sus dos pequeños átomos de hidrógeno de carga positiva unidos, mediante un enlace covalente, a un gran átomo de oxígeno cargado negativamente, es un elemento crucial para la vida en la Tierra y para cada organismo que en ella habita.<sup>1</sup>

Cuando en el siglo XIX Charles Darwin intentaba explicar el origen de la vida, ya afirmaba que este había tenido lugar en pequeñas charcas terrestres de agua tibia. La cuestión sigue sin estar completamente resuelta y, desde hace tiempo, los científicos mantienen abiertas las puertas a una apasionante discusión sobre el dónde y el cómo apareció el primer ser vivo del que derivaron todos los demás organismos, pasados y presentes. Son varias las hipótesis formuladas que tratan de explicar la eclosión de esa primera forma orgánica de vida a partir de materiales inorgánicos. Una de las más conocidas, durante muchos años la dominante, planteaba que el inicio de la vida estaría en un *caldo primordial* que se habría formado en aguas someras terrestres; fue propuesta, de

---

<sup>1</sup> Ball, 2008.

manera independiente, por el bioquímico A. I. Oparin y el genetista de poblaciones J. B. S. Haldane.<sup>2</sup> La hipótesis hidrotermal alcalina submarina es, sin embargo, la que actualmente parece tener más partidarios, a la luz de los experimentos sobre el surgimiento de la vida realizados por la NASA. En este caso, se propone como fuente original de la vida los respiraderos hidrotermales de las profundidades del océano, donde la actuación de factores químicos y ambientales habría dado lugar a formas primigenias de vida muy simples.<sup>3</sup>

Todos los organismos vivientes son fundamentalmente agua, lo que significa que este elemento es el componente principal de sus células, aunque la proporción varía de unos seres a otros. En los humanos, alrededor de un 60-65 % del cuerpo de un adulto es agua y esa cantidad es aún mayor si analizamos la composición de alguno de nuestros órganos: los pulmones y el cerebro, un 85 %; el corazón, el hígado y los riñones, un 75 %; los ojos cerca de un 95 %; e incluso el tejido óseo es, en más de un 30 %, agua.<sup>4</sup> Por ello, para los seres humanos, al igual que para el resto de los seres vivos, el agua es imprescindible. Podemos estar aproximadamente un mes sin ingerir alimentos, pero apenas resistiremos tres días sin beber agua. Necesitamos de su continuo suministro para poder llevar a cabo funciones vitales como la termorregulación, la reproducción, el transporte de sustancias y, por supuesto y entre muchas otras, el propio metabolismo.<sup>5</sup> En una publicación reciente se afirma que el cuerpo humano evolucionó para usar entre un 30 % y un 50 % menos de agua al día que los simios antropomorfos, que son los organismos actuales más próximos al ser humano. Los autores explican que el estrés hídrico, debido a cambios en el clima, al que nuestros ancestros se vieron sometidos, aparentemente, condujeron a adaptaciones en la dieta y en el comportamiento que permitieron una eficiente conservación del agua en el propio organismo.<sup>6</sup>

Pero, además, el agua, y en concreto su ciclo hidrológico, tiene una gran importancia para la preservación de los ecosistemas naturales y para la regulación del clima, aspectos por los que la vida en la Tierra se ve condicionada y el ser humano no es ajeno a ello. Actualmente vivimos un proceso de cambio global del clima, lo que supone una alteración significativa en los valores medios de las condiciones climáticas con respecto a lo que sería esperable. A lo largo de

---

<sup>2</sup> Kauffman, 2012.

<sup>3</sup> Barge, Flores, Baum, Vander Velde y Russell, 2019.

<sup>4</sup> Poccock y Richards, 2005.

<sup>5</sup> Bossingham, Carnell y Campbell, 2005.

<sup>6</sup> Pontzer, Brown, Wood, Raichlen, Mabulla, Harris... y Ross, 2021.

la historia geológica de la Tierra no es, ni mucho menos, el primero en suceder y eso nos permite prever sus posibles consecuencias. Los cambios climáticos han sido, en general, una amenaza para la existencia de muchas de las formas de vida que prosperan en un momento dado. Sin embargo, sí es la primera vez en que la intervención humana, a través de su actividad diaria, está alterando la naturaleza y acelerando este proceso de cambio. El resultado tangible es el desarrollo de fenómenos meteorológicos extremos, tales como sequías, riadas, vientos intensos y olas de calor, con resultados devastadores para la naturaleza en general y para nuestra especie en particular: hambrunas, desplazamientos de seres humanos, una mayor vulnerabilidad frente a las enfermedades, etc.<sup>7</sup>

Somos, pues, seres dependientes del agua, vivimos condicionados por su mayor o menor disponibilidad. Es más, las evidencias científicas han demostrado la existencia de eventos climáticos adversos en relación con la mayor o menor disponibilidad de agua en el transcurso de nuestra evolución. Por ello, no es difícil deducir que en esos momentos el papel del agua tuvo que ser importante e, incluso, en ocasiones, decisivo en el devenir evolutivo de nuestro linaje.

#### **EL PARAÍSO DEL MIOCENO COMO PUNTO DE PARTIDA**

Hace unos 16 millones de años, durante el Mioceno medio, la bonanza climática había transformado al continente euroasiático en algo parecido a un jardín del Edén de la flora y la fauna. Los nuevos óptimos de temperatura y humedad convirtieron a la mayor parte de los ecosistemas de esa gran masa continental en un paraíso frondoso de bosques caducifolios subtropicales o laurisilvas, en los que una magnífica diversidad animal y vegetal prosperaba bajo esas condiciones favorables que apenas variaban a lo largo del año. Muchos de los organismos que dominaban aquellos paisajes o sus ulteriores descendientes han desaparecido de este lugar de la Tierra o, definitivamente, se extinguieron del planeta y tan solo han dejado como testigos de su existencia sus restos fosilizados.

En la Figura 1 se muestra una recreación de aquel momento en Eurasia, donde eran frecuentes, entre otras, las especies relacionadas con los actuales pecaríes (cerdos salvajes). También ocupaban amplios territorios algunos antepasados de los hipopótamos (hoy exclusivamente en África subsahariana), especies de proboscídeos que eran parientes lejanos de los actuales elefantes y

---

<sup>7</sup> Houghton, 2015.

muy extendidos posteriormente por Europa en el Cuaternario. Los imponentes tigres de dientes de sable o macairodontinos de los que se cree que ocuparon Europa hasta la llegada de los humanos modernos (*Homo sapiens*) o los anisodones, perisodáctilos extintos emparentados con caballos y rinocerontes.

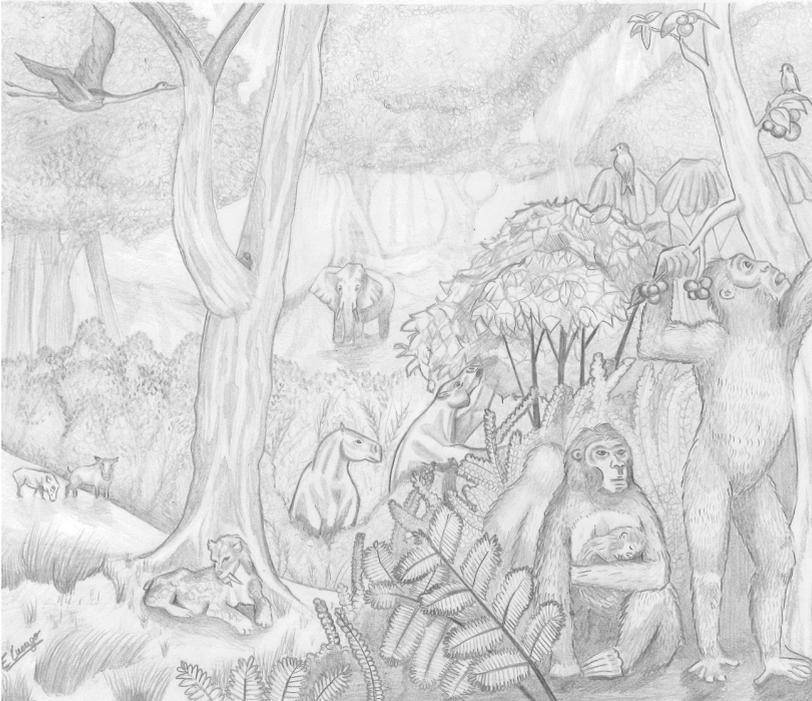


Figura 1. Ecosistema euroasiático del Mioceno medio con abundante fauna. Antepasados de los pecaríes, *Gomphotherium* y *Prodeinotherium*: proboscídeos, tigres de dientes de sable y anisodones, perisodáctilos extintos emparentados con caballos y rinocerontes. Dibujo de Elena Luengo.

De aquella época se han recuperado, en diversas localizaciones euroasiáticas, restos fósiles de un grupo de mamíferos de orígenes africanos que son antepasados muy lejanos de nuestro linaje. Se trata de algunos de los primeros simios antropomorfos extrafricanos, primates sin cola, cuyo éxito en Eurasia dio lugar a un notable incremento tanto de la diversidad como del número de primates de este tipo (radiación adaptativa). Se les conoce con el término

general de *primates hominoideos*,<sup>8</sup> aunque dentro de esta denominación se incluyen varios géneros fósiles (y, a su vez, especies) como *Pliopithecus*, *Griphopithecus*, *Sivapithecus*, *Dryopithecus*, *Lufengpithecus*, *Ouranopithecus* o *Ankarapithecus*, entre otros. Sin ninguna duda, y a juzgar por la riqueza de formas nuevas, las condiciones ecológicas de Eurasia favorecieron la rápida aparición de adaptaciones (dieta, locomoción, desarrollo encefálico, etc.) en estos simios.<sup>9</sup> Eran primates con un cerebro mayor de lo hasta entonces conocido (primates no hominoideos) y practicaban la locomoción suspensoria, aspecto que implicó el desarrollo de innovaciones corporales que, a su vez, eventualmente, pudieron haber facilitado la posición erguida en el suelo en algunas especies de la época, en condiciones de insularidad, como fue el caso de *Oreopithecus banbolii*, que habitó en entornos de bosques pantanosos y mostraba adaptaciones dentales y locomotoras para el consumo de los recursos acuáticos tales como juncos, carrizos, eneas, nenúfares, charales o equisetos, tal y como se deduce del espectro de pólenes y esporas fósiles recuperados y asociados a este primate.<sup>10</sup>

Progresivamente estos primates hominoideos fueron ampliando su área de distribución y continuaron su diversificación hasta mediados-finales del Mioceno. Hace unos seis millones de años se produjo la crisis de salinidad del Messiniense. A partir de entonces, comenzó un nuevo y gradual cambio del clima hacia condiciones más secas, frías y con una estacionalidad más marcada y heladas invernales en el hemisferio norte (reemplazamiento de faunas y extinciones de grupos). Los periodos de escasez de ciertos alimentos se hicieron habituales debido al recambio del bosque subtropical por una vegetación de tipo esclerófila, más adaptada a la sequía. Cabe recordar que los primates (subórdenes Strepsirrhini y Haplorrhini) son, en general, mamíferos de distribución tropical y fuertemente dependientes de una temperatura más o menos constante a lo largo del año. Esto les asegura un suministro constante de frutas, elemento fundamental de su dieta, aunque en porcentaje variable en cada grupo. Las nuevas condiciones en Eurasia resultaron fatales, un fuerte agente selectivo para la mayoría de esos grupos de simios hominoideos, muchos de los cuales desaparecieron para siempre. Sin embargo, algunos de aquellos se desplazaron en dirección sur siguiendo los ecosistemas más favorables y se establecieron en las zonas tropicales de Asia (antepasados de orangutanes e hilobátidos) y de África

---

<sup>8</sup> Los hominoideos actuales descendientes de los hominoideos del Mioceno son los hilobátidos, orangutanes, gorilas, chimpancés, bonobos y seres humanos

<sup>9</sup> Begun, 2015.

<sup>10</sup> Harrison y Rook, 1997.

(antepasados de gorilas, chimpancés y humanos). Entre estos simios europeos migrantes y, según algunos expertos, podría haber llegado el que sería el último antepasado común de los grandes simios africanos y del hombre —otros autores opinan que ese antepasado común no tuvo orígenes europeos—. Con el tiempo, algunas de estas poblaciones se adaptaron con éxito a los climas subtropicales y menos estacionales del continente africano y experimentaron nuevas radiaciones adaptativas en la región.<sup>11</sup>

### LOS ESTUDIOS SOBRE LA EVOLUCIÓN HUMANA

La evolución de nuestro linaje es un proceso mucho más enrevesado de lo que tan solo hace unas décadas se creía. Ni siquiera hoy en día conocemos bien sus fases, ni sus protagonistas y tampoco existe un pleno consenso acerca de las relaciones filogenéticas de nuestros ancestros —habitualmente representadas mediante un diseño arborescente—. Sin embargo, los continuos descubrimientos de fósiles y el avance en diversas técnicas de investigación aplicables a los mismos nos están permitiendo profundizar en nuestro pasado evolutivo. Antiguamente, la representación de nuestra evolución era una simple secuencia lineal antepasado-descendiente que culminaba en nuestra especie (Figura 2). Esta errónea imagen lineal ha sido muy perjudicial para la interpretación del proceso evolutivo, dando lugar a la equivocada idea de que una especie de simio progresó en el tiempo adquiriendo mejoras que, en último término, dieron lugar al *Homo sapiens*.

La forma más actual de representar la evolución temporal de linaje humano es la de un árbol envejecido, retorcido y enmarañado, reflejo del laberíntico proceso que nos ha traído hasta nosotros. Sus numerosas e incompletas ramificaciones ponen de manifiesto la complejidad de establecer relaciones entre los varios géneros y las numerosas especies<sup>12</sup> que nos precedieron en el tiempo. En nuestra historia evolutiva también existieron callejones evolutivos, líneas que no llevaron a ninguna parte y cuyos representantes desaparecieron sin dejarnos pistas de su continuidad (Figura 3). Es amplio el número de ciencias que nos aproximan a una imagen cada vez más real de cómo, cuándo, por qué y quién protagonizó cada fase. Por mencionar un par de ejemplos, los avanzados

---

<sup>11</sup> Rosas, 2019.

<sup>12</sup> Cuando se trabaja con fósiles se utiliza el concepto paleontológico de especie o morfoespecie, en el que estas quedan definidas por sus rasgos morfológicos y no entra en establecer si son o no especies biológicas.

métodos de datación de fósiles nos permiten, en la mayoría de los casos, determinar con precisión en qué momento vivieron esos grupos ancestrales. La paleoecología, por su parte, nos dibuja el escenario ecológico y los elementos ambientales que pudieron ser determinantes en el desarrollo y evolución de los rasgos que hoy nos definen. En suma, todos estos aspectos han dado lugar a ardientes y fructíferos debates dentro de la comunidad científica, reflejo, sin duda, del enorme interés por conocer quiénes somos y de dónde venimos.



Figura 2. Representación lineal de la evolución humana. Dibujo de Elena Luengo.

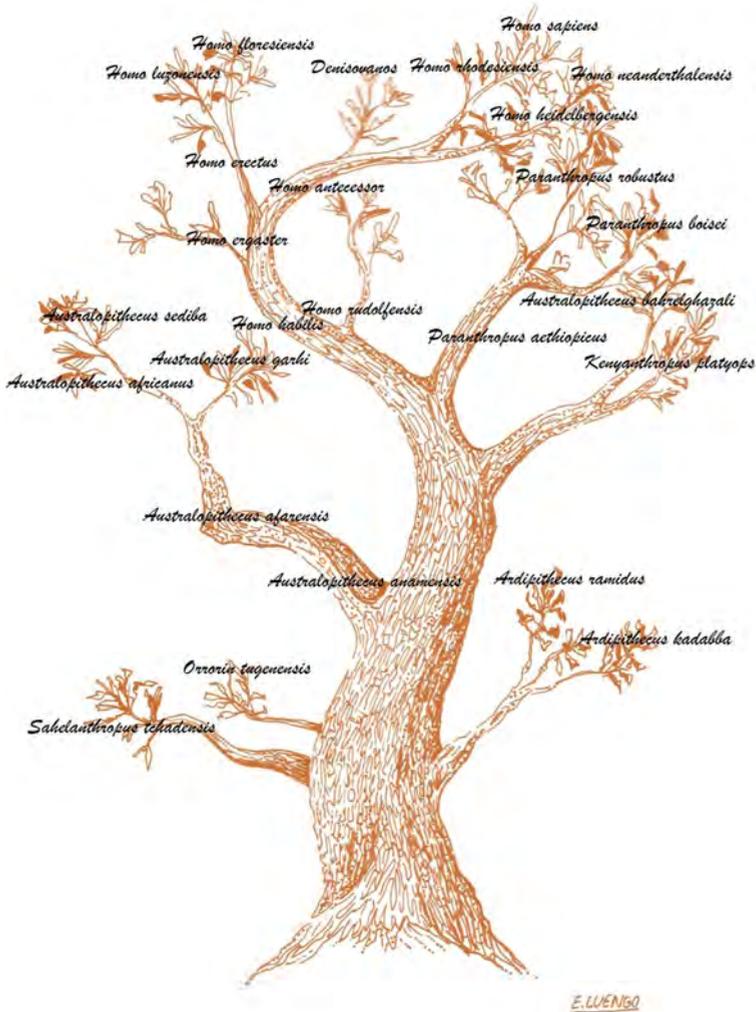


Figura 3. Esquema de la filogenia actual del linaje humano. No pretende establecer relaciones entre los grupos, solo representar la complejidad del proceso.  
Dibujo de Elena Luengo.

Las perspectivas desde las que es posible analizar el proceso evolutivo de nuestra especie son variadas y todas ellas son necesarias para una visión sintética del mismo: la anatómica, la cultural o la referida a la dispersión geográfica serían algunos ejemplos. También es posible abordarlo desde la más actual y detallada

visión genética que, desde hace ya algún tiempo y gracias al vertiginoso desarrollo de las técnicas de paleogenética, ha permitido obtener secuencias de ADN de miembros de nuestro linaje con antigüedades cada vez mayores, lo que nos ha llevado a comprender mejor la complejidad de nuestro pasado como base genética de lo que somos hoy (hibridaciones, migraciones, etc.).<sup>13</sup>

Por otro lado, también son diversos e interesantes los estudios que analizan la influencia de los factores ecológicos que, de una manera u otra, han condicionado la evolución de nuestro linaje.<sup>14</sup> De entre todos los factores ambientales, en este capítulo abordaremos el papel del agua como fuerza que influyó en nuestro aspecto físico y el desarrollo intelectual que nos caracteriza. Para finalizar, abordaremos el indiscutible papel de este elemento en la dispersión geográfica de algunos miembros de nuestro linaje y, sobre todo, de nuestra propia especie.

En nuestros días, no son pocos los humanos que sienten una gran atracción por el medio acuático y por la vida que se desarrolla en él: deportistas, científicos, naturalistas, etc. El ser humano es un mamífero que, aun siendo terrestre, es un excelente nadador y tiene una notable capacidad de buceo (o al menos tiene el potencial para serlo, claro). ¿Quién no se ha asombrado comprobando la rapidez con la que los bebés aprenden a nadar antes incluso que a caminar u observando su ancestral reflejo de inmersión? Es igualmente sorprendente el caso de algunas poblaciones del sudeste asiático, cuya vida gira en torno a los ambientes acuáticos de los que tienen unos conocimientos excepcionales. Tal es el caso de los moken del archipiélago de Mergui en el mar de Andamán, los orang laut que habitan entre Malasia, Sumatra y el archipiélago Riau o los sama-bajau que ocupan zonas del archipiélago de Jolo y también de los mares que rodean a la isla de Célebes.<sup>15</sup> Se trata de pueblos seminómadas para los que el mar es su forma de vida, compartiendo una cultura íntimamente relacionada con los entornos marinos de los que dependen en exclusiva para su subsistencia. Asimismo, han desarrollado aptitudes para la vida en ese medio, como es la capacidad de inmersión a pulmón libre (apnea) a más de cincuenta metros de profundidad, la resistencia durante cerca de 15 minutos bajo el agua en busca de presas o su excepcional vista, que les permite enfocar dentro del agua.<sup>16</sup>

---

<sup>13</sup> Krause y Trappe, 2020.

<sup>14</sup> Andrews, 2019.

<sup>15</sup> Stacey, Steenbergen, Clifton y Acciaioli, 2018.

<sup>16</sup> Stacey y Allison, 2019.

Además de esos ejemplos anecdóticos, la necesidad de consumir agua diariamente es un hecho que unifica a todos los humanos del pasado y del presente. Y, a pesar de ello, tradicionalmente, desde una perspectiva evolutiva, los científicos han dirigido sus esfuerzos no tanto a investigar el papel del agua, sino el de la alimentación, haciéndose preguntas sobre qué comían nuestros antepasados, cómo obtenían los alimentos o cómo ha ido evolucionando la dieta. Sin embargo, el agua es, igualmente, un elemento indispensable en nuestro día a día. El significado que, como fuerza moldeadora de nuestra evolución, pudo haber tenido se puede intuir contemplando el comportamiento de muchas especies de primates antropoideos no humanos (como organismos más próximos al ser humano) en la naturaleza. En ambientes acuáticos, estos otros primates se bañan, nadan, vadean a dos patas en busca de plantas y animales acuáticos e incluso se llegan a sumergir por completo.<sup>17</sup> Por homología es posible inferir que nuestros antepasados practicaban en el agua comportamientos semejantes y que su dependencia del elemento no siempre abundante pudo condicionar nuestro destino como especie. Y ni que decir tiene cuando descubrimos las posibilidades que este medio ofrecía para el desplazamiento a largas distancias.

En la década de los setenta del siglo pasado la escritora científica británica Elaine Morgan popularizó la hipótesis del simio acuático —esbozada primeramente por el biólogo marino A. C. Hardy<sup>18</sup> y conocida también como *AAH* por sus iniciales en inglés (*Aquatic Ape Hypothesis*), mediante la que trataba de explicar el origen de algunas características únicas de la humanidad: ausencia de pelo corporal, grasa subcutánea, descenso de la laringe o la locomoción bípeda, entre otras. Esta hipótesis sugería que los homínidos habrían tenido su origen en una especie acuática o que al menos pasaba una buena parte del tiempo en el agua.<sup>19</sup> A lo largo del tiempo, sus ideas recibieron desde un incómodo silencio a fuertes críticas, y también, todo hay que decirlo, contó con convencidos seguidores. En la actualidad ni siquiera se menciona en los libros de texto sobre evolución. Sin embargo, esto no significa que los medios acuáticos no jugaran un papel importante e incluso definitivo en la vida de nuestros antepasados y eso es precisamente lo que trataremos de explicar en las siguientes líneas, mediante la valoración de la interacción ecológica y económica de los homínidos con los medios acuáticos o semiacuáticos.

---

<sup>17</sup> Kempf, 2009.

<sup>18</sup> Hardy, 1960.

<sup>19</sup> Morgan, 1999.

### ¿EL ÚLTIMO ANTEPASADO COMÚN ERA ESTEAFRICANO?

Nuestra especie se incluye dentro del orden biológico de los primates y el chimpancé es el organismo que genéticamente está más próximo a nosotros, con el que compartimos un 95-98 % de nuestro genoma (la variación depende de la parte del genoma que se analice). Eso significa que humanos y chimpancés tenemos un antepasado común relativamente cercano, que se ha determinado que existió hace unos 8-6 millones de años. Por los restos fósiles de aquella época, sabemos también que era cuadrúpedo y que vivía en los densos bosques tropicales africanos.<sup>20</sup>

Durante mucho tiempo, el contexto con más seguidores para explicar la divergencia de los dos linajes, y por tanto nuestro origen, fue la hoy rechazada hipótesis ecológica del *East Side Story* de Yvens Coppens, que explicaba el proceso de diferenciación a través de un mecanismo de especiación alopátrica debido a la barrera geográfica del gran valle del Rift.<sup>21</sup> Situado en el levante africano, el Rift es una gran fractura geológica de casi cinco mil kilómetros que se extiende desde el lago Niassa en Mozambique hasta el mar Rojo. Comenzó a hacerse significativo hace unos 10 millones años (el inicio de formación podría remontarse a los 30-25 millones de años) y aún continúa fracturándose. Una consecuencia visible es la imponente muralla geológica y los profundos valles que junto con los grandes lagos caracterizan esa región oriental africana.

En tiempos del último antepasado común de chimpancés y humanos, el África ecuatorial estaba aún sometida a la influencia de las corrientes oceánicas del Atlántico que mantenían esa zona húmeda y con una cubierta forestal propia del bosque húmedo tropical. A medida que las montañas del Rift fueron ganando altura, los vientos cargados de agua comenzaron a toparse con esa barrera natural que contenía e interrumpía el avance de las precipitaciones. El resultado fue que los ecosistemas al este del Rift se fueron secando y, poco a poco, despejándose de vegetación arbórea. Las poblaciones de simios de ese lado, aisladas de las del oeste, donde la situación se mantuvo estable, tuvieron que adaptarse a ese nuevo medio abierto. Según Coppens, en esas condiciones desarrollaron los caracteres propios de nuestro linaje que, como la bipedestación o locomoción a dos pies (rasgo primigenio de nuestro linaje), les permitía desplazarse eficazmente en ambientes escasamente arbolados. Durante muchas décadas, los únicos yacimientos de homínidos que se conocían se localizaban al este del Rift, en las zonas de sabana y, por tanto, la explicación de nuestro

---

<sup>20</sup> Pilbeam y Lieberman, 2017.

<sup>21</sup> Coppens, 1994.

origen se argumentaba en la metamorfosis del paisaje debida a una menor cantidad de agua (humedad ambiental), que habría transformado el bosque tropical en pastizales, actuando como fuerza evolutiva para dar comienzo al linaje cuyos últimos representantes somos nosotros.

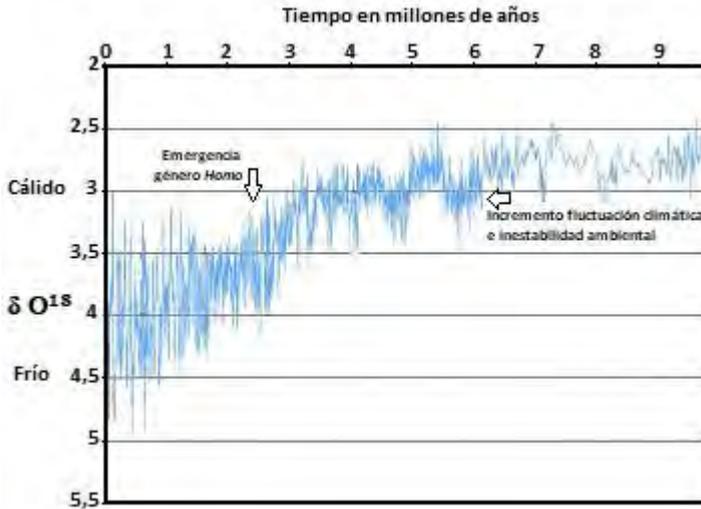


Figura 4. Curva isotópica del oxígeno ( $\delta^{18}\text{O}$ ) durante los 10 últimos millones de años. Abscisas tiempo en millones de años y ordenadas es la medida del isótopo  $\delta^{18}\text{O}$ : ratio entre el isótopo pesado  $^{18}\text{O}$  y el ligero  $^{16}\text{O}$  (adaptado de Smithsonian Institution; datos de Zachos et al., 2001).

El descubrimiento de nuevos yacimientos de homínidos muy antiguos y fuera del este africano hizo que esta hipótesis, que explicaba nuestro origen elegante pero incorrectamente, cayera en desuso. Sin embargo, el clima y sus oscilaciones, y sobre todo la influencia de periodos secos y húmedos, se han mostrado como muy relevantes en el transcurso de nuestra evolución. En la Figura 4 se representa la evolución del clima en los últimos 10 millones de años a través de la relación que existe entre dos de los isótopos de oxígeno,  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ , obtenidos de muestras de foraminíferos, unos organismos unicelulares con concha de carbonato cálcico procedentes de sedimentos de aguas profundas. En ella se detalla la temperatura y su variación en el periodo que comprende nuestra evolución. Se observa una tendencia clara hacia un mundo progresivamente más frío, seco e inestable. Destacan también las oscilaciones del clima desde los 6 millones de años y cómo esta situación de sequía se agudiza en los

últimos 2,5 millones de años, momento que coincide con la emergencia del género *Homo* en ambientes más heterogéneos (mosaicismo ambiental) y en el que se adquieren las principales adaptaciones que nos caracterizan.<sup>22</sup> A partir de entonces, algunos de nuestros ancestros amplían sus rangos de distribución tanto dentro como fuera del continente africano.

Los fósiles más antiguos que pertenecen a nuestro linaje están datados entre 7-6 millones de años y los científicos tienen todas las evidencias para afirmar que, al contrario que los simios antropomorfos miocénicos, los primeros homínidos ya no vivían en las profundidades del dosel del bosque. En ese momento se inicia un tiempo de fluctuaciones climáticas significativas que supusieron cambios drásticos en los paisajes: los desiertos se extienden allí donde había zonas verdes, y los ambientes abiertos y herbáceos comienzan a dominar las grandes áreas donde vivían.

La especie *Sahelanthropus tchadensis*, datada en unos 7 millones de años, es una de las más antiguas de nuestro linaje.<sup>23</sup> Su localización en el desierto centroafricano de Djurab, en el Chad, vino a tambalear los cimientos de lo que hasta entonces se creía que había significado el este de África en la evolución humana. La reconstrucción paleoecológica nos dice que *Sahelanthropus* no vivió en un ambiente de sabana, sino en un hábitat perilacustre, entre el paleolago Megachad y el desierto.<sup>24</sup> A partir de sus restos fosilizados, de evidencias geológicas (marcas onduladas en diferentes direcciones, indicativo de inundaciones y sequías) y de fósiles de otras especies animales de peces, anfibios, cocodrilos, hipopótamos, nutrias, tortugas, etc., y vegetales, como diatomeas y restos de plantas pantanosas, se atestigua la presencia de agua dulce y bien oxigenada en el hábitat de este homínido. Probablemente consumió ocasionalmente juncos de la orilla del lago y otra vegetación acuática disponible. Los fósiles de monos y otros mamíferos arbóreos evidencian la existencia de bosques donde, a buen seguro, *Sahelanthropus* se alimentaba también de los frutos que recolectaba.<sup>25</sup>

---

<sup>22</sup> Zachos, Pagani, Sloan, Thomas y Billups, 2001

<sup>23</sup> Rosas, 2019.

<sup>24</sup> La recuperación de homínidos (u otros vertebrados) en ambientes de humedales no significa necesariamente que estos vivieran o incluso frecuentaran estos ambientes. Los huesos se conservan preferentemente en sedimentos lacustres o fluviales, por lo que casi por defecto se asociarían siempre a entornos acuáticos. Los científicos buscan indicios de modificación carnívora o transporte fluvial en los huesos de los homínidos para afirmar que el homínido pudo haber vivido (y muerto) en este entorno.

<sup>25</sup> Finlayson, 2015.

Mucho tiempo después, hace unos 4,4 millones de años, en el este de África, vivió una especie con una mezcla de caracteres morfológicos primitivos y derivados (mosaicismo). Es *Ardipithecus ramidus* y los estudios paleoecológicos de los yacimientos de los que se extrajeron sus fósiles nos revela que ocupó hábitats de bosque ribereño o de bosque con praderas hidratadas por aguas subterráneas.<sup>26</sup> Es cierto que no sabemos en qué grado explotarían los ecosistemas acuáticos, pero podemos inferirlo de la observación de habilidades para el forrajeo ribereño o lacustre de los primates no humanos, y nada nos hace pensar que los ardipitecinos no tuvieran, al menos, las mismas capacidades y se comportasen de una manera semejante a ellos en ambientes similares.

En resumen, es muy probable que los primeros homínidos vivieran en ambientes muy parecidos al hábitat boscoso del último ancestro común con los chimpancés, donde los ecosistemas de ribera y los bosques galería con inundaciones estacionales fueron ambientes recurrentes. Estos lugares son similares a los bosques euroasiáticos del Mioceno descritos al inicio del capítulo y coinciden con los ocupados por la subespecie de chimpancé *Pan troglodytes schweinfurthii* del este de África en la actualidad.<sup>27</sup> No se han encontrado homínidos basales asociados a bosques tropicales o a bosques de montaña, como ocupan actualmente gorilas, bonobos y algunas subespecies de chimpancés (*Pan troglodytes verus*; oeste de África). De todo ello podríamos deducir que los muy lejanos antepasados miocénicos europeos que entraron en África pudieron haber ocupado los ambientes a los que ya estaban adaptados y la transición del bosque húmedo templado a un bosque más estacional podría haber sido facilitada por la existencia de lagos y otros tipos de humedales que se comportarían como ocurre actualmente en zonas de marismas, con momentos húmedos y momentos de sequía.<sup>28</sup>

### LOS AUSTRALOPITECOS Y LOS AMBIENTES ACUÁTICOS

Los australopitecos son un grupo de especies de homínidos sociales que caminaron erguidos practicando una bipedia facultativa (aún está lejos de las formas modernas de bipedestación) y que se diversificaron por el centro, este y sur de África desde hace 4,2 hasta los 2 millones de años. Entre los diferentes ambientes que se han descrito para los *Australopithecus* (especies eutrópicas)

<sup>26</sup> Cerling, Levin, Quade, Wynn, Fox, Kingston... y Brown, 2010.

<sup>27</sup> Piel, Strampelli, Greathead, Hernandez-Aguilar, Moore y Stewart, 2017.

<sup>28</sup> Finlayson, 2015.

predominan los paisajes cálidos y húmedos próximos a zonas boscosas, con puntos de agua de escasa o poca profundidad como lagos, lagunas, riberas fluviales, marismas, etc.<sup>29</sup> El por qué eligieron estos ambientes, donde la presencia de agua es importante, seguramente fuera por la mayor facilidad para encontrar alimentos, particularmente fruta. A juzgar por el registro fósil, es más improbable que ocuparan espacios abiertos y tampoco se cree que habitaran en bosques forestales densamente cubiertos, más allá de algunas incursiones en busca de frutos maduros.<sup>30</sup>

Una serie de estudios sobre desgaste dental e isótopos estables ha aportado información sobre el tipo de dieta de los australopitecinos. Se ha determinado que eran sobre todo alimentos blandos, no siendo las hojas ni los frutos secos algo habitual en su dieta, excepto como dieta de último recurso (cuando no había otra cosa). No obstante, existen excepciones dentro del grupo, como es el caso del *Australopithecus sediba*. Se trata de una especie sudafricana (yacimiento de Malapa) del Pleistoceno temprano, (1,95-1,7 millones de años), con una capacidad craneal de unos 450 cm<sup>3</sup> y aunque era un bípedo facultativo en el suelo, trepaba a los árboles como los grandes simios. Este homínido juega un papel destacado tanto en la discusión sobre la persistencia de las adaptaciones trepadoras y el cuándo evolucionaron aquellas otras que dirigen al bipedismo obligado como en el propio origen del género *Homo*.<sup>31</sup> El desgaste dental indica que su dieta sí se sostenía fundamentalmente en alimentos duros, incluyendo los juncos, lo que indica que también vivía cerca del agua y se alimentaba de plantas acuáticas.<sup>32</sup> Más del 95 % de los yacimientos de australopitecos estudiados revelan que ocupaban espacios arbolados con presencia de agua (ambientes que son nutricionalmente muy interesantes por la variedad y abundancia de alimentos), por lo que suponemos que rara vez se encontrarían lejos de ese recurso. Esto les proporcionaba la protección y el refugio de los árboles, además de importantes fuentes de alimento tanto de los árboles como otro tipo de productos comestibles que están disponibles en las orillas del agua. Por analogía con primates actuales, podemos suponer que tendrían la capacidad de vadear en busca de alimentos, o incluso de nadar y sumergirse.<sup>33</sup>

---

<sup>29</sup> Behrensmeyer y Reed, 2013.

<sup>30</sup> Finlayson, 2015.

<sup>31</sup> Williams, Prang, Meyer, Nalley, Van Der Merwe, Yelverton... y Berger, 2021.

<sup>32</sup> Sponheimer, Alemseged, Cerling, Grine, Kimbel, Leakey... y Wynn, 2013.

<sup>33</sup> Finlayson, 2015.

El cambio climático que ocurrió en el entorno de los 2,8 millones de años<sup>34</sup> supuso la reducción de las zonas pantanosas en África, que adquirieron un carácter más estacional, lo que pudo haber supuesto un gran estrés para los australopitecinos, aumentando su mortalidad. Consecuentemente también se habría intensificado la presión a favor de aquellas características que supusieran una ventaja en términos de supervivencia.

### LOS PARÁNTROPOS EN UN MUNDO QUE SE SECA

Hace 2,6 millones de años la glaciación se recrudece aún más en el hemisferio norte, y en las regiones tropicales de África se traduce en un aumento de la sequía con la resultante extensión de la aridez y de las zonas abiertas (sabana) y una significativa reducción de los bosques y de las áreas arboladas.<sup>35</sup> El clima seco y variable afectó a la vegetación leñosa, que fue progresivamente siendo sustituida por praderas boscosas (la extensión de los pastizales vendría posteriormente).

Como la disponibilidad de agua es un factor crítico en la distribución de las especies, es lógico intuir que el deterioro climático repercutió en la evolución de los homínidos. En este momento crítico se aprecian, al menos, dos modelos de adaptación diferentes: la especialización de los parántropos y las estrategias generalistas del género *Homo*.

Los parántropos representan una fase de *experimentación evolutiva*, un linaje paralelo al nuestro (*Paranthropus* significa al lado del hombre) y, por tanto, no fueron nuestros antepasados. Sus tres especies se distribuyen temporalmente entre algo menos de 3 y 1,2 millones de años en la región oriental y meridional del continente africano. Su entrada en escena coincide plenamente con esos momentos de cambios climáticos globales que tienen como consecuencia una alteración de los ecosistemas.

Los parántropos —sobre todo los esteafricanos— se especializan desde un punto de vista ecológico y de aprovechamiento de recursos. Tienen una anatomía craneal novedosa y muy especializada en lo que se refiere a su característico aparato masticador, adaptado a una dieta que incluía frecuentemente alimentos vegetales abrasivos, de bajo contenido calórico y que necesitaban poca preparación antes de su consumo; tal es el caso de algunas plantas duras tropicales como el papiro, los juncos, además de frutos secos, semillas, etc. (Figura 5).

---

<sup>34</sup> Robinson, Rowan, Campisano, Wynn y Reed, 2017.

<sup>35</sup> De Menocal, 2004.

También es posible que solo recurriesen a ellos en los momentos más críticos de escasez de otros productos más blandos y apetecibles, lo que se infiere tanto a nivel morfológico como por el desgaste funcional de los dientes.<sup>36</sup>



Figura 5. *Paranthropus* en busca de alimento. Dibujo de Elena Luengo.

---

<sup>36</sup> Rosas, 2015.

Nuevamente, el estudio paleoecológico de este grupo nos habla de una preferencia por los hábitats próximos a puntos de agua en la práctica totalidad de los yacimientos analizados.<sup>37</sup> También se describe como característica de sus nichos ecológicos la baja presencia de árboles en amplios espacios abiertos, siendo poco importantes los medios arbustivos. Debido a las circunstancias climáticas descritas, tampoco es extraño que en algunos de los yacimientos de parántropos no se hayan encontrado evidencias de árboles.<sup>38</sup>

Posiblemente su elevado grado de especialización, que les permitió sobrevivir milenios tanto en el este como en el sur de África, fue, al mismo tiempo, la probable causa de su extinción. Cuando las condiciones climáticas cambiaron de nuevo, en la transición Plioceno–Pleistoceno, no pudieron adaptarse y desaparecieron sin dejar descendencia (un callejón evolutivo sin salida).

#### LOS PRIMEROS HUMANOS Y EL APROVECHAMIENTO DE LOS RECURSOS ACUÁTICOS

Con el paso del tiempo, alguna de las especies de *Australopithecus* más recientes habría dado lugar a nuestro género *Homo* durante un periodo de aumento de la inestabilidad ambiental. Hace algo más de 2 millones de años, *Homo habilis*, *Homo rudolfensis* y, posiblemente, alguna otra especie más que aún no conocemos representaban formas de homínidos mucho más próximas a nosotros que cualquiera de las anteriores. Tradicionalmente se ha considerado como rasgos derivados (originales) del género *Homo* las extremidades inferiores más largas respecto a las superiores y una pelvis moderna. Sin embargo, la anatomía del *Australopithecus sediba*, también de esa misma antigüedad, demuestra que ambos caracteres ya estaban presentes en los últimos representantes australopitecinos, desafiando la hipótesis de que los primeros *Homo* se identificaban por un cambio claro en la eficiencia de su desplazamiento (caminar y correr). La aparición del género *Homo* sí parece que va acompañada de un significativo aumento del tamaño, que llega a ser aproximadamente del 30 %, tanto en la capacidad cerebral como en la masa corporal respecto a los australopitecos.<sup>39, 40</sup>

Los yacimientos donde encontramos restos fósiles de los primeros *Homo* evidencian su preferencia por los paisajes arbolados y su dependencia de lugares próximos a fuentes de agua, pero, a la vez, se movían habitualmente por

---

<sup>37</sup> Reed, 1997.

<sup>38</sup> Finlayson, 2015.

<sup>39</sup> Pontzer, 2012.

<sup>40</sup> Anton, Potts y Aiello, 2014.

los espacios abiertos.<sup>41</sup> Su capacidad para desenvolverse en ausencia de árboles fue, posiblemente, gracias a la necesaria explotación de refugios rocosos. Este entorno debió de resultar fundamental para la supervivencia (algunas especies tanto de *Australopithecus* como de *Paranthropus* también podrían haberlo usado esporádicamente), ya que reducía mucho el coste de ir de los árboles al agua y regresar. Aceptando esa nueva alternativa de protección y la ventaja en gasto energético que supone, no resulta nada extraño que, coincidiendo con un evento de gran sequía en África, las herramientas de piedra aparezcan, por primera vez de manera habitual, asociadas a estas primeras especies de *Homo*.<sup>42</sup> El uso de herramientas está, a su vez, vinculado con un importante cambio en la dieta a partir de ese momento. Los primeros *Homo* tenían una alimentación poco especializada y bastante generalista, aunque el análisis de la dentición indica que evitaban los alimentos duros. Algo novedoso es que la carne y las grasas animales formaban parte habitual de su dieta, estos se habían hecho accesibles gracias al empleo de sus nuevos instrumentos. La fabricación de utensilios de piedra y su uso para acceder a los tejidos animales por parte de los homínidos del Plioceno abrió paso a la explotación de un nuevo nicho alimentario al que hasta ahora no tenían acceso solo con sus propios dientes, marcando el origen de una adaptación clave de la historia evolutiva humana. Ciertamente, un paso que fue decisivo para convertirnos en humanos.<sup>43</sup>

Específicamente, la mayor masa corporal y el aumento del cerebro que hemos descrito para los primeros *Homo* se explicaría, en parte, por el aumento de la calidad de la alimentación, que sugiere una expansión dietética y un incremento, en general, en la disponibilidad de energía. Esa suficiencia nutricional resultó del uso de herramientas y la cooperación social (evolución cognitiva de las especies), que implicaba el transporte e intercambio de alimentos y materiales. Por otro lado, también influyó una decisiva reducción en la asignación de energía a otras funciones costosas como la digestión (se redujo el tamaño de los intestinos con respecto a los australopitecos), que fue redirigida hacia la locomoción bípeda eficiente, el crecimiento y la reproducción.<sup>44</sup> Y todo ello sin disminuir la energía necesaria para cerebros más grandes o una mayor actividad,<sup>45</sup> lo que supuso también un incremento en el número y la distancia de

---

<sup>41</sup> Roberts, Boivin, Lee-Thorp, Petraglia y Stock, 2016.

<sup>42</sup> Finlayson, 2015.

<sup>43</sup> Ungar, Grine, y Teaford, 2006.

<sup>44</sup> Navarrete, van Schaik y Isler, 2011.

<sup>45</sup> Pontzer, 2012.

los desplazamientos; quizás se sentían más seguros cuando se aventuraban por esos paisajes despejados de árboles y lejos de refugios en busca de alimento y de nuevos puntos de agua. No cabe duda de que su bipedestación obligada les permitía alejarse y regresar al refugio de los árboles con relativa desenvoltura.<sup>46</sup>

En suma, en esta época el cambio climático global hizo que se redujeran notablemente las zonas húmedas del continente africano, que tendrían un comportamiento más estacional (inundaciones y sequías). En la época seca las limitaciones de agua podrían haber intensificado la presión de selección en favor de aquellas adaptaciones que, progresivamente, mejoraran la supervivencia ante estas condiciones: extremidades inferiores que les permitieran moverse rápido a lo largo de los espacios y un aumento progresivo de la capacidad craneal que les permitiera recordar los lugares donde se encontraban las fuentes de agua. En esos desplazamientos descubrían nuevos emplazamientos con puntos de agua y permanecían cuando llegaban a zonas con mejores posibilidades de alimentación.

En las últimas décadas el número de yacimientos de estos primeros *Homo* que contienen evidencias de explotación de recursos terrestres y acuáticos (continentales y marítimos) asociados a esa primera industria lítica (Olduvayense) ha ido en aumento. Se han recuperado restos de mariscos, peces, aves marinas, mamíferos marinos y otra fauna acuática (tortugas, cocodrilos, etc.). En general podemos decir que no era infrecuente el forrajeo basado en peces, moluscos o invertebrados acuáticos, indicando que, definitivamente, el consumo de recursos acuáticos comenzó relativamente temprano en nuestra historia.<sup>47,48</sup> Esto querría decir que los primeros humanos, aunque esporádicamente o quizás recurrente y sistemáticamente, incorporaban productos acuáticos de alta calidad nutritiva, que podrían haber estado en el origen del definitivo y progresivo incremento del cerebro en general y, particularmente, de la corteza cerebral. Incluso, algunos proponen, que podría tratarse de las especies llamadas a protagonizar la primera salida del continente africano.<sup>49</sup>

### ***HOMO ERGASTER*, MIGRACIONES Y RECURSOS MARINOS**

Entre 1,8 y 1,6 millones de años se produce un segundo evento climático adverso, con una tendencia general al enfriamiento. El clima en África se

---

<sup>46</sup> Ruff, 2009.

<sup>47</sup> Erlandson, 2001.

<sup>48</sup> Braun, Harris, Levin, McCoy, Herries, Bamford... y Kibunjia, 2010.

<sup>49</sup> Agustí y Lordkipanidze, 2011.

vuelve más seco y variable y se producen importantes cambios en la fauna. Las fuentes de agua se vuelven más dispersas, y los espacios, aún más abiertos. Muchos de los paisajes, otrora bosque tropical, se han ido transformando en hábitats despejados con algunos parches de árboles, las fuentes de agua se dispersan aún más y el efecto de la estacionalidad (inundaciones–sequía) se agudiza.

En este escenario evolucionó un nuevo tipo de homínido, el *Homo ergaster*. El esqueleto postcranial es notablemente más próximo a los humanos modernos (sin embargo, el cráneo es perfectamente distinguible del de este) que cualquiera de las formas homínidas anteriores: su cuerpo era de mayor tamaño respecto a los australopitecos y las proporciones corporales estaban más cercanas a las modernas. Este aspecto tiene importantes implicaciones ecológicas, puesto que, en términos de coste energético, es más eficiente tener las extremidades inferiores alargadas.<sup>50</sup> Al comparar las nuevas proporciones corporales con las de un australopiteco, se ha estimado que en este último el consumo podría ser hasta un 50 % superior. Por otro lado, la posesión de miembros inferiores largos reduce también el coste energético de la carrera. Es decir, hubo una selección a favor de un cuerpo (esqueleto) optimizado para preservar la energía durante la locomoción, mejorando la habilidad para que, en su desplazamiento, los *Homo ergaster* y las especies posteriores, pudieran cubrir mucho más espacio en la misma cantidad de tiempo que sus predecesores.<sup>51</sup> Esto les permitió moverse hábilmente entre diferentes fuentes de agua durante el ciclo anual, ofreciéndoles nuevas alternativas alimenticias (dieta más variada) y, a la vez, les sometía a constantes presiones selectivas –diferentes condiciones ambientales que encontraron en sus desplazamientos– favoreciendo cualquier innovación genética que promoviera la mejora de la movilidad.

Nuestros ancestros se hicieron grandes exploradores y durante estos desplazamientos, con toda seguridad, encontraron animales recién muertos (Figura 6). Puesto que ya tenían un tamaño relativamente grande, podrían competir con otros carroñeros interesados también en esos cadáveres que representaban un tesoro energético para el mantenimiento de los miembros del grupo. Tener satisfechos los recursos imprescindibles de agua y alimentos permitió a estos grupos alejarse cada vez más.<sup>52,53</sup> Seguramente, además de la modificación del

---

<sup>50</sup> Aiello y Wells, 2002.

<sup>51</sup> Anton Potts y Aiello, 2014.

<sup>52</sup> Roach, Hatala, Ostrofsky, Villmoare, Reeves, Du... y Richmond, 2016.

<sup>53</sup> Finlayson, 2015.

hábitat o el aumento demográfico, los movimientos migratorios de otras especies animales pudieron ser otro excelente aliciente para esta dispersión.



Figura 6. El género *Homo* aprovechaba la carroña que encontraba en sus desplazamientos. Dibujo de Elena Luengo.

En cuanto a la relevancia del agua en esta especie, son varios los yacimientos africanos asociados a *H. ergaster* en los que se han recuperado

huesos, espinas, caparazones, etc. con marcas de corte. Estos restos pertenecen a especies animales acuáticas o semiacuáticas, típicas de hábitats con aguas poco profundas (lacustres y fluviales) y estacionalmente pantanosas y que podrían representar hasta un 7 % de la fauna total de los yacimientos. Se cree que esta especie consumía habitualmente peces, tortugas, cocodrilos, mamíferos acuáticos e incluso en algún momento de mayor sequía pudieron recurrir a peces pulmonados que vivían en el fango.<sup>54</sup>

El *Homo ergaster* es la primera especie de nuestro linaje de la que tenemos certeza que salió del continente natal (*Out-of-Africa 1*), lo que no descarta que este gran paso, como ya se ha apuntado, no lo hubiera dado alguna especie anterior. En esa migración se atrevió a explorar latitudes mucho más elevadas, alcanzando la vertiente sur del Cáucaso en la linde entre Europa y Asia, en donde sus descendientes (*Homo georgicus* –hominino de Dmanisi–) se establecieron y sobrevivieron a los fríos inviernos gracias a una dieta en la que el protagonismo de la carne y las grasas animales tuvo que ser importante.<sup>55</sup> El qué los llevó a aventurarse fuera y lejos de África es posible explicarlo por una combinación de factores intrínsecos, como el aumento demográfico, la bipedestación obligada, que le aportaba mejor habilidad en la dispersión, y una tecnología avanzada y, además, un conjunto de ingredientes extrínsecos relacionados con las condiciones ambientales y del clima incluyendo la apertura de corredores geográficos.<sup>56</sup>

## LOS ECOSISTEMAS ACUÁTICOS EN ASIA Y SU SIGNIFICADO EN EL LINAJE HUMANO

La especie *Homo erectus* pudo haber ocupado Asia continental y el sudeste asiático desde hace 1,8 millones de años y permaneció en la zona hasta hace unos 100 000 años, coincidiendo con la llegada de los *Homo sapiens* o *humanos anatómicamente modernos* (HAM). Algunos autores hablan de una posible distinción de dos grupos, uno de mayor antigüedad, que estaría representado por los fósiles del yacimiento de Trinil en la isla de Java (sudeste asiático) y en el sur de China, y otro más moderno, que habría ocupado zonas más templadas y menos boscosas de China.<sup>57</sup>

---

<sup>54</sup> Stewart, 2010.

<sup>55</sup> Rightmire, Lordkipanidze y Vekua, 2006.

<sup>56</sup> Carotenuto, Tsikaridze, Rook, Lordkipanidze, Longo, Condemi y Raia, 2016.

<sup>57</sup> Rosas, 2016.

El hallazgo de un número elevado de fósiles de *H. erectus* en los diferentes yacimientos de la isla de Java solo puede explicarse por un importante poblamiento de la zona en aquel momento. Alguno de los interrogantes que surgen al observar la geografía de la isla es cómo estos homínidos pudieron alcanzarla: ¿acaso ya sabían navegar?, ¿podían construir embarcaciones que facilitaran la colonización del archipiélago indonesio? Pues la respuesta parece ser que no, que, al menos, no fue necesario que hicieran frente ni al oleaje ni a las corrientes y profundidades marinas. La tectónica de placas del límite del Plio-Pleistoceno, acompañada de una mayor actividad volcánica y las propias fases glaciares, hicieron frecuentes las fluctuaciones del nivel del mar que afectaron a la configuración de las masas terrestres en el sudeste asiático. La plataforma de Sunda o Sonda, una extensión hacia el sur de la plataforma continental conocida como *Sundalandia* y que incluye la península de Malaca, las islas de Borneo, Java, Sumatra y las islas circundantes, por entonces estaba emergida (Figura 7). Este corredor pudo servir como puente terrestre y ruta de migración para *H. erectus* y muchos otros grandes mamíferos que alcanzaron la isla de Java.<sup>58</sup>

Según algunos autores, es muy probable que, dada la variedad de hábitats descritos para *H. erectus*, en general vinculados al agua (ríos, lagos, áreas pantanosas y estuarios de agua salobre),<sup>59, 60</sup> los recursos a los que habría podido acceder serían muy variados. El análisis de los fósiles confirma que habrían mantenido una dieta omnívora de tipo generalista y oportunista, que incluía productos vegetales tales como hojas, semillas o frutas, invertebrados como moluscos o insectos y, además, vertebrados de diferente tamaño.<sup>61</sup> En los yacimientos javaneses se han recuperado también cientos de restos de animales acuáticos, incluidos mamíferos, que revelan una conexión cercana de esta especie con el medio acuático. Todo ello nos hace suponer que los *H. erectus* de Java vivían próximos a las orillas de los ríos, lagos y zonas pantanosas boscosas, posiblemente con una menor influencia marina. Las estrategias empleadas por esta especie para la obtención de los recursos acuícolas incluyeron tanto el forrajeo de las riberas en busca de moluscos y peces como una fase más avanzada, en la que podrían haber iniciado una actividad pesquera muy elemental. El uso para la alimentación de moluscos (*Pseudodon*, especie de agua dulce) ha sido

---

<sup>58</sup> Carotenuto, Tsikaridze, Rook, Lordkipanidze, Longo, Condemi y Raia, 2016.

<sup>59</sup> Cabe recordar que los márgenes de los sistemas acuáticos (lagos, ríos, deltas, etc.) son tafonómicamente favorables a la fosilización.

<sup>60</sup> Huffman, Zaim, Kappelman Ruez, de Vos, Rizal, Aziz y Hertler, 2006.

<sup>61</sup> Joordens, Wesselingh, de Vos, Vonhof y Kroon, 2009.

ratificado recientemente, desde el punto de vista tafonómico. Además, también se ha determinado el uso de las valvas de estos organismos como herramientas y, lo que resulta más sorprendente, también sirvió de lienzo para un trazado geométrico en forma de zigzag, que podría ser el grabado más antiguo realizado por un miembro de nuestro linaje.<sup>62</sup>



Figura 7. Sunda y Sahul son las dos plataformas continentales emergidas durante los periodos glaciales del Pleistoceno Superior. Sunda estaba formada principalmente por la península malaya y las islas de Sumatra, Java, Bali y Borneo. Sahul se constituía por Australia, Nueva Guinea y Tasmania y otras islas circundantes. Wikimedia Commons.

Está claro que los *H. erectus* tuvieron algunas habilidades acuáticas tales como vadear, nadar o incluso realizar algunos desplazamientos simples mediante dispositivos de flotación, pero no hay evidencia de que fueran verdaderos

---

<sup>62</sup> Joordens, Joordens, d'Errico, Wesselingh... y Roebroeks, 2015.

navegantes.<sup>63</sup> Algunos autores, sin embargo, sí van más allá y consideran que esta especie poseía destrezas náuticas que posibilitaron su dispersión costera mediante el uso de embarcaciones marineras (balsas de bambú). Añaden, además, que una de las implicaciones de estas primeras expediciones marítimas es la posibilidad de que hubieran favorecido algún tipo de comunicación verbal (lenguaje rudimentario) y por lo tanto habrían sido poseedores de una tecnología y una cultura mucho más sofisticadas de lo que se pensaba hasta ahora.<sup>64,65</sup>

Los *Homo erectus* posiblemente también pudieron sufrir estrés en este tipo de ambientes boscosos, húmedos y cálidos y elegirían para instalarse los márgenes del bosque húmedo, a la vez que tratarían de buscar constantemente remedios para su supervivencia. La solución podría ser la dispersión, pero eso suponía enfrentarse al mar abierto, algo que nunca había hecho un primate, pero los científicos creen que *H. erectus* sí lo hizo.

Uno de los hechos más sorprendentes en el campo de la paleoantropología tuvo lugar en el año 2004, cuando se descubrieron, en el interior de la cueva de Liang Bua de la isla de Flores (Indonesia), un centenar de restos óseos de una especie humana de aproximadamente un metro de estatura, unos 25 kilos y un cerebro de algo más de 400 centímetros cúbicos, todo ello asociado a numerosas herramientas de piedra de diseño sofisticado. Las características anatómicas hicieron que los fósiles fueran asignados a una nueva especie, *Homo floresiensis* (~100 000–60 000 años),<sup>66</sup> que ha sido considerada como un endemismo derivado de *H. erectus* que habría alcanzado la isla alrededor de hace 800 000 años, fecha que se corresponde con las dataciones de los yacimientos líticos de Mata Menge, Boa Lesa y Kobatuwa.<sup>67,68</sup> La geografía, el clima y la vegetación del sudeste asiático en general y de la isla de Flores en particular habrían favorecido la vida cerca de los ríos y de las costas durante las fases cálidas y húmedas, cuando el bosque tropical invadía la Tierra. Una vez establecidos en la isla, los recién llegados *H. erectus* permanecieron aislados por el agua durante un tiempo suficientemente largo. Mediante el mecanismo de especiación alopátrica, debido a ese aislamiento geográfico extremo, habrían evolucionado hacia homínidos de pequeño tamaño.

---

<sup>63</sup> Erlandson, 2010.

<sup>64</sup> Barham y Everett, 2021.

<sup>65</sup> Bednarik, 2014.

<sup>66</sup> Brown, Sutikna, Morwood, Soejono, Wayhu Saptomo, y Awe Due, 2004.

<sup>67</sup> Morwood, O'Sullivan, Aziz and Raza, 1998.

<sup>68</sup> Brumm, Aziz, Van Den Bergh, Morwood, Moore, Kurniawan... y Fullagar, 2006.

Explicar la llegada del *H. erectus* a Flores es complicado. En función de la información faunística y batimétrica, no es nada probable que en aquel momento existiera algún tipo de puente terrestre entre la plataforma de Sunda y Flores, aparentemente la ruta más corta.<sup>69</sup> La otra alternativa para ese mismo itinerario ya implica la salida a mar abierto en más de una ocasión, con distancias de hasta 20 kilómetros y con una navegación especialmente complicada por la fuerte corriente de flujo de norte a sur de Indonesia. Un modelo alternativo sugiere un viaje a través de Filipinas y Célebes (Sulawesi), una ruta que, aunque hubiera requerido varios cruces entre islas, podría haber sido más fácil gracias a esas mismas corrientes norte-sur.<sup>70</sup> Independientemente de cuál fuera la ruta que siguieran, se cree que la navegación fue accidental, sin que se pueda descartar la posibilidad de un tsunami o una tormenta. En Flores también se encontraron varios taxones de mamíferos, aves y reptiles que eran capaces de flotar o nadar y que procedían de varios lugares, incluyendo Java, Sulawesi y Sahul.<sup>71</sup>

#### LOS ÁCIDOS GRASOS ESENCIALES Y EL CRECIMIENTO DEL CEREBRO

Estamos viendo cómo, desde el inicio de nuestra andadura evolutiva, el consumo de productos vegetales y animales procedentes del agua, tanto continental como marina, ha tenido un papel importante en la alimentación. Su protagonismo, además, fue acrecentándose en los últimos dos millones de años a medida que se progresaba hacia formas más modernas y cuantitativamente más encefalizadas.

En la actualidad, nuestro cerebro triplica holgadamente el tamaño del de un chimpancé o el de las primeras formas de nuestro linaje, cuyos sucesivos representantes experimentarán un aumento exponencial de la capacidad craneal hasta la aparición de los *Homo sapiens*. Desde hace tiempo, los científicos plantean que esta realidad pudo deberse, al menos en parte, a la explotación de recursos alimenticios de alta calidad procedentes de ecosistemas acuáticos.<sup>72</sup> Es decir, si la dependencia de este tipo de recursos se fue incrementando a lo largo de nuestra historia evolutiva, no podemos dejar de explicar la influencia de las estrategias de subsistencia acuáticas y las aportaciones dietéticas que ello supuso

---

<sup>69</sup> Van Heteren y de Vos, 2012.

<sup>70</sup> Morwood y van Oosterzee, 2007.

<sup>71</sup> Dennell, Louys, O'Regan y Wilkinson, 2014.

<sup>72</sup> Joordens, Kuipers, Wanink y Muskiet, 2014.

en la consecución de un cerebro con las excepcionales facultades intelectuales de los homínidos.

El tejido cerebral es energéticamente costoso, tanto en su formación como en su funcionamiento. Ese órgano, que apenas representa el 2 % del peso corporal (el 11 % en niños), consume algo más del 20 % del oxígeno y de la glucosa del organismo (hasta un 74 % en infantes) y de ahí la importancia de mantenerlo mediante el suministro de alimentos de calidad.<sup>73</sup> El mayor componente estructural del tejido nervioso en mamíferos son los lípidos (10–12 %) y entre ellos los más importantes son los ácidos grasos esenciales, lo que significa que el organismo no es capaz de sintetizarlos (carece de las enzimas para su producción) y tiene que obtenerlos a partir de la dieta.

Existen dos tipos de ácidos grasos, los saturados y los insaturados. En los saturados, todos los átomos de carbono (C) están unidos a átomos de hidrógeno (H), formando una cadena. En los insaturados, entre dos átomos de carbono puede haber un doble enlace (C=C); a mayor número de dobles enlaces se les considera más insaturados. Los ácidos grasos poliinsaturados de cadena larga de átomos de carbonos (LC-PUFA, del inglés *Long Chain PolyUnsaturated Fatty Acids*) se consideran nutrientes limitantes para un adecuado crecimiento del tejido neural. Dentro de ellos destacan la serie ω6 y la serie ω3, cuyos precursores son el ácido linoleico (ω6) y el ácido linolénico (ω3) que, mediante la acción de enzimas específicos, permite la obtención del ácido araquidónico (AA; omega-6) y del ácido docosahexaenoico (DHA; omega-3), que forman la mayor parte (~ 90 %) de la composición química del cerebro.<sup>74, 75</sup>

Los alimentos más ricos en AA son la yema de huevo, las vísceras y, en general, la carne magra de los animales terrestres, pero también son fuentes muy importantes de este elemento los peces de aguas tropicales y los mariscos (también tienen DHA, pero el contenido en AA es, habitualmente, mayor). El DHA se encuentra sobre todo en peces (pescado azul) y mariscos marinos de aguas frías, además de en algunos tipos de algas, pero en mucha menor proporción.<sup>76</sup> En general, los alimentos acuáticos, en comparación con los que se obtienen de los ecosistemas terrestres, contienen grandes cantidades de estos ácidos grasos (además de otros micronutrientes como el hierro, el yodo y diferentes vitaminas), lo que es debido al fitoplancton que, junto con las algas, representa el nivel

---

<sup>73</sup> De Felipe, 2014.

<sup>74</sup> Nelson and Cox, 2009.

<sup>75</sup> Gil and Mataix, 2005.

<sup>76</sup> Ackman, 2008.

trófico primario en los ecosistemas acuáticos de agua dulce y marinos. Estos organismos son productores de DHA y AA, que se acumulan en otros organismos acuáticos (zooplankton, moluscos, peces, etc.) a través de la cadena trófica.<sup>77</sup>

La presencia de homínidos vinculados a ambientes tanto lacustres como marinos que se ha descrito hasta ahora y que, como veremos seguidamente, se acentuará hasta la llegada de los humanos anatómicamente modernos habría proporcionado estos elementos de alta calidad nutritiva en abundancia. Inicialmente, el consumo de vegetación acuática pudo hacer que, ocasional y fortuitamente, supusiera la ingesta de pequeños peces e invertebrados que pudieron jugar un papel determinante y precursor del posterior consumo deliberado y constante de estos alimentos. El aumento de la inestabilidad climática y la tectónica en el Plio-Pleistoceno creó, como hemos visto, una mayor dependencia de los homínidos de los humedales y sus fuentes de alimentación, que fueron en mayor o menor grado sustituyendo a las terrestres. Esta intensificación del consumo de peces y moluscos, alimentos especialmente selectivos para el cerebro por contener nutrientes esenciales y hormonas, estaría detrás del papel de la dieta de alta calidad. Actuando como «liberadores» de energía que pudo ser redirigida hacia el crecimiento del cerebro, estos alimentos podrían haber iniciado o acelerado el proceso de encefalización. También esa energía extra pudo favorecer otros cambios evolutivos relacionados con el esqueleto post-craneal, con aspectos fisiológicos y de comportamiento<sup>78</sup> con implicaciones demográficas, conductuales y cognitivas.<sup>79</sup> Incluso se cree que los momentos de fluctuaciones más drásticas de los niveles de agua habrían ocasionado muertes a gran escala de peces e invertebrados acuáticos que habría resultado en un aumento cíclico de grandes cantidades de estos productos disponibles para nuestros ancestros. Las sequías del Pleistoceno medio y tardío, como veremos a continuación, obligaron a los homínidos a desplazarse hacia las zonas costeras, donde aumentó la explotación de los recursos marinos, entonces ya accesibles debido a la posesión de una industria tecnológica más avanzada.

Sin embargo, y teniendo en cuenta que es un tema complejo que necesitaría de varios párrafos para una mejor comprensión, hay autores que consideran que la dieta no pudo haber sido la única fuerza impulsora del insólito crecimiento del cerebro en nuestra evolución. Proponen que tanto el aumento de la masa cerebral como el posterior desarrollo de la cognición fueron

---

<sup>77</sup> Kainz, Arts y Mazunder, 2004.

<sup>78</sup> Stewart, 2010.

<sup>79</sup> Steele, 2010.

impulsados por fuerzas de selección direccional, que posiblemente incluyesen una selección sexual de la inteligencia; eso sí, apoyada nutricionalmente por la explotación de recursos alimenticios de alta calidad y alto contenido de LC-PUFA procedentes de ecosistemas acuáticos.<sup>80</sup>

#### EL HOMBRE DE NEANDERTAL Y EL VALOR DEL AGUA EN LA SUPERVIVENCIA

Una de las especies más emblemáticas y mejor conocidas de nuestro linaje es, sin duda, el Neandertal. *Homo neanderthalensis* habitó la mitad occidental del continente euroasiático desde hace 350 000 años, e incluso podría haberse diferenciado como especie bastante antes. Las últimas evidencias de su existencia se pierden alrededor de hace unos 40 000 años. No está claro cuál fue exactamente el punto de origen de esa especie, pero se cree que podría estar en Europa occidental.<sup>81</sup> De esta especie podemos decir que, durante buena parte de su existencia, se vio sometida a unas condiciones de vida francamente duras, entre continuas alternancias de periodos de frío extremo (glaciaciones) y periodos templados (interglaciares). En algunos momentos, durante episodios glaciales, la deriva genética produjo su particular morfotipo (neandertales clásicos) con individuos de estaturas bajas (155-165 cm), robustos (70 a 90 kg), con extremidades cortas y sobre todo muy musculosos (modelo hiperártico), diseño que se adecua muy bien a la preservación del calor en condiciones de frío. No son pocos los autores que debido a su constante necesidad de adaptación a entornos tan variables, con tamaños de población bajos y con escasa diversidad genética, reconocen a los neandertales como una especie caracterizada por una asombrosa resiliencia, que pudo haber desarrollado estrategias bioculturales y compensaciones genéticas para atenuar el efecto de la endogamia.<sup>82, 83</sup>

Los neandertales se asocian a hábitats rocosos, posiblemente más que cualquier especie hasta ahora conocida, lo que está relacionado con el clima frío de Europa en los periodos glaciares. Además, el fuego se convirtió en una parte importante de su repertorio tecnológico, con numerosos ejemplos donde se constatan sus espectaculares conocimientos pirotécnicos, con un manejo del fuego similar al documentado para los grupos del Paleolítico superior.<sup>84</sup>

---

<sup>80</sup> Joordens, Kuipers, Wanink y Muskiet, 2014.

<sup>81</sup> Wragg, 2020.

<sup>82</sup> Juric, Aeschbacher y Coop, 2016.

<sup>83</sup> Ríos, Kivell, Lalueza-Fox, Estalrich, García-Taberner, Huguet... y Rosas, 2019.

<sup>84</sup> Roebroeks y Villa, 2011.

El rango geográfico de distribución de los neandertales estuvo condicionado por las circunstancias climáticas. Llegaron a ocupar amplias zonas al oeste de Europa desde la península ibérica (llegando a Gales) hasta Siberia central e incluso más al este, pudiendo haber alcanzado China y Mongolia. En los momentos más duros de las glaciaciones, cuando los mantos de hielo llegaron a cubrir buena parte de las islas británicas y el norte del continente euroasiático, tuvieron una distribución más restringida. En semejantes condiciones solo podrían haber vivido en refugios templados y en determinados lugares como la costa suroeste entre Lisboa y Gibraltar, que, dadas las peculiaridades de su clima, suave y poco árido, pudieron haber sido el gran bastión de esta especie en los tiempos más complicados.

En el levante mediterráneo, los neandertales encontraron también un lugar donde establecerse (entre hace 80 000 y 55 000 años) y se vinculan a regiones boscosas mediterráneas. Hasta hace poco solo se habían descubierto en cuevas, pero actualmente también está confirmada su presencia en campamentos al aire libre (yacimiento de Ein Qashish).<sup>85</sup> Cabe mencionar que esa área también fue ocupada por los *Homo sapiens* y que la evidencia genética sugiere varios eventos de hibridación entre las dos especies. Ambas compartimos el 99,5 % del ADN. El componente neandertal en el genoma humano es omnipresente (al menos en poblaciones no africanas) y, sin embargo, el legado genético de los neandertales en la actualidad representa en promedio aproximadamente un 2 %.<sup>86</sup>

Si repasamos el patrón de extinción de esta especie tanto en Europa como en Oriente Medio, vemos que no fue algo homogéneo. Los neandertales desaparecen tempranamente de las áreas más continentales y, además, es de destacar que no huyen primero de las áreas más frías sino de las más áridas (Balcanes y la cuenca de los Cárpatos). Posteriormente abandonan la zona de Oriente Medio que, a pesar de ser una zona mediterránea, es muy árida, con constantes periodos de escasez de agua. No olvidemos la proximidad de esta zona al desierto que, en determinados momentos, ganaría terreno a las zonas boscosas. Paulatinamente, los neandertales se desvanecen de algunas partes de Turquía, del norte de Europa, gran parte de Italia, Francia, etc. En la península ibérica, los neandertales dejan primero las zonas interiores del norte, caracterizadas por un clima más continental. Los últimos refugios que se conocen de esta especie se corresponden con algunas zonas del sur de la península ibérica, el área del mar Negro, y zonas próximas a la costa atlántica europea (suroeste de Francia

---

<sup>85</sup> Wragg, 2020.

<sup>86</sup> Villanea y Schraiber, 2019.

y noroeste de la península ibérica), lo que muestra que las zonas costeras, de clima más suave y húmedo, resultaron favorables para los neandertales. A pesar de su final, los neandertales fueron una especie exitosa, que persistió durante varios miles de años, desarrollando diversas estrategias de subsistencia, a lo que se suma un comportamiento simbólico complejo, una tecnología avanzada e, incluso, cuidados y tratamientos médicos.<sup>87</sup>

El mayor número de yacimientos de neandertales se ha encontrado en el suroeste europeo, cerca de grandes ríos o en zonas costeras. No es difícil intuir que los ambientes acuáticos de costa e interiores fueron importantes para su supervivencia. La disponibilidad de agua, al igual que para los homínidos precedentes, fue un factor limitante y los neandertales resistieron en zonas más húmedas del norte de Europa como Gran Bretaña o el norte de Francia cuando ya habían abandonado aquellas otras del sur más continentales. Además, las líneas de costa, dependiendo de las características geológicas e hidrometeorológicas de la cuenca, son potenciales reservas de agua dulce subterránea gracias a los denominados acuíferos costeros (Figura 8). Esto es debido a que determinados lugares de la plataforma continental acumulan el agua de lluvia o procedente de capas superiores que se filtra hacia el interior. Esa agua es liberada por escorrentía, descargando al mar como manantiales submarinos. En los periodos fríos, el nivel del mar descendía (por acumularse en forma de hielo en los polos) y, al no existir la presión del mar sobre estos manantiales, el agua dulce brotaba hacia la superficie, creando oasis costeros en la plataforma emergida, agua que estaba disponible para los organismos terrestres, incluidos los grupos de neandertales.

Pero los ecosistemas acuáticos ofrecieron a los neandertales, además, la posibilidad de explotar los recursos propios de esos ambientes, algo necesario para su alimentación. En el yacimiento de Kudaro, en el Cáucaso, tenemos evidencias indirectas del consumo de salmón por parte de los neandertales.<sup>88</sup> También estos ambientes les proveían de elementos para la fábrica de herramientas e, incluso, para la elaboración de adornos corporales y de identificación personal, como las conchas perforadas.<sup>89, 90</sup> Son varios los yacimientos encontrados en Francia, Italia y España que confirman que este tipo de conductas formaban parte del repertorio de comportamientos de esta especie bastante antes de la entrada en Europa de los humanos anatómicamente modernos.

---

<sup>87</sup> Wragg, 2020.

<sup>88</sup> Bocherens, Baryshnikov and Van Neer, 2014.

<sup>89</sup> Zilhão, 2012.

<sup>90</sup> Villa, Soriano, Pollarolo, Smriglio, Gaeta, D’Orazio... y Tozzi, 2020.

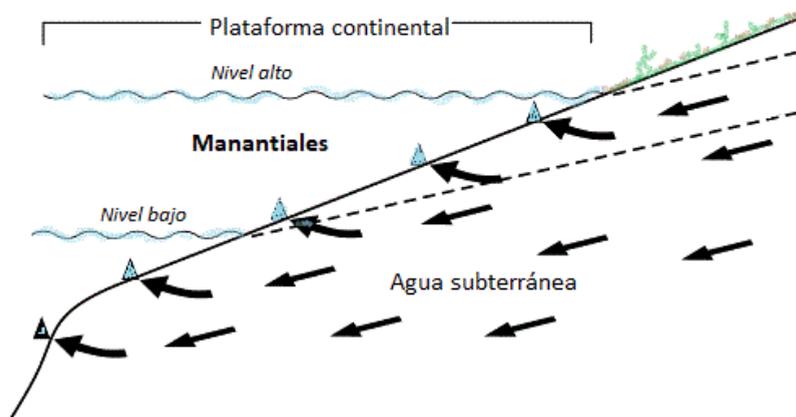


Figura 8. Modelo simplificado de manantiales costeros asociados con las posiciones inicial y final del nivel freático durante la caída del nivel del mar glacial. Triángulos azules: manantiales (oasis); líneas onduladas: niveles del mar; línea continua: superficie terrestre y fondo marino, línea discontinua: nivel freático; flechas negras delgadas: flujo principal de agua subterránea; flechas negras gruesas: flujo de agua subterránea a manantiales en la plataforma emergente. Modificado de Faure, H., Walter, R. C., & Grant, D. R. (2002).

Clive Finlayson, prestigioso especialista en esta especie, ha trabajado en Gibraltar, que se considera uno de los últimos baluartes del neandertal, aportando valiosa información sobre la trascendencia de los recursos marinos para este homínido, tanto en la cueva de Gorham como en la cueva de Vanguard. Se han obtenido evidencias de que allí los neandertales consumían moluscos, peces, aves marinas e incluso mamíferos como focas y delfines, cuyos ciclos de vida y estacionalidad, con toda probabilidad, conocían.<sup>91</sup>

En la cueva italiana de Grotta dei Moscerini se ha puesto de manifiesto que los neandertales recogían moluscos (*Callista chione*) para transformarlos en herramientas hace unos 90 000 años; se cree que se sumergían a varios metros para seleccionar las almejas. Además, es probable que recogieran piedra pómez submarina, que utilizarían como herramienta de abrasión, algo muy habitual en el Paleolítico Superior entre los *Homo sapiens*.<sup>92</sup> También se ha informado de que algunos individuos sufrían de lo que hoy se conoce como *oído de surfista*.

<sup>91</sup> Finlayson, 2015.

<sup>92</sup> Villa, Soriano, Pollarolo, Smriglio, Gaeta, D’Orazio... y Tozzi, 2020.

Se trata de una dolencia por la que uno de los huesos del canal auditivo crece en exceso como resultado del contacto reiterado con el agua fría y el viento. Es una patología habitual entre aquellos que practican deportes acuáticos.<sup>93</sup>

Mientras se escriben estas líneas, se ha publicado el descubrimiento de unas icnitas (huellas de pisadas) en el parque de Doñana, en Huelva. Las huellas pertenecen a distintos vertebrados, incluidos unos homínidos que han sido identificados como del linaje evolutivo neandertal. Se ha recuperado un rastro de casi un centenar de pisadas, datadas en, al menos, 106 000 años (las últimas informaciones hablan de 295 000 años) que fue descubierto, casualmente, a finales del año 2020. Estas marcas han permitido estudiar la forma de los pies de esta especie y también establecer las características biológicas y sociales de este grupo concreto de neandertales del sur peninsular. Uno de los aspectos más interesantes tiene que ver con el entorno donde se describen. Las evidencias neandertales han sido localizadas, fundamentalmente, en lugares protegidos como cuevas o abrigos rocosos. Sin embargo, son excepcionales en espacios abiertos como esta playa. Los investigadores piensan que esta zona pudo ser un lugar habitual de caza y pesca para el grupo de neandertales, e incluso la asociación de las huellas con grupos de sexo y edad podría indicar que ese lugar, próximo a la costa, era el que habían escogido para vivir.<sup>94</sup>

#### LOS HUMANOS ANATÓMICAMENTE MODERNOS Y SU DISPERSIÓN POR EL PLANETA

*Homo sapiens* se caracteriza e identifica anatómicamente por poseer un cráneo redondeado de frente levantada y un gran volumen encefálico de unos 1350 cm<sup>3</sup> de media. La cara es plana (ortognata) y su tamaño, reducido con relación a la bóveda craneal, la mandíbula tiene mentón y sus dientes son pequeños respecto a especies anteriores. El esqueleto poscraneal es, en general, más grácil que en otras especies de su género. La presencia de estos rasgos anatómicos, considerados modernos (humanos anatómicamente modernos o HAM), determina la adscripción de un fósil a nuestra especie.

El origen africano de *Homo sapiens* es algo casi universalmente aceptado, aunque en estos momentos ese aspecto se debate apasionadamente, siendo la escasez de fósiles de la época el principal inconveniente. Por un lado, tenemos evidencias de una indiscutible anatomía moderna en restos datados en 197 000 años y procedentes del yacimiento Omo Kibish en el valle del río Omo al suroeste

---

<sup>93</sup> Trinkaus, Samsel y Villotte, 2019.

<sup>94</sup> Mayoral, Díaz-Martínez, Duveau, Santos, Ramírez, Morales... y Díaz-Delgado, 2021.

de Etiopía (los que podrían ser los restos más antiguos de nuestra especie).<sup>95</sup> Sin embargo, en el año 2017 se dieron a conocer dataciones revisadas de fósiles marroquíes del yacimiento de Jebel Irhoud de 315 000 años de antigüedad, pero con rasgos no del todo modernos y, por lo tanto, conflictivos. Algo parecido ocurre con fósiles de Eliye Springs en Kenia (300 000-200 000 años) y Florisbad en Sudáfrica (260 000 años), además de algún otro. De ello se desprende, en primer lugar, que la aparición de nuestro linaje pudo haber sido un proceso evolutivo complejo.<sup>96</sup> Algunos estudios apuntan incluso a varias fases en la conformación de nuestra especie, que comenzaría con una de diversificación inicial, seguida de la formación de varias poblaciones arcaicas de *H. sapiens* y, posteriormente, otras etapas de fragmentación y expansión que habrían conllevado hibridaciones.<sup>97</sup>

Desde hace varios miles de años, el clima de África se venía comportando como un mosaico complejo y regionalmente variable. Cuando nuestra especie irrumpe en escena, el planeta entra en una etapa glacial que no finalizará hasta hace unos 120 000 años. África se hizo más fría y árida, y la superficie de los desiertos aumentó. Los recursos hídricos eran escasos y estaban muy dispersos y los primeros humanos africanos se asocian a estos contextos semiáridos o subhúmedos. El aspecto físico de esas primeras poblaciones de *Homo sapiens* de constitución esbelta y longilínea (completamente diferente a lo descrito para los neandertales) pudo resultar ventajoso, ya que hacía muy eficaz la disipación del calor mediante la transpiración y, por lo tanto, facilitaba sus largos desplazamientos en busca de agua y alimentos. Nuestra especie era no solo moderna en su aspecto físico, también había desarrollado nuevas capacidades y tenía nuevas herramientas, resultado de una industria lítica avanzada.

La vida, casi con seguridad, no les fue muy fácil y quizás esta sea una razón que podría justificar la escasez de restos. La humanidad tuvo que hacer frente a cuellos de botella (la evidencia genética apoya este mecanismo evolutivo aleatorio de deriva genética) que redujeron drásticamente el tamaño de las incipientes poblaciones de *H. sapiens*, seleccionándose aquellos individuos que estaban mejor preparados para un mundo de recursos hídricos limitados.

Los ríos, los lagos, los humedales y las costas eran objetivos de interés para estos humanos en su día a día y no solo para satisfacer sus propias necesidades hídricas, también de alimento. A fin de cuentas, esos lugares eran importantes

---

<sup>95</sup> Algunos fósiles podrían tener dataciones más antiguas: Jebel Irhoud en Marruecos, 315 000 años y Florisbad (Sudáfrica), 260 000.

<sup>96</sup> Hublin, Ben-Ncer, Bailey, Freidline, Neubauer, Skinner... y Gunz, 2017.

<sup>97</sup> Klein, 2019.

reservorios que, en tiempos de escasez de agua, concentraban a sus potenciales presas de caza. Los ambientes acuáticos, a su vez, habrían sido estratégicos en la expansión geográfica y, posiblemente, trampas en momentos de recesión geográfica (estaban atados a los escasos lugares con agua). Se cree que solo unos miles de humanos sobrevivieron en estas condiciones y esta sería una razón que podría explicar, al menos en parte, la baja diversidad genética que mostramos los humanos actuales. La costa sur de África pudo actuar como refugio, por sus condiciones climáticas y recursos marinos y botánicos, que podrían haber favorecido una rápida restauración de la variación genética hacia las zonas más castigadas, cuando las condiciones mejoraban.<sup>98</sup>

Otros de los grandes interrogantes que es necesario abordar son cuándo y por qué los humanos salieron del continente africano. Parece ser que la primera vez que sucedió fue hace unos 120 000 y en esa primera migración alcanzaron el Levante (este del mar Mediterráneo), aunque no tuvieron mucho éxito y después de un tiempo su pista se perdió. La siguiente salida importante de la que se tiene constancia, y que permitió a nuestra especie dispersarse por todo el planeta, tuvo lugar hace unos 70 000 años. El continente australiano sería visitado por primera vez hace algo más 50 000 años y en Europa nuestra especie no se adentraría hasta aproximadamente hace 45 000 años. Tenemos evidencias de la llegada de los humanos al norte de Asia hace unos 20 000 años y a América hace alrededor de 18 000 años. La expansión humana hacia los confines del Pacífico se ha producido en tiempos mucho más recientes, en los últimos 3000-4000 años.

En la actualidad existen distintos modelos, muchas veces complejos, que tratan de explicar la dispersión de nuestra especie y que no tienen por qué ser excluyentes.<sup>99</sup> Todos ellos son el resultado de la aplicación de técnicas analíticas que incluyen principalmente tres tipos de evidencias: paleoclimatológicas, arqueológicas y genéticas (inferencias utilizando tanto ADN fósil como aquel obtenido de poblaciones actuales). Con toda esta información, se trata de explicar la dispersión de nuestra especie y sus detalles: ¿en qué momento, por dónde, en cuántas oleadas, hacia dónde tuvo lugar? A pesar de lo apasionante de las respuestas, nuestro principal objetivo es exponer cómo, en cada etapa, el agua siguió siendo un factor limitante para los humanos modernos y un elemento fundamental en su dispersión.

---

<sup>98</sup> Roberts, 2010.

<sup>99</sup> Groucutt, Petraglia, Bailey, Scerri, Parton, Clark-Balzan... y Scally, 2015.

Hace 120 000 años,<sup>100, 101</sup> los *Homo sapiens* habían alcanzado Oriente Próximo y existen dos localidades al norte de Israel que así lo atestiguan. En las cuevas de Es Skhül, en el Monte Carmelo (Haifa), y de Jabel Qafzeh, en el Monte del Precipicio en Nazaret (Baja Galilea), se han encontrado restos de esta antigua migración de humanos modernos, posiblemente los primeros en salir de África. La cuestión de cómo llegaron aquí se ha abordado desde un punto de vista climatológico. Desde hace al menos 350 000 años, los desiertos africanos ya tenían extensiones importantes. Al norte del continente los desiertos del Sáhara y Arabia suponían una barrera geográfica insalvable. Los otros tres lados del continente (sur, este y oeste) están bañados por océanos. Por lo tanto, África, en aquel momento, estaba aislada del resto del planeta y, sin embargo, sus fósiles aparecen en el Levante mediterráneo. ¿Cómo pudieron salir de África? La respuesta es posible encontrarla infiriendo cómo era el clima en ese momento y los modelos indican que hace unos 125 000 años la situación cambió. Los desiertos del Sáhara, de Arabia y del Sinaí redujeron su extensión notablemente debido a un cambio del clima que contrajo las arenas y dio paso a unos ecosistemas más verdes. Fue solo durante unos pocos miles de años, pero el tiempo suficiente para que los humanos alcanzaran las costas del Mediterráneo. Sin embargo, no se ha encontrado ni una sola prueba de que esta supuesta primera incursión tuviera trascendencia, limitándose a movimiento migratorio de alcance limitado. Su rastro se pierde y toda evidencia de su existencia desaparece tiempo después. Hace unos 90 000 años, Oriente Medio y el Sáhara volvieron a ser inhóspitos desiertos y eso pudo haber afectado a la vida en la zona y a su supervivencia como grupo.<sup>102</sup>

El éxodo definitivo de nuestra especie, lo que se conoce como la *Gran Expansión* o también *Out-of-Africa 2*,<sup>103</sup> se refiere a cuando nuestra especie se extendió fuera de África hace unos 70 000 años y conquistó el mundo de manera efectiva (sin descartar la más reciente propuesta, actualmente en debate, del multirregionalismo africano; en este caso se sugiere que no todas las personas que pueblan la Tierra se originarían de ese grupo de nómadas que

---

<sup>100</sup> En el año 2019 se publicó la presencia del cráneo Apidima 1 en una cueva del sur de Grecia, considerado por los autores un humano temprano, y está datado en 210 000 años. Harvati, Rödning, Bosman, Karakostis, Grün, Stringer... y Kouloukoussa, 2019.

<sup>101</sup> En el año 2018 se presentó un maxilar con ocho dientes encontrado en la cueva de Misliya datado en 180 000 años Hershkovitz, I., Weber, G. Quam, Duval, Grün, Kinsley... y Weinstein-Evron, 2018.

<sup>102</sup> Roberts, 2010.

<sup>103</sup> *Out-of-Africa 1* explicado en el apartado de *H. ergaster*, migraciones y recursos marinos.

abandonó África hace menos de 100 000 años). Seguramente hubo incursiones más tempranas fuera de África antes de ese momento, pero estas no parecen haber sido muy relevantes.<sup>104</sup> Sabemos que desde hace al menos 500 000 a 70 000 años el clima fue muy fluctuante. África continental se estaba desertizando y desde los 350 000 años hasta el presente han gobernado condiciones de sequía intensa (con momentos en los que la tendencia general se suavizaba). Las reservas de agua se hicieron más escasas y dispersas, y los paisajes se secaron, mientras que los ambientes abiertos de sabana, pastizales, estepas y desiertos ganaron protagonismo.

La salida del continente africano, una vez cerrado el paso por el Sáhara, que eliminaba la posibilidad de cualquier migración hacia el norte, suponía un gran desafío, pero sabemos que salieron y las investigaciones apuntan a un lugar muy concreto como vía de salida: el mar Rojo. Efectivamente, la salida de África por el estrecho de Bab el-Mandeb (la Puerta de las Lágrimas; Figura 9) hacia los inhóspitos territorios al sur de Arabia quizá representó la gran oportunidad, y parece que lo arriesgaron todo y no salió nada mal. Este paso natural entre la costa africana y la península arábiga es muy sensible a los cambios del nivel del mar. Actualmente tiene una longitud de 115 km y unos 140 m de profundidad, pero durante los periodos glaciales el paso debió de ser menos profundo y más estrecho, llegando a tan solo 6 km de anchura. No es posible descartar otras rutas de salida por el norte y otros momentos anteriores por este mismo lugar, pero se cree que hace entre 70 000-65 000 años esta estrecha ventana se abrió por última vez. Por otro lado, los análisis genéticos llevados a cabo sobre población humana actual parecen indicar que la baja diversidad genética de nuestra especie (notablemente escasa comparada con especies próximas como el chimpancé y el gorila)<sup>105</sup> podría explicarse con base en esta migración, cuyos descendientes tuvieron éxito suficiente generación tras generación hasta llegar a nuestros días. Dicho de otra manera, todos y cada uno de los seres humanos que pueblan la Tierra podría retroceder sobre sus ancestros y encontrar su origen en este grupo pequeño (algunos autores apuntan a unas 100 personas) de intrépidos nómadas que comienzan ahora su aventura extrafricana.<sup>106</sup>

---

<sup>104</sup> La falange de una mano recuperada en Al-Wusta (Arabia) de 90 000 años de antigüedad y los dientes y la mandíbula hallados en Daoxian y Zhirendong (sur de China) apuntan a una salida anterior de África hacia el este viaje al extremo asiático hace unos 100 000 años.

<sup>105</sup> Kaessmann, Wiebe, Weiss y Pääbo, 2001.

<sup>106</sup> Roberts, 2010.



Figura 9. Continente africano. Zona ampliada estrecho de Bab el-Mandeb.  
Wikimedia Commons.

Esa potencial salida de África los llevó directamente a tierras, al sur de la península arábiga, de clima igualmente duro, en los actuales territorios de Yemen y Omán. Sin embargo, es posible que, en relación con el agua, encontrasen alguna ventaja que facilitara este desplazamiento. Sabemos que Arabia se hizo más lluviosa hace 70 000–60 000 años. Hay modelos que infieren la presencia de lluvias monzónicas en el interior de la península y ello podría haber activado una red de canales, asociados a un sistema de abanicos aluviales, a lo largo de las laderas occidentales de las montañas de Al Hajar y formar un lago en el sudeste. Además, es factible que, en aquella época y como ocurre en la actualidad, la estación lluviosa (Khareef) en Salalah (región de Dhofar), única parte del sur de Arabia directamente expuesta a los monzones del sudeste, convirtiera la zona en un reconfortante oasis. El plancton, del que se alimentan los peces,

aumenta con los monzones, trayendo abundantes cosechas en los ríos, lagos y el agua costera.<sup>107</sup> Tales condiciones climáticas facilitarían esas migraciones. Con todo, esto solo era una «isla verde», el desierto se extendía a lo largo de cientos de kilómetros. Entonces, ¿cómo cruzaron por Arabia nuestros ancestros para llegar al resto del mundo? No parece que pudieran haberlo logrado sin otras fuentes de agua dulce. Pues las había. Actualmente esas reservas dulceacuícolas están sumergidas en el mar frente a la costa sur de la península, en una línea costera que pudieron haber recorrido nuestros ancestros, pero con la diferencia de que hace 70 000 años no estaba en el mismo lugar, sino hasta 50 kilómetros más al interior, ya que el nivel del océano era mucho menor. En esa fase de enfriamiento, la disminución del nivel del mar pudo favorecer la aparición de manantiales submarinos de agua dulce, proporcionado un excelente hábitat o una idónea ruta migratoria. Eso hace pensar que, si alguna vez hubo asentamientos humanos en esa zona, el registro paleoantropológico pudo haber quedado oculto bajo el agua del mar cuando las aguas subieron después de la glaciación.

Tenemos alguna otra pista que nos indica la presencia de humanos modernos en esa zona de la península arábiga, y son los centenares de pequeñas y antiguas herramientas (microlitos) de piedra hechas por nuestros antepasados, entre hace 100 000 y 12 000 años. Los hallazgos arqueológicos de este periodo son ricos en rasgos de comportamiento moderno (tecnología de hojas, simbolismo, transporte de materias primas a largas distancias...).<sup>108</sup> Arabia continúa siendo un misterio. Quién y cuándo fabricó esas espléndidas piezas seguirá siendo parte del debate en paleoantropología. No obstante, lo que nos resulta más importante para nuestros objetivos es que, siendo o no la principal vía de la dispersión de los *H. sapiens*, en un momento u otro, allí estuvieron los nuestros y desde allí continuaron su desplazamiento hacia el este, si bien es cierto que, actualmente, tampoco podemos descartar que esas poblaciones de Arabia fueran relictas poblaciones de humanos premodernos que permanecieron refugiadas en esa zona y posteriormente se expandieron bajo condiciones climatológicas más favorables.<sup>109</sup>

Poco a poco, después de atravesar Arabia, nuestros ancestros fueron desplazándose hacia el este, alcanzaron Iraq e Irán y sabemos que llegaron a la

---

<sup>107</sup> Al Kindi, 2018.

<sup>108</sup> Rose y Petraglia, 2009.

<sup>109</sup> Rose, Hilbert, Usik, Marks, Jaboob, Černý... y Preusser, 2019.

India.<sup>110</sup> Lamentablemente el registro de fósiles sigue siendo frustrantemente escaso. En el yacimiento de Jwalpuram (Andhra Pradesh, India) se han recuperado numerosas herramientas de piedra datadas entre 78 000 y 74 000 años, muy semejantes a las encontradas en África de entre 90 000 y 60 000 años. Encima del estrato con las herramientas hay una capa de ceniza volcánica que procede de la erupción del volcán Toba, lo que ha dado origen a la hipótesis de la catástrofe de Toba, según la cual, en el periodo próximo a 74 000 años, la población humana habría pasado por un cuello de botella,<sup>111</sup> aunque no todos los estudios creen que este evento volcánico tuviera efectos muy devastadores es nuestra especie.<sup>112</sup>

Tras la erupción del Toba, la expansión de *Homo sapiens* continúa y se incrementa el número de yacimientos arqueológicos con restos de esta especie por el sudeste asiático. Esta expansión seguramente se vio favorecida por la drástica reducción de las poblaciones de *Homo erectus*. Además de utilizar una ruta costera, durante épocas de mayor humedad, se expandieron a lo largo de corredores continentales. Se han identificado pocos yacimientos costeros, aunque es posible que la mayoría de los primeros asentamientos permanezcan actualmente inundados por el diferente nivel de las aguas en la actualidad. Incluso se ha llegado a sugerir que una ruta transcontinental pudo haber resultado más favorable: las llanuras de la meseta asiática disponen de fuentes abundantes de agua, materias primas líticas y recursos animales y botánicos. Desafortunadamente, los corredores de las migraciones humanas permanecen desconocidos y, teniendo en cuenta la diversidad genética actual, es bastante probable que el modelo de poblamiento haya sido complejo y transcurrido en varias fases.

Lo cierto es que, siguiendo el curso de los grandes ríos, los humanos modernos llegaron al norte de Asia. Tenemos herramientas de piedra datadas en 40 000 años que así lo atestiguan. Esas evidencias también nos hacen preguntarnos el motivo por el cual una especie original de latitudes bajas fue capaz de internarse tan al norte, posiblemente helado, y soportar el terrible frío que lo caracteriza. Nuestra especie no estaba diseñada para ese clima y, dentro de los primates, ninguna otra especie ha llegado tan al norte en condiciones tan frías. Quizás no es casual que algunas de las agujas de hueso más antiguas del mundo se hayan localizado en yacimientos siberianos. Las agujas podrían ser consideradas uno de los grandes avances tecnológicos, pues la costura fue lo

---

<sup>110</sup> Clarkson, Petraglia, Harris, Shiptonand y Norman, 2017.

<sup>111</sup> Lahr y Foley, 1994.

<sup>112</sup> Ge y Gao, 2020.

que permitió coser pieles para soportar temperaturas extremadamente frías, a las que no se adaptaba su fisiología térmica.<sup>113</sup>

Durante más de 10 000 años, esta vida nómada llevó a grupos de familias por toda Siberia.<sup>114</sup> Descubrimientos recientes nos dicen que llegaron hasta el Océano Ártico hace cerca de 45 000 años.<sup>115</sup> Los humanos sobrevivieron en la zona durante miles de años, hasta que hace 25 000 años llegó el pico de la Edad de Hielo y todo cambió. La temperatura descendió hasta los 80 grados bajo cero y el clima se volvió seco de una manera inimaginable. De aquel momento se han podido recuperar unos pocos objetos localizados en yacimientos del sur de Siberia<sup>116</sup> que indican que, a medida que el clima empeoraba, los humanos modernos se retiraban a refugios más al sur, donde pudieron sobrevivir.

A pesar de que nuestros ancestros llegaron muy pronto a Siberia, hubo otras posibles rutas migratorias, que podrían ser mucho más antiguas, a través de la costa meridional de Asia<sup>117</sup> por las que eventualmente llegaron a China. Sus descendientes, con unos rasgos especiales que hoy asociamos a asiáticos, llenaron los amplios espacios de Asia y pasaron de la caza y la recolección a construir una de las más grandes civilizaciones del mundo.<sup>118</sup>

Finlayson, al que nos hemos referido en alguna ocasión, propuso, a partir del análisis de más de 350 yacimientos datados entre 200 000 y 10 000 años, la *hipótesis de la optimización del agua*. En resumen, venía a decir que los humanos modernos procuraban seleccionar aquellos ecosistemas que se encontraban en posiciones intermedias en el espectro de humedad, por una parte evitando los cerrados bosques tropicales hiperhúmedos, en los cuales el acceso a los recursos podría haber sido complicado, y también sorteando los desiertos hiperáridos, debido a la limitación tanto de recursos alimenticios como de agua. Los ecosistemas intermedios habrían ofrecido, según este autor, la fórmula idónea, que consistía en la suma de árboles, espacios abiertos y, por supuesto, la indispensable agua.<sup>119</sup>

A lo largo de la diseminación humana por el planeta, parece bastante acertado que, dentro de unas preferencias generales, los humanos siguieran diferentes estrategias. Así, unos grupos optaron por los campamentos al aire libre

---

<sup>113</sup> D'Errico, Doyon, Zhang, Baumann, Lázničková-Galetová, Gao... y Zhang, 2018.

<sup>114</sup> Hoffecker, 2017.

<sup>115</sup> Pitulko, Tikhonov, Pavlova, Nikolskiy, Kuperand y Polozov, 2016.

<sup>116</sup> Lbova, 2021.

<sup>117</sup> Rabett, 2018.

<sup>118</sup> Roberts, 2010.

<sup>119</sup> Finlayson (2013).

y otros, sobre todo los que migraban al norte, por las cavernas. En el norte se conocen pocos yacimientos costeros, pero son abundantes los asentamientos próximos a agua dulce, y este modelo se observa en la dispersión por Eurasia y en la ocupación más tardía de América. En otras áreas, los humanos preferían los asentamientos costeros y allí explotaban los recursos que esos ambientes les ofrecían, pero en todos ellos el común denominador es el agua. Estas diferencias nos hablan también de una constante adaptación y adaptabilidad de las poblaciones humanas.

### AUSTRALIA, NUEVA GUINEA Y TASMANIA

En qué momento nuestra especie llegó a Australia se ha debatido durante mucho tiempo y no es ni mucho menos una cuestión cerrada. El problema fundamental es la ausencia de fósiles humanos en gran parte de los yacimientos. Aunque algunos antiguos miembros de nuestro linaje (*Homo erectus*) vivían hace 1,7 millones de años en la relativamente cercana isla de Java, no fue hasta mucho más tarde cuando los humanos entraron en Australia.<sup>120</sup> Las dataciones arqueológicas parecen situar la llegada hace alrededor de 50 000 años.<sup>121</sup> Esas fechas coinciden con las de los yacimientos de Malakunanja II y Nauwalabila, en el parque Nacional de Kakadu (Tierra de Arnhem), al norte de Australia y situados frente a la isla de Timor.<sup>122</sup> Todo apunta a que inicialmente ocuparon la costa norte o noroeste, posiblemente de climas tropicales y, por tanto, bien conocidas por estos recién llegados.

En el momento de la colonización humana inicial del continente, Australia, Nueva Guinea y Tasmania estaban conectadas como una sola masa de tierra (plataforma de Sahul) y así permanecieron hasta que las grandes islas se separaron por el aumento del nivel del mar hace unos 9000 años. La distancia desde Asia era de unos 100 km y los primeros en pisar tierras australianas debían, por fuerza, tener conocimientos sobre la construcción de balsas (canoas de corteza) y las artes de navegación, pues llegaron también en el mismo periodo a Nueva Bretaña y Nueva Irlanda, separadas un centenar de kilómetros. Aunque se cree que estas poblaciones venían del sureste asiático, otra posible

---

<sup>120</sup> Hamm, Mitchell, Arnold, Prideaux, Questiaux, Spooner... y Johnston, 2016.

<sup>121</sup> Wood, Jacobs, Vannieuwenhuysse, Balme, O'Connor y Whitau, 2016.

<sup>122</sup> Recientemente se han recuperado restos en el yacimiento de Madjedbebe al norte de Australia 65-ka junto con más de 10 000 artefactos, restos de hogares, lascas de piedra, ocre molido (asociado con mica), hachas de mano y hasta una piedra de moler.

ruta podría haber sido por Nueva Guinea.<sup>123</sup> Las oscilaciones del nivel del mar fueron, en cualquier caso, el factor más determinante para los desplazamientos marinos, que muy probablemente se llevaron a cabo en los periodos de regresión marina, cuando la distancia entre islas o zonas continentales se redujo significativamente.<sup>124</sup>

La expansión al interior es más compleja y no está ausente de debate. Algunos han propuesto una rápida entrada hacia el interior. Otros formulan que primero se ocupó la costa y posteriormente el interior, aprovechando el curso de los principales ríos, que ofrecían protección y recursos. Una tercera opinión se decanta por una ocupación del interior por las zonas húmedas y evitando los parajes más áridos, a los que se llegaría mucho después.

En los lagos Willandra (Nueva Gales del Sur), un sistema de 17 lagos entre los que destaca el de Mungo, se han encontrado algunas de las más antiguas evidencias óseas fósiles de los primeros australianos, que, aunque son varios miles de años más modernos que el sitio arqueológico más antiguo de Australia, resultan clave para entender la llegada del hombre a Australia. Estos lagos se formaron hace dos millones de años, pero, víctimas del cambio climático, se secaron con el tiempo. Actualmente se han transformado en extensas zonas semiáridas con dunas y formaciones geológicas únicas. Algunos de los primeros australianos vivieron a orillas de estas importantes reservas naturales de agua. Los restos de un esqueleto femenino recuperado en las dunas del lago Mungo están datados en unos 40 000 años y se trata de una de las más antiguas cremaciones del mundo.<sup>125</sup> Pero, además de los restos humanos, se han descubierto antiguos hogares y unos grandes acúmulos de conchas, denominados *miden*. Las conchas estaban entremezcladas con herramientas diversas, que permitieron establecer patrones de subsistencia relacionados con al aprovisionamiento marítimo de pesca y de moluscos. Del estudio de estos concheros se desprende la importancia de la economía acuática local y que el papel de moluscos como el mejillón de río *Alathyria jacksoni* y el caracol de río *Notopala sublineata* fue crucial en la dieta de los estos aborígenes cazadores-recolectores.<sup>126</sup>

---

<sup>123</sup> Bird, Condie, O'Connor, O'Grady, Reepmeyer, Ulm... y Bradshaw, 2019.

<sup>124</sup> O'Connell, Allen, Williams, Williams, Turney, Spooner... y Cooper, 2018.

<sup>125</sup> Bowler, Johnston, Olley, Prescott, Roberts, Shawcross y Spooner, 2003.

<sup>126</sup> Garvey, 2017.

## LA ENTRADA EN EUROPA

La entrada en Europa de los humanos modernos se ha considerado como un acontecimiento que ocurrió más tarde de lo esperado. Es posible que el retraso pudiera deberse a las condiciones climáticas más desfavorables de la fría Europa, en contraste con un centro y sur de Asia templado y cálido, o también a la barrera que pudieron representar los neandertales, pues ese obstáculo no parece que existiera con las poblaciones autóctonas asiáticas.

Un diente y media docena de fragmentos óseos de hace unos 45 000 años (comienzos del Paleolítico Superior) encontrados en la de cueva de Bacho Kiro podrían representar los restos óseos fósiles de *Homo sapiens* más antiguos encontrados en Europa.<sup>127, 128</sup> Esta cueva se sitúa a 70 kilómetros al sur del río Danubio, en las faldas de los Balcanes (Bulgaria) y el análisis del genoma de tres individuos recuperados de su interior indica que se trataba de híbridos con neandertal.<sup>129</sup> Los científicos creen que el grupo de *Homo sapiens* que llegó a Bulgaria procedía del suroeste de Asia y pertenecía a un linaje que después se extendería hasta las estepas de Mongolia.<sup>290</sup>

Existen, al menos, dos potenciales entradas desde el norte de África al continente europeo por vía marítima: la del estrecho de Gibraltar y la del estrecho de Sicilia. Y aunque no se puede decir que no fueran posibles esas vías, parecen menos probables que las rutas terrestres. Dentro de estas últimas es probable que los humanos siguieran diferentes recorridos no excluyentes: a lo largo de los márgenes de la cuenca del mar Negro o también siguiendo la vía del Bósforo que atraviesa la masa terrestre que rodea el mar de Mármara (antiguamente mar Menor) entre Europa y Asia Menor. Un tercer itinerario que pudieron haber seguido sería un camino costero (transegeo) si los archipiélagos del mar Egeo hubieran estado unidos por puentes terrestres durante periodos de bajo nivel del mar.<sup>130, 131</sup> Precisamente en la costa de Turquía se han recuperado de la cueva de Üçağızlı, evidencias de la presencia de humanos modernos hace

---

<sup>127</sup> Hublin, Sirakov, Aldeias, Bailey, Bard, Delvigne, Endarova, Fagault, Fewlass, Hajdinjak, Kromer, Krumov, Marreiros, Martisius, Paskulin, Sinet-Mathiot, Meyer, Pääbo... y Tsanova, 2020.

<sup>128</sup> Fémur, sin contexto arqueológico, de Ust-Ischim (Omsk, Rusia) datado directamente en 45 ka cal BP (Gibbons, 2014). Este ejemplar muestra una morfología totalmente moderna.

<sup>129</sup> Hajdinjak, Mafessoni, Skov, Vernot, Hübner, Fu... y Pääbo, 2021.

<sup>130</sup> Strait, Orr, Hodgkins, Spassov, Gurova, Miller y Tzankov 2016.

<sup>131</sup> Spassov, 2016.

42 000 años. Se trata de unos caracoles agujereados, lo que sugiere que eran colgantes o parte de un collar.<sup>132</sup>

Por otro lado, los ríos fueron también fundamentales en la dispersión europea de nuestra especie. El Danubio es el segundo río más largo del continente, con casi 3000 kilómetros. Hace 40 000 años habría representado una gran autopista (corredor del Danubio) para dirigirse hacia el oeste, a un mundo totalmente nuevo.<sup>133</sup> Con esta primera gran oleada, comenzó en Europa el periodo Auriñaciense, caracterizado por la aparición de técnicas novedosas para la fabricación de figurillas, como las famosas venus paleolíticas (cuyo apogeo llegará en el Gravetiense), así como instrumentos musicales a partir de huesos de animales.

El periodo comprendido entre hace 70 000 y 14 000 años fue particularmente frío en Europa, sobre todo hace unos 25 000 años, durante el llamado Último Máximo Glacial o *pico de la Edad de Hielo*, que duró 7000 largos años. Gran Bretaña quedó completamente helada y las lenguas de hielo avanzaron hacia el sur desplazando toda forma de vida del paisaje. La vida se hizo imposible en esas condiciones árticas. Algunos pequeños grupos de cazadores-recolectores se habrían reunido para sobrevivir durante los largos y crudos inviernos en regiones de clima más suave, aprovechando los recursos de esos lugares. Parece que fueron dos los principales refugios para estos humanos: la zona franco-cantábrica (lo que hoy corresponde al norte de España y el sur de Francia), y una provincia periglacial en las llanuras de la actual Ucrania.

En las zonas de valles, con un microclima más cálido, donde las temperaturas podían ser varios grados superiores a las que había en la cima de las montañas y rodeadas de fuentes de agua y abundantes cuevas y abrigos rocosos, la vida pudo continuar. El arte más antiguo de Europa occidental se desarrolló y evolucionó entre las poblaciones de cazadores-recolectores de *Homo sapiens* en ese ambiente glacial del hemisferio norte durante el Paleolítico Superior (36 000–13 000 años). Los lugares de arte rupestre más importantes se encuentran próximos al mar, como Altamira y La Garma en España, o en valles fluviales como Lascaux (valle de Vézère), Niaux, Cussac, Pech-Merle y Chauvet (valle de Ardèche, cerca de la costa mediterránea), todas ellas en Francia. Su estudio es relevante para comprender aspectos tan interesantes como el lenguaje simbólico a través de las formas en que se representan los animales y en la disposición del espacio artístico.<sup>134</sup>

---

<sup>132</sup> Çilingiroğlu y Dinçer, 2021.

<sup>133</sup> Floss, Fröhle y Wettengl, 2016.

<sup>134</sup> Geneste, 2017.

## LA LLEGADA A AMÉRICA

Existen varios modelos que, a lo largo del tiempo, han tratado de explicar la primera llegada del hombre moderno a América (paleoamericanos o paleoindios). La más aceptada explica una llegada desde Asia a través del estrecho de Bering, que actualmente tiene una longitud de 87 kilómetros y una profundidad de entre 30 y 50 metros, pero no siempre fue así. Durante la última etapa glaciaria que conoció la Tierra, la glaciación Wisconsin, la concentración de hielo en los polos hizo descender el nivel de los océanos en unos 120 metros y se crearon conexiones en varios puntos del planeta, incluida esta zona. Ese descenso de las aguas pudo haber dejado al descubierto un amplio territorio que alcanzó 1500 kilómetros de ancho, uniendo Siberia y Alaska hace unos 40 000 años (70 000–10 000).

En el centro de Beringia, hace entre 24 000 y 9000 años, había asentamientos humanos. En aquel entonces era una zona de tundra arbustiva con algunos árboles, que se caracterizó, dada la alta latitud, por un patrón de temperaturas inesperadamente suaves, pero que se explican por las corrientes de circulación atmosférica del Pacífico norte, con aires húmedos y relativamente cálidos.<sup>135</sup> Esta población,<sup>136</sup> según información genética, pudo haber entrado en América siguiendo una ruta costera después de 23 000 años, que es cuando se abrió un corredor viable. La inmensa capa de hielo se movió hacia los bordes, dividiéndose en dos: placa de hielo cordillerano y placa de hielo laurentino. Los resultados del estudio también sugieren que las actuales diferencias genéticas se deben a cambios genéticos o eventos que ocurrieron después de la migración inicial.<sup>137</sup>

Algunos investigadores defienden una ruta en la dispersión de los humanos en América a través del interior del continente, por el territorio de Yukón y Alberta, a partir de la evidencia de un corredor para el paso del bisonte hace 13 000 años.<sup>138</sup> Hace entre 11 500 y 11 000 años se abrió otra posible ruta a través de un corredor libre de hielo a lo largo del lado oriental de las Montañas Rocosas. Hay muchos yacimientos en esas fechas que se caracterizan por la presencia de puntas de flecha de la cultura Clovis, típica de los antiguos cazadores de mamuts americanos.

---

<sup>135</sup> Hoffecker, Elias, O'Rourke, Scott y Bigelow, 2016.

<sup>136</sup> Algunos también dicen que esta población fue sustituida por poblaciones relacionadas. Moreno-Mayar, Potter, Vinner, Steinrücken, Rasmussen, Terhorst... y Willerslev, 2018.

<sup>137</sup> Lesnek, Briner, Lindqvist, Baichtal y Heaton, 2018.

<sup>138</sup> Heintzman, Froese, Ives, Soares, Zazula, Letts... y Shapiro, 2016.

Al sur de Chile se encuentra el yacimiento de Monte Verde, datado en 14 600 años, lo que supondría que, desde su entrada, los humanos hicieron un recorrido de norte a sur en tan solo unos 1500 años. No se sabe con certeza si esas personas llegaron a Monte Verde por una ruta interior o costera, pero todo indica que estaban acostumbradas a explotar los recursos costeros durante todo el año. Este yacimiento se conoce desde los años setenta del siglo pasado, a partir de multitud de huesos de animales extintos, como los mastodontes. En la zona se identificaron tanto un campamento humano como un basurero donde los primeros habitantes de Sudamérica arrojaban los desperdicios a finales del Pleistoceno. Sus moradores poseían un profundo conocimiento de los recursos de la región y los utilizaban con gran habilidad. Era una zona costera próxima a grandes bosques, donde recolectaban hierbas y frutos. Periódicamente viajaban al mar y traían sal, algas y mariscos, igual que los actuales chilotes (habitantes del archipiélago de Chiloé, en el sur de Chile). Por alguna razón, el nivel freático de la zona ascendió súbitamente, sorprendiendo a sus pobladores, que abandonaron el campamento apresuradamente. La zona se cubrió de sedimentos y por encima se formó una turbera volcánica que protegió las evidencias de este asentamiento humano del ataque bacteriano y de la humedad, permitiendo su preservación.<sup>139</sup>

La datación del yacimiento de Monte Verde sugiere un movimiento muy rápido de dispersión que podría entenderse si esos primeros americanos hubieran seguido la costa occidental del continente. Actualmente esas vías estarían ocultas bajo el mar, lo que explica que no hayan aparecido restos óseos o arqueológicos. Cabe pensar que fueran varios los grupos de personas que viajaban a lo largo de la costa del Pacífico (Figura 10). En su desplazamiento podrían haberse servido de los recursos marinos e, igualmente, haber explotado los de interiores de los cientos de cuencas fluviales que descienden hasta el mar de la larga cadena montañosa entre Alaska y Tierra del Fuego.<sup>140</sup> La hipótesis de la autopista de algas marinas (*kelp highway hypothesis*) propone que los ecosistemas de bosques de algas marinas pudieron haber favorecido el movimiento de los nómadas marítimos de Asia a las Américas a finales del Pleistoceno. Los bosques de kelp (o quelpos; algas pardas de la familia *Laminariaceae*), que crecen en aguas frías cercanas a la costa, ofrecen algunos de los ambientes más productivos de la Tierra y un hábitat que sustenta una diversa gama de organismos marinos.<sup>141</sup>

---

<sup>139</sup> Dillehay, 2004.

<sup>140</sup> Dillehay, Ramirez, Pino, Collins, Rossen y Pinot-Navarro, 2008,

<sup>141</sup> Erlandson, Graham, Bourque, Corbett, Estes y Steneck, 2007.



Figura 10. Las embarcaciones en el desplazamiento por el mar de los primeros americanos. Dibujo de Elena Luengo.

### LA OCEANÍA REMOTA

Dada la distancia desde los continentes y la dispersión de las islas más orientales del Pacífico, no resulta nada extraño que fueran estas las últimas del planeta en ser ocupadas por los *Homo sapiens*. Sin embargo, podemos considerar que la dispersión humana a esa zona hace más de tres milenios fue una de las hazañas más impresionantes de nuestra historia antigua en relación con el agua, tanto por las distancias como por los desafíos de las travesías.

La colonización de las islas de la Oceanía remota, al este de Melanesia y Polinesia, tuvo que esperar a los últimos 3500-3000 años. Estas migraciones son muy tardías, más de 40 000 años después de la ocupación humana de las intervisibles islas próximas al binomio Australia-Nueva Guinea (Oceanía cercana). Solo a partir de entonces los viajeros se trasladaron al este, hacia el océano abierto, donde las islas pueden estar separadas por semanas de viaje.<sup>142</sup>

Para explicar este hecho se ha recurrido a argumentos culturales relacionados con el desarrollo de una tecnología lo suficientemente avanzada para la

---

<sup>142</sup> Cochrane, 2018.

fábrica de las primeras naves de vela. Con estas novedosas embarcaciones, sus fabricantes eran capaces de realizar viajes marítimos de larga distancia transportando tanto a las personas como a las plantas y animales domesticados necesarios para establecerse como comunidades agrícolas. La imposibilidad de emprender largos viajes antes de ese momento posiblemente se viera afectada por el desarrollo tardío de una tecnología agrícola bien adaptada y transportable que abriría las puertas a la colonización a largo plazo.<sup>143</sup> Por supuesto, los recursos marinos como la pesca y el marisqueo intensivo tuvieron un papel fundamental en la economía de estos pueblos.

Interpretaciones alternativas se han apoyado en factores ambientales que relacionan los fluctuantes niveles del mar de la época con entornos costeros inestables unos 6000 años antes del presente, que pudieron haber limitado el potencial de los asentamientos costeros. Entre 12 000 años y 7000 años (comienzos del Holoceno) el nivel del mar había descendido mucho y hubo un aumento muy notable de los arrecifes, de los ecosistemas de estuarios y de las lagunas litorales. Al mismo tiempo, una gran expansión de los asentamientos costeros llevó a un significativo incremento de la explotación humana de los recursos de esos ambientes. En el Holoceno Medio (6000–4000 años antes del presente), ocurrió el fenómeno inverso: se habla de una importante disminución de los recursos litorales relacionada con la caída del nivel de las aguas en todo el océano, que pudo haber empujado a iniciar la última etapa de la expansión humana en el resto del Pacífico.<sup>144</sup>

Estos primeros exploradores, de los que existen dudas sobre si procedían de Asia (cultura austronésica) o eran originarios de Oceanía, fabricaban un tipo de cerámica decorada de manera distintiva, la cultura lapita, que es la evidencia arqueológica de los primeros asentamientos culturales en estos archipiélagos. Esta cultura engloba, además de la propia cerámica, otros elementos como anzuelos, arpones de pesca y herramientas agrícolas. La dispersión coincide con la expansión de la cerámica, que, debido probablemente a diferentes causas (demográficas, ambientales e incluso la innata curiosidad humana), llevó a la gente a buscar nuevos hábitats más productivos.<sup>145</sup>

En la primera fase de la expansión (3500–2500 años antes del presente) alcanzaron el oeste de la Micronesia (islas Marianas y Palaos) y Melanesia hasta los archipiélagos de Fiyi, Samoa y Tonga, y muchas otras islas intermedias, lo

---

<sup>143</sup> Skoglund, Posth, Sirak, Spriggs, Valentin, Bedford... y Reich, 2016.

<sup>144</sup> Pope y Terrell, 2007.

<sup>145</sup> Cochrane, 2018.

que suponía cubrir distancias de entre 800 y 2000 kilómetros.<sup>146</sup> La segunda fase de colonización (a partir de 2500 años antes del presente) vino después de una larga pausa de unos 2000 años, en la que la cultura lapita desapareció. Los humanos se establecen en unos pocos siglos en lo que se conoce como el triángulo polinesio cuyos vértices son Hawái, la Isla de Pascua y Nueva Zelanda y, por supuesto, incluyendo muchos atolones cuyos únicos recursos eran acuáticos.<sup>147</sup> La brecha temporal entre las dos fases se piensa que podría estar relacionada con una combinación de una mayor actividad del fenómeno del Niño durante el Holoceno tardío y con el desarrollo de la canoa de doble casco que permitió a los polinesios transportar más personas, provisiones, plantas y animales domesticados e ir más lejos, alcanzando distancias que oscilan entre los 2400 y los 4100 km, y más rápido que nunca.<sup>148</sup>

En definitiva, por la propia naturaleza de organismos vivos, el agua ha sido un elemento fundamental a lo largo de nuestra evolución y lo sigue siendo para las poblaciones actuales en su día a día. Aparte de satisfacer las necesidades hídricas, nos ha procurado alimentos de alta calidad que han sido el empuje que ha favorecido el desarrollo de rasgos anatómicos, fisiológicos y de comportamiento que nos han traído a nuestro aspecto moderno e impulsaron el destacado potencial cultural del *Homo sapiens*. Los sistemas acuáticos han sido refugios y fuentes de patrimonio genético en los momentos climáticos más difíciles, indultándonos a poder seguir siendo. Además, nos han permitido viajar lejos de la cuna africana hasta llenarlo todo y complacer el humano deseo de explorar y descubrir. Incluso ahora, cuando el hombre, con la vista puesta en la inmensidad del universo, sueña con nuevas aventuras lejos de la Tierra, el hallazgo de agua en otros planetas o en las gigantescas nubes moleculares donde nacen las estrellas continúa siendo nuestra gran esperanza.

## REFERENCIAS

ACKMAN, Robert G.: «Fatty acids in fish and shellfish», C. K. Chow (ed.): *Fatty Acids in Foods and Their Health Implications*: London: CRC Press, 2008, 155-185.

AGUSTÍ, Jordi y LORDKIPANIDZE, David: «How “African” Was the Early Human Dispersal out of Africa», *Quaternary Science Reviews*. 30, (2011), 1338-1342.

---

<sup>146</sup> Fitzpatrick y Erlandson, 2018.

<sup>147</sup> Kirch, 2017.

<sup>148</sup> Montenegro, Callaghan y Fitz-Patrick, 2016.

AIELLO, Leslie C. y WELLS, Jonathan C. K.: «Energetics and the evolution of the genus Homo», *Annu. Rev. Anthropol.* 31, (2002), 323-338

AL KINDI, Mohammed H.: *Evolution of Land and Life in Oman: an 800 Million Year Story*, Cham, Switzerland: Springer, 2018.

ANDREWS, Peter: «Last Common Ancestor of Apes and Humans: Morphology and Environment», *Folia Primatologica*, (2019), 1-27.

ANTON, Susan C., POTTS, Richard y AIELLO, Leslie C.: «Evolution of early Homo: An integrated biological perspective», *Science*, 345, 6192, (2014), 1236828-1236828.

BALL, Philip: «Water as an Active Constituent in Cell Biology», *Chemical Reviews*, 108, 1, (2008), 74-108.

BARGE, Laura M., FLORES, Erika, BAUM, Marc M., VANDERVELDE, David G. y RUSSELL, Michael J.: «Redox and pH gradients drive amino acid synthesis in iron oxyhydroxide mineral systems», *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116, 11, (2019), 4828-4833.

BARHAM, Lawrence y EVERETT, Daniel: «Semiotics and the origin of language in the Lower Palaeolithic», *Journal of Archaeological Method and Theory*, 28, 2, (2021), 535-579.

BEDNARIK, Robert G.: *The First Mariners*, New Delhi: Research Press India. 2014.

BEGUN, David R.: *The real planet of the apes: a new story of human origins*, Princeton: Princeton University Press. 2015.

BEHRENSMEYER, Anna K. y REED, Kaye E.: «Reconstructing the habitats of Australopithecus: Paleoenvironments, site taphonomy, and faunas», K. E. Reed, J. G. Fleagle, R. E. Leakey (eds.): *The paleobiology of Australopithecus*, Dordrecht: Springer, 2013, 41-60.

BIRD, Michel I., CONDIE, Scott A., O'CONNOR, Sue, O'GRADY, Damien, REEPMAYER, Christian, ULM, Seam, ZEGA, Mojca, SALTRÉ Frédéric y BRADSHAW, Corey J. A.: «Early human settlement of Sahul was not an accident», *Scientific Reports*, 9, 8220, (2019), 1-10.

BOCHERENS Hervé, BARYSHNIKOV Gennady y VAN NEER Wim: «Were bears or lions involved in salmon accumulation in the Middle Palaeolithic of the Caucasus? An isotopic investigation in Kudaro 3 cave», *Quat Int*, 339-340, (2014), 112-118.

BOSSINGHAM, Mandi J., CARNELL, Nadine S. y CAMPBELL, Wayne W.: «Water balance, hydration status, and fat-free mass hydration in younger and older adults», *Am J Clin Nutr.* 81, 6, (2005), 1342-1350.

BOWLER, James M., JOHNSTON, Harvey, OLLEY, Jon M., PRESCOTT, John R., ROBERTS, Richard G., SHAWCROSS, Wilfred y SPOONER, Nigel A.: «New ages for human occupation and climatic change at Lake Mungo, Australia», *Nature*, 421, (2003), 837-840.

BRAUN, David R., HARRIS, John W. K., LEVIN, Naomi. E., MCCOY, Jack T., HERRIES, Andy I. R., BAMFORD, Marion K., BISHOP, Laura C., RICHMOND, Brian G. y KIBUNJIA, Mzalendo: «Early hominin diet included diverse terrestrial and aquatic animals 1.95 Ma in East Turkana, Kenya», *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107, 22, (2010), 10002-10007.

BROWN, Peter, SUTIKNA, Thomas, MORWOOD, Michael J., SOEJONO, Raden P., JATMIKO, SAPTOMO, Wayhu E. y AWE DUE, Rokus: «A new small bodied hominin from the late Pleistocene of Flores, Indonesia», *Nature* 431, (2004), 1055-1061.

BRUMM, Adam, AZIZ, Fachroel, Van den BERGH, Gert D., MORWOOD, Michael J., MOORE, Mark W., KURNIAWAN, Iwan, HOBBS, Douglas R. y FULLAGAR, Richard: «Early stone technology on Flores and its implications for *Homo floresiensis*», *Nature*, 441, (2006), 624-628.

CAROTENUTO, Francesco, TSIKARIDZE, Nikoloz, ROOK, Lorenzo, LORDKIPANIDZE, David, LONGO, Laura, CONDEMI, Silvana y RAIÁ, Pasquale: «Venturing out safely: The biogeography of *Homo erectus* dispersal out of Africa», *Journal of Human Evolution*, 95, (2016), 1-12.

CERLING, Thure E., LEVIN, Naomi. E., QUADE, Jay, WYNN, Jonathan. G., FOX, David L., KINGSTON, John D., KLEIN, Richard G. y BROWN, Francis H.: «Comment on the Paleoenvironment of *Ardipithecus ramidus*», *Science*, 328, 5982, (2010), 1105-1105.

ÇILINGIROĞLU, Çiler y DİNÇER, Berkay: «Two Possible Upper Paleolithic Sites on the Karaburun Peninsula, Turkey», *J Paleo Arch.*, 4, 2, (2021), 1-11.

CLARKSON, Chris, PETRAGLIA, Michael, HARRIS, Clair, SHIPTON, Ceri y NORMAN, Kasih: «The South Asian Microlithic: *Homo sapiens* Dispersal or Adaptive Response?», *Lithic Technological Organization and Paleoenvironmental Change*, (2017), 37-61.

COCHRANE, Ethan E.: «The Evolution of Migration: The Case of Lapita in the Southwest Pacific», *J Archaeol Method Theory* 25, (2018), 520-558.

COPPENS, Yves: «East Side Story: The Origin of Humankind», *Scientific American*, 270, 5, (1994), 88-95.

D'ERRICO, Francesco, DOYON, Luc, ZHANG, Shuangquan, BAUMANN, Malvina, LÁZNIČKOVÁ-GALETOVÁ, Martina, GAO, Xing, CHEN, Fuyou y ZHANG,

Yue: «The origin and evolution of sewing technologies in Eurasia and North America», *Journal of Human Evolution*, 125, (2018), 71-86.

DE FELIPE, Javier: *El Jardín de la Neurología: Sobre lo Bello, el Arte y el Cerebro*, Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 2014.

DE MENOCA, Peter B.: «African climate change and faunal evolution during the Pliocene–Pleistocene», *Earth and Planetary Science Letters*, 220, 1-2, (2004), 3-24.

DENNEL, Robin W., LOUYS, Julien, O'REGAN, Hannah J. and WILKINSON, David M.: «The origins and persistence of *Homo floresiensis* on Flores: biogeographical and ecological perspectives», *Quaternary Science Reviews*, 96, (2014), 98-107.

DILLEHAY, Tom D., RAMIREZ, Carlos, PINO, Mario, COLLINS, Michael B., ROSSEN, Jack and PINO-NAVARRO, Jimena D.: «Monte Verde: seaweed, food, medicine and the peopling of South America», *Science*, 320, (2008), 784-786.

DILLEHAY, Tom D.: *Monte Verde: un asentamiento humano del pleistoceno Tardío en el sur de Chile*, Santiago: Lom Ediciones, 2004.

ERLANDSON, Jon M., GRAHAM, Michael H., BOURQUE, Bruce J., CORBETT, Debra, ESTES, James A. y STENECK, Robert S.: «The Kelp Highway Hypothesis: Marine Ecology, the Coastal Migration Theory, and the Peopling of the Americas», *The Journal of Island and Coastal Archaeology*, 2, 2, (2007), 161-174.

ERLANDSON, Jon M.: «Ancient immigrants: archaeology and maritime migrations», Lucassen, J., Lucassen, L., Manning, P. (eds.): *Migration History: Multi-disciplinary Approaches*: Leiden: Brill, 2010, 189-214.

——— «The Archaeology of Aquatic Adaptations: Paradigms for a New Millennium», *Journal of Archaeological Research*, 9, (2001), 287-350.

FAURE, Hugues, WALTER, Robert C. y GRANT, Douglas R.: «The coastal oasis: ice age springs on emerged continental shelves», *Global and Planetary Change*, 33, 1-2, (2002), 47-56.

FINLAYSON, Clive: «The Water Optimisation Hypothesis and the human occupation of the mid-latitude belt in the Pleistocene», *Quaternary International*, (2013), 300, 22-31.

——— *The improbable primate. How water shaped human evolutions*, Reino Unido: Oxford University Press, 2015.

FITZPATRICK, Scott M. y ERLANDSON, Jon M.: «Island Archaeology, Model Systems, the Anthropocene, and How the Past Informs the Future», *The Journal of Island and Coastal Archaeology*, 13, 2, (2018), 283-299.

FLOSS, Harald, FRÖHLE, Simon y WETTENGL, Stefan: The Aurignacian along the Danube Its Two-Fold Role as a Transalpine and Cisalpine Passageway of Early *Homo sapiens* into Europe. In R. Krauss, H. Floss (eds.): *Southeast Europe Before Neolithisation*. Proceedings of the International Workshop within the Collaborative Research Centres SFB 1070 «Ressourcen Kulturen», Tübingen: Schloss Hohentübingen, RessourcenKulturen1, 2016.

GARVEY, Jillian: «Australian Aboriginal freshwater shell middens from late Quaternary northwest Victoria: Prey choice, economic variability and exploitation», *Quaternary International*, 427, (2017), 85-102.

GE, Yong y GAO, Xing: «Understanding the overestimated impact of the Toba volcanic super-eruption on global environments and ancient hominins», *Quaternary International*. 559, (2020), 24-33.

GENESTE, Jean-Michel: «From Chauvet to Lascaux: 15,000 Years of Cave Art», *Archaeology, Ethnology and Anthropology of Eurasia* 45, 3, (2017), 29-40.

GIBBONS, Anna: «Oldest *Homo sapiens* genome pinpoints neandertal input», *Science*, 343, (2014), 1417.

GIL, Ángel y MATAIX, Francisco J.: *Libro Blanco de los Omega-3*. Granada: Médica panamericana, 2005.

GROUCUTT, Huw S., PETRAGLIA, Michael D., BAILEY, Geoff, SCERRI, Eleanor M. L., PARTON, Ash, CLARK-BALZAN, Laine... y SCALLY, Aylwyn: «Rethinking the dispersal of *Homo sapiens* out of Africa», *Evolutionary Anthropology: Issues, News, and Reviews*, 24, 4, (2015), 149-164.

HAJDINJAK, Mateja, MAFESSONI, Fabrizio, SKOV, Laurits, VERNOT, Benjamin, HÜBNER, Alexander, FU, Qiaomei, ESSEL, Elena y PÄÄBO, Svante: «Initial Upper Palaeolithic humans in Europe had recent Neanderthal ancestry», *Nature*, 592, (2021), 253-257.

HAMM, Giles, MITCHELL, Peter, ARNOLD, Lee J., PRIDEAUX, Gavin J., QUESTIAUX, Daniele, SPOONER, Nigel A... y JOHNSTON, Duncan.: «Cultural innovation and megafauna interaction in the early settlement of arid Australia», *Nature*, 539, 7628, (2016), 280-283.

HARDY, Alister: «Was Man More Aquatic in the Past?», *The New Scientific*, 7, (1960), 642-645.

HARRISON, Terry y ROOK, Lorenzo: «Enigmatic anthropoid or misunderstood ape? The phylogenetic status of *Oreopithecus bambolii* reconsidered», D. R. Begun, C.V. Ward, y M. D. Rose (ed.): *Function, Phylogeny and Fossils: Miocene Hominoid Evolution and Adaptation*, New York: Plenum, 1997, 327-362.

HARVATI, Katerina, RÖDING, Carolin, BOSMAN, Abel M., KARAKOSTIS, Fotios A., GRÜN, Rainer, STRINGER, Chris... y KOULOUKOUSA, Mirsini: «Apidima Cave fossils provide earliest evidence of *Homo sapiens* in Eurasia», *Nature*, 571, 7766, (2019), 500-504.

HEINTZMAN, Peter D., FROESE, Duane, IVES, John W., SOARES, Andres E. R., ZAZULA, Grant D., LETTS, Brandon... y SHAPIRO, Beth.: «Bison phylogeography constrains dispersal and viability of the Ice-Free Corridor in western Canada», *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113, 29, (2016), 8057-8063.

HERSHKOVITZ, Israel, WEBER, Gerhard W., QUAM, Rolf, DUVAL, Mathieu, GRÜN, Rainer, KINSLEY, Leslie... y WEINSTEIN-EVRON, Mina.: «The earliest modern humans outside Africa», *Science*, 359, 6374, (2018), 456-459.

HOFFECCKER John: *Modern Humans: Their African Origin and Global Dispersal*, New York: Columbia Univ Press, 2017.

———, ELIAS, Scott A., O'ROURKE, Dennis H., SCOTT, Richard, G. y BIGELOW, Nancy H.: «Beringia and the global dispersal of modern humans», *Evolutionary Anthropology: Issues, News, and Reviews*, 25, 2, (2016), 64-78.

HOUGHTON, John: *Global Warming: the complete briefing* (5<sup>th</sup> edition), Cambridge: Cambridge University Press, 2015.

HUBLIN, Jean-Jacques, BEN-NCER, Abdelouahed, BAILEY, Shara E., FREIDLINE, Sarah E., NEUBAUER, Simon, SKINNER, Matthew M... y GUNZ, Philip: «New fossils from Jebel Irhoud, Morocco, and the pan-African origin of *Homo sapiens*», *Nature*, 546, 7657, (2017), 289-292.

HUBLIN, Jean-Jacques, SIRAKOV, Nikolay, ALDEIAS, Vera, BAILEY, Shara, BARD, Edouard, DELVIGNE, Vincent... y TSANOVA, Tsenka: «Initial upper palaeolithic *Homo sapiens* from Bacho Kiro cave, Bulgaria», *Nature*, 581, (2020), 299-302.

HUFFMAN, Frank, ZAIM, Yahdi, KAPPELMAN, John, RUEZ, Dennis R., DEVOS, John, RIZAL, Yan, AZIZ, Fachroel y HERTLER, Christine: «Relocation of the 1936 Mojokerto skull discovery site near Perning, Java», *J. Hum. Evol.*, 50, 4, (2006), 431-451.

JOORDENS, Josephine C., D'ERRICO, Francesco, WESSELINGH, Frank P., MUNRO, Stephen, DEVOS, John, WALLINGA, Jakob... y ROEBROEKS, Wil: «*Homo erectus* at Trinil on Java used shells for tool production and engraving», *Nature*, 518, (2015), 228-231.

JOORDENS, Josephine C., KUIPERS, Remko, WANINK, Jan y MUSKIET, Frits: «A fish is not a fish: patterns in fatty acid composition of aquatic food may have had implications for hominin evolution», *J. Human Evol.*, 77, (2014), 107-116.

JOORDENS, Josephine C., WESSELINGH, Frank P., DE VOS, John, VONHOF, Hubert B. y KROON, Dick: «Relevance of aquatic environments for hominins: a case study from Trinil (Java, Indonesia)», *Journal of Human Evolution*, 57, 6, (2009), 656–671.

JURIC, Ivan, AESCHBACHER, Simon y COOP, Graham: «The Strength of Selection against Neanderthal Introgression», *Plos Genetics*, 12, (2016), e1006340.

KAESSMANN, Henrik, WIEBE, Victor, WEISS, Gunter and PÄÄBO, Svante: «Great ape DNA sequences reveal a reduced diversity and an expansion in humans», *Nature Genetics*, 27, 2, (2001), 155–156.

KAINZ, Martin, ARTS, Michael T. y MAZUNDER, Asit: «Essential fatty acids in the planktonic foodweb and their ecological role for higher trophic levels». *Limnol. Oceanogr.* 49, 5, (2004), 1784–1793.

KAUFFMAN, Stuart A. «Approaches to the Origin of Life on Earth», Minati, G., Abram, M. R. y Pessa, E. (eds.): *Methods, Models, Simulations and Approaches Towards a General Theory of Change*, Singapore: Proceedings of the Fifth National Conference on Systems Science, World Scientific, 2012, 3–16.

KEMPF, Erica: «Patterns of Water Use in Primates», *Folia Primatologica*, 80, 4, (2009), 275–294.

KIRCH, Patrick V.: *On the road of the winds: An archaeological history of the Pacific Islands before European contact*, Berkeley: University of California Press, 2017.

KLEIN, Richard G.: «Population structure and the evolution of *Homo sapiens* in Africa», *Evolutionary Anthropology: Issues, News, and Reviews*, 28, 4, (2019), 179–188.

KRAUSE, Johannes y TRAPPE Thomas: *El viaje de nuestros genes*, Barcelona: Debate, 2020.

LAHR, Marta M. y FOLEY, Robert: «Multiple dispersals and modern human origins», *Evol. Anthropol.*, 3, (1994), 48–60.

LBOVA, Liudmila: «The Siberian Paleolithic site of Mal'ta: A unique source for the study of childhood archaeology», *Evolutionary Human Sciences*, 3, (2021), E9.

LESNEK, Alia J., BRINER, Jason P., LINDQVIST, Charlotte, BAICHTAL, James F. y HEATON, Timothy H.: «Deglaciation of the Pacific coastal corridor directly preceded the human colonization of the Americas», *Science Advances*, 4, 5, (2018), eaar5040.

MAYORAL, Eduardo, DÍAZ-MARTÍNEZ, Ignacio, DUVEAU, Jérémy, SANTOS, Ana, RAMÍREZ, Antonio R., MORALES, Juan A., MORALES, Luis A. y DÍAZ-

DELGADO, Ricardo: «Tracking late Pleistocene Neandertals on the Iberian coast», *Sci Rep.*, 11, 4103, (2021), 1-12.

MONTENEGRO, Álvaro, CALLAGHAN, Richard T. and FITZ-PATRICK, Scott M.: «Using seafaring simulations and shortest-hop trajectories to model the prehistoric colonization of Remote Oceania». *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113, 45, (2016), 12685-12690.

MORENO-MAYAR, Víctor J., POTTER, Ben A., VINNER, Lasse, STEINRÜCKEN, Mathias, RASMUSSEN, Simon, TERHORST, Jonathan... y WILLERSLEV, Eske: «Terminal Pleistocene Alaskan genome reveals first founding population of Native Americans», *Nature*, 553, 7687, (2018), 203-207.

MORGAN, Elaine: *The Aquatic Ape Hypothesis*, London: Souvenir Press, 1999.

MORWOOD, Mike y VAN OOSTERZEE, Penny: *Discovery of the Hobbit: The Scientific Breakthrough that Changed the Face of Human History*, Sydney: Random House, 2007.

MORWOOD, Mike, O'SULLIVAN, Paul B., AZIZ, Farhana y RAZA, Ali: «Fission-track ages of stone tools and fossils on the east Indonesian island of Flores», *Nature*, 392, (1998), 173-176.

NAVARRETE, Ana, VAN SCHAIK, Carel P. y ISLER, Karin: «Energetics and the evolution of human brain size», *Nature*, 480, 7375, (2011), 91-93.

NELSON, David L. and COX Michael M.: *Lehninger. Principios de Bioquímica* (5.ª ed), Barcelona: Omega. 2009.

O'CONNELL, James F., ALLEN, Jim, WILLIAMS, Martin A. J., WILLIAMS, Alan N., TURNEY, Chris. S. M., SPOONER, Nigel A... y COOPER, Alan: «When did *Homo sapiens* first reach Southeast Asia and Sahul?», *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115, 34, (2018), 8482-8490.

PIEL, Alex K., STRAMPELLI, Paolo, GREATHEAD, Emily, HERNÁNDEZ-AGUILAR, R. Adriana., MOORE, Jim y STEWART, Fiona A.: «The diet of open-habitat chimpanzees (*Pan troglodytes schweinfurthii*) in the Issa valley, western Tanzania», *Journal of Human Evolution*, 112, (2017), 57-69.

PILBEAM, David R. y LIEBERMAN, Daniel E.: «Reconstructing the last common ancestor of chimpanzees and humans», Muller, M. N., Wrangham, R. W. y Pilbeam, D. R. (ed.): *Chimpanzees and Human Evolution*, Cambridge: Harvard University Press, 2017, 22-141.

PITULKO, Vladimir V., TIKHONOV, Alexei N., PAVLOVA, Elena Y., NIKOLSKIY, Pavel A., KUPER, Konstantine E. y POLOZOV, Roman N.: «Early human presence in the Arctic: Evidence from 45,000-year-old mammoth remains», *Science*, 351, 6270, (2016), 260-263.

POCOCK, Guillian y RICHARDS, Christopher D.: *Fisiología Humana. La Base de la Medicina*. Barcelona: Elsevier Masson, 2005.

PONTZER, Herman, BROWN, Mary H., WOOD, Brian M., RAICHLEN, David A., MABULLA, Audax Z., HARRIS, Jacob A... y ROSS, Stephen R.: «Evolution of water conservation in humans», *Current Biology*, 31(8), (2021), 1804-1810.

PONTZER, Herman: «Ecological Energetics in Early Homo», *Current Anthropology*, 53, S6, (2012), S346-S358.

POPE, Kevin O. y TERRELL, Jhon E.: «Environmental setting of human migrations in the circum-Pacific region», *J Biogeography*, 35, (2007), 1-21.

RABETT, Ryan J.: «The success of failed *Homo sapiens* dispersals out of Africa and into Asia», *Nature Ecology & Evolution*, 2, 2, (2018), 212-219.

REED, Kaye E.: «Early hominid evolution and ecological change through the African Plio-Pleistocene», *J. Hum. Evol.*, 32, (1997), 289-322.

RIGHTMIRE, Philip G., LORDKIPANIDZE, David y VEKUA, Abesalon: «Anatomical descriptions, comparative studies, and evolutionary significance of the hominin skulls from Dmanisi, Republic of Georgia», *Journal of Human Evolution*, 50, 2, (2006), 115-141.

RÍOS, Luis, KIVELL, Tracy L., LALUEZA-FOX, Carles, ESTALRRICH, Almudena, GARCÍA-TABERNERO, Antonio, HUGUET, Rosa, QUINTINO, Yuliet, DE LA RASILLA, Marco y ROSAS, Anonio: «Skeletal Anomalies in The Neandertal Family of El Sidrón (Spain) Support A Role of Inbreeding in Neandertal Extinction», *Sci Rep* 9, 1, (2019), 1-11.

ROACH, Neil T., HATALA, Kevin G., OSTROFSKY, Kelly R., VILLMOARE, Brian, REEVES, Jonathan S., DU, Andrew... y RICHMOND, Brian G.: «Pleistocene footprints show intensive use of lake margin habitats by *Homo erectus* groups», *Sci Rep* 6, 1, (2016), 1-9.

ROBERTS, Alice: *The Incredible Human Journey*. London: Bloomsbury. 2010.

ROBERTS, Patrick, BOIVIN, Nicole, LEE-THORP, Julia, PETRAGLIA, Michael y STOCK, Jay: «Tropical forests and the genus Homo», *Evolutionary Anthropology: Issues, News, and Reviews*, 25, 6, (2016), 306-317.

ROBINSON, Joshua R., ROWAN, John, CAMPISANO, Christopher J., WYNN, Jonathan G. y REED, Kaye E.: «Late Pliocene environmental change during the transition from Australopithecus to Homo», *Nature Ecology & Evolution*, 1, 6, (2017), 1-7.

ROEBROEKS, Wil y VILLA, Paola: «On the earliest evidence for habitual use of fire in Europe», *Proc. Natl Acad. Sci.* 108, (2011), 5209-5214.

ROSAS, Antonio: *La evolución del género Homo*, Madrid: Catarata-CSIC. 2016.

——— *Los fósiles de nuestra evolución: Un viaje por los yacimientos paleontológicos que explican nuestro pasado como especie*, Barcelona: Ariel. 2019.

——— *Los primeros homínidos*, Madrid: Catarata-CSIC. 2015.

ROSE, Jeffrey I., HILBERT, Yamandú H., USIK, Vitaly I., MARKS, Anthony E., JABOOB, Mohammed M. A., ČERNÝ, Viktor, CRASSARD, Rémy y PREUSSER, Frank: «30,000-Year-Old Geometric Microliths Reveal Glacial Refugium in Dhofar, Southern Oman», *J Paleo Arch.*, 2, (2019), 338–357.

ROSE, Jeffrey I. y PETRAGLIA, Michael D: «Tracking the origin and evolution of human populations in Arabia», Petraglia, M. D. y Rose, J. I.: *Evolution of Human Populations in Arabia: Paleoenvironments, Prehistory and Genetics*, Dordrecht: Springer, 2009.

RUFF Christopher B.: «Relative limb strength and locomotion in *Homo habilis*», *Am. J. Phys. Anthropol.*, 138, (2009), 90–100

SKOGLUND, Pontus, POSTH, Cosimo, SIRAK, Kendra, SPRIGGS, Matthew, VALENTIN, Frederique, BEDFORD, Stuart... y REICH, David: «Genomic insights into the peopling of the Southwest Pacific», *Nature*, 538, (2016), 510–513.

SPASSOV, Nikolai: «Southeastern Europe as a route for the earliest dispersal of *Homo* towards Europe: Ecological conditions and the timing of the first human occupation of Europe», K. Harvati y M. Roksandic (eds.), *Paleoanthropology of the Balkans and Anatolia: Human evolution and its context*, Dordrecht: Springer, (2016), 281–290.

SPONHEIMER, Matt, ALEMSEGED, Zeresenay, CERLING, Thure E., GRINE, Frederick E., KIMBEL, William H., LEAKEY, Meave G... y WYNN, Jonathan G.: «Isotopic evidence of early hominin diets», *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110, 26, (2013), 10513–10518.

STACEY, Natasha y ALLISON, Edward H.: «Sea Nomads: Sama-Bajau Mobility, Livelihoods, and Marine Conservation in Southeast Asia», King, T. J. y Robinson G. (eds.): *At home on the waves: Human habitation of the sea from the Mesolithic to today*, 2019, 309–331.

STACEY, Natasha, STEENBERGEN, Dirk J., CLIFTON, Julian y ACCIAIOLI, Greg: «Understanding Social Wellbeing and Values of Small-Scale Fisheries amongst the Sama-Bajau of Archipelagic Southeast Asia», Johnson, D., Acott, T., Stacey, N., Urquhart, J. (eds.): *Social Wellbeing and the Values of Small-scale Fisheries*, MARE Publication Series, 17. Cham: Springer, 2018, 97–123.

STEELE, Teresa E.: «A Unique Hominin Menu Dated to 1.95 Million Years Ago», *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107, (2010), 10771–10772.

STEWART, Kathlyn M.: «The Case of Exploitation of Wetlands Environments and Foods by Pre-Sapiens Hominins», Cunnane S. C. y Stewart, K. M.

(eds.): *Human Brain Evolution. The Influence of Freshwater and Marine Food Resources*, Hoboken: Wiley-Blackwell, 2010, 137-171.

STRAIT, David S., ORR, Caley M., HODGKINS, Jamie, SPASSOV, Nikolai, GUROVA, Maria, MILLER, Christopher y TZANKOV, Tzankov: «The Human Fossil Record of Bulgaria and the Formulation of Biogeographic Hypotheses», *Vertebrate Paleobiology and Paleoanthropology*, (2016), 69-78.

TRINKAUS, Erik, SAMSEL, Mathilde, y VILLOTTE, Sébastien: «External auditory exostoses among western Eurasian late Middle and Late Pleistocene humans», *PLoS ONE*; 14, 8, (2019), 0220464.

UNGAR, Peter S., GRINE, Frederick E. y TEAFORD, Mark F.: «Diet in Early Homo: A Review of the Evidence and a New Model of Adaptive Versatility», *Annual Review of Anthropology*, 35, 1, (2006), 209-228.

VAN HETEREN, Anneke H. y de VOS, John: «Stone implements from Java and Flores: A history of the discoveries», *Comptes Rendus Palevol*, 11, 2-3, (2012), 181-189.

VILLA, Paola, SORIANO, Sylvain, POLLAROLO, Luca SMRIGLIO, Carlo, GAETA, Mario, D'ORAZIO, Massimo, CONFORTI, Jacopo y TOZZI, Carlo: «Neandertals on the beach: Use of marine resources at Grotta dei Moscerini (Latium, Italy)», *PLoS ONE*, 15, 1, (2020), e0226690.

VILLANEVA, Fernando A. y SCHRAIBER, Joshua G.: «Multiple episodes of interbreeding between Neanderthal and modern humans», *Nat. Ecol. Evol.*, 3, (2019), 39-44.

WILLIAMS, Scott A., PRANG, Thomas C., MEYER, Marc R., NALLEY, Thierra K., VAN DER MERWE, Renier, YELVERTON, Christopher... y BERGER, Lee R.: «New fossils of *Australopithecus sediba* reveal a nearly complete lower back», *eLife*, 10, (2021), 70447.

WOOD, Rachel, JACOBS, Zenobia, VANNIEUWENHUYSE, Dorcas, BALME, Jane, O'CONNOR, Sue y WHITAU, Rose: «Towards an Accurate and Precise Chronology for the Colonization of Australia: The Example of Riwi, Kimberley, Western Australia», *PLoS ONE*, 11, 9, (2016), e0160123.

WRAGG, Rebecca: (2020). *Kindred: Neanderthal life, love, death and art*. London: Bloomsbury, 2020.

ZACHOS, James, PAGANI, Mark, SLOAN, Lisa, THOMAS, Ellen y BILLUPS, Kathrina: «Trends, Rhythms, and Aberrations in Global Climate 65 Ma to Present», *Science*, 292, 5517, (2001), 686-693.

ZILHÃO, João: «Personal ornaments and symbolism among the Neanderthals», *Developments in Quaternary Sciences*, 16, (2012), 35-49.



## VI. LA PREHISTORIA Y EL AGUA

**Marco de la Rasilla Vives**

Departamento de Historia, Universidad de Oviedo

Examinaremos aquí la primera y más larga fase de la Prehistoria, el Paleolítico, porque es entonces cuando se generaron y asentaron los elementos y procesos vinculados con el agua que interaccionaron con nuestros antepasados. Cinco apartados de variado carácter permiten ejemplificar cómo el agua y sus circunstancias han sido cruciales para el conocimiento prehistórico, teniendo en nuestro caso la investigación arqueológica como punto focal, porque es la única vía para comprender, explicar y conocer a los primeros grupos humanos.

### **LOS SENDEROS PALEOLÍTICOS Y LA ORGANIZACIÓN DEL HÁBITAT**

Todos los yacimientos arqueológicos están cerca del agua en el formato que sea (río, arroyo, manantial, surgencia, fuente, charca, playa...). Además, los ríos son caminos naturales para el desplazamiento de los grupos humanos, a la vez que lugares donde normalmente se obtienen materias primas abióticas, bióticas y, naturalmente, agua.

Asimismo, y tomando como ejemplo la región cantábrica, durante el Paleolítico observamos cambios significativos en los modelos de ocupación del territorio, siendo el agua clave en la última etapa pues es la responsable principal

de la generación de cuevas. Así, en el Paleolítico Inferior los yacimientos están, en general, al aire libre; en el Paleolítico Medio siguen emplazándose en ese lugar, pero hubo un ligeramente mayor uso de las cavidades y abrigos; y en el Paleolítico Superior se impuso la estancia en cuevas y abrigos, sin menoscabo, pero con pocas evidencias contrastables, de las ocupaciones al aire libre. Además, la ubicación de dichos lugares cavernarios se sitúa en la mayoría de los casos por debajo de los 300 metros sobre el nivel del mar actual, empujados normalmente por la posición en cotas relativamente bajas de las nieves perpetuas (p. ej. 1500 m en el Último Máximo Glaciar) y las invernales (600-900 m) y por la distribución de las especies animales y vegetales habitualmente consumidas y utilizadas (combustible, enmangues...). Asimismo, salvo raras excepciones, la orientación de las entradas de las cavidades y abrigos en esta región se sitúa entre los 150° y 270° (SSE-w), es decir con mayor insolación y con menos vientos y lluvias.<sup>1</sup>



Figura 1. Vistas generales de las áreas próximas a los “sitios de agregación” asturianos (Peña de Candamo, Tito Bustillo, Llonin) y cántabros (Altamira, El Castillo y La Garma) con arte rupestre de cronología larga. Adviértase la red hidrográfica correspondiente en cada caso. © 2017 Digital Globe, Google, IGN.

<sup>1</sup> Rasilla, 1983, 1984.

En ese sentido, son destacables los estudios para interpretar la relación de los humanos con el medio y qué razones actuaron en la selección de los emplazamientos y en los llamados itinerarios de la acción social a través del espacio y el tiempo (altitud, distancia al mar y a cursos de agua, insolación, visibilidad, biotopos y nichos ecológicos...).<sup>2</sup> Asimismo, son muy importantes las aguas termales y minero-medicinales, porque tienen una singular incidencia en la decisión por asentarse en sus proximidades, ya sean los yacimientos paleolíticos en general, ya los que contienen arte rupestre en particular.<sup>3</sup>

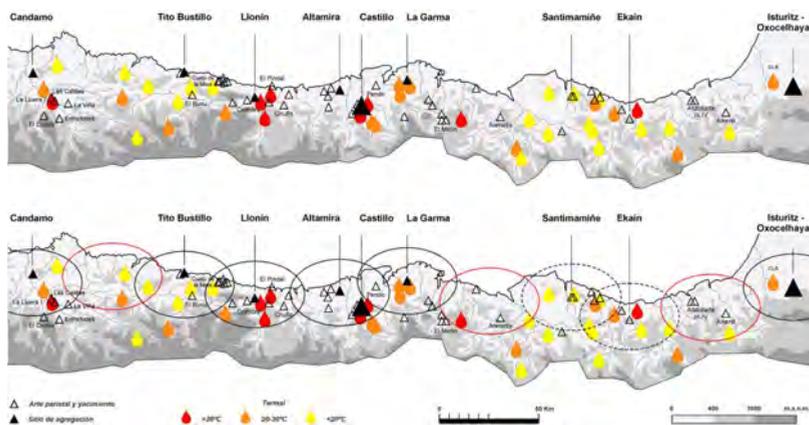


Figura.2. Región Cantábrica. Distribución general de los lugares con aguas termales, los yacimientos con arte parietal y los sitios de agregación y su ámbito de influencia hipotético. Las elipses tienen unas dimensiones de 50 x 35 km. *En rojo*: “sitios de agregación” hipotéticos, aún no identificados. *En discontinuo*: “sitios de agregación” teóricos durante el Magdaleniense en el País Vasco. Dibujo: E. Duarte.

La investigación lleva bastante tiempo tratando de demostrar las causas de la selección de un lugar para asentarse y cómo evaluar las diferentes formas de ocupación de un yacimiento. De forma general, para el Paleolítico se establecen varios tipos: asentamiento transitorio, asentamiento satélite estacional y

<sup>2</sup> P. ej. Conkey, 1980; Utrilla, 1994; González Morales, 1997; Fano 2001; Menéndez, 2003; Sieveking, 2003; Fritz *et alii*, 2007; Ordoño 2012; Schmidt *et alii*, 2012; Burke *et alii*, 2014; García-Moreno 2013; García-Moreno y Fano 2014; Fano *et alii*, 2016; Maier *et alii*, 2016; Sauvet, 2019.

<sup>3</sup> Rasilla y Duarte, 2018.

campamento base, alternándose con ciertas actividades específicas (alto de caza, cazadero, taller, etc.).

En algún yacimiento concreto, con una actividad única o, en general, con un solo nivel arqueológico, la posibilidad de afinar es mayor (p. ej. El Sidrón), pero en yacimientos con una larga secuencia crono-estratigráfica y cultural es mucho más complejo, y a veces imposible, poder perfilar el tipo de ocupación en cada caso, porque además no siempre se seleccionó la misma forma de establecerse en un lugar dado (p. ej. Abrigo de La Viña, Cueva de Llonín o El Castillo...). Aquí subyace una cuestión tafonómica puesto que la disposición original de los constituyentes naturales y antrópicos de los niveles se altera por el pisoteo, por el desplazamiento por el lugar de las personas y, eventualmente, animales, o por la presencia de las raíces de las plantas y por procesos del medio físico.

Desde los años sesenta del pasado siglo se introdujeron en la investigación algunas propuestas de la llamada Nueva Arqueología, gestada en el ámbito anglo-estadounidense principalmente por Binford,<sup>4</sup> y entre ellas fue clave el análisis de los territorios de explotación (*Site exploitation territory*) y de las zonas de influencia de los yacimientos (*Site catchment analysis*).<sup>5</sup> Desde hace algunas décadas, la incorporación de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) ha sido clave para profundizar en el tema que tratamos porque de forma más rápida pueden establecerse las rutas más rentables en tiempo o gasto energético en un territorio dado para acceder a cualquier elemento biótico o abiótico previamente reconocido (*Least Cost Path/Low Cost*); o la visibilidad desde un yacimiento al paisaje circundante y sus recursos.<sup>6</sup> En estos casos, los ríos y los acuíferos en sus diferentes formas son fundamentales para ayudar a establecer las unidades de prospección, los itinerarios y también facilitan el tiempo de recorrido y el área de los territorios de explotación a escala micro, semimicro y macro.

Está demostrado que los yacimientos con arte rupestre están sujetos a una organización meditada y que cierto tipo de aguas presentes en la geografía ibérica tienen unas propiedades relevantes (terapéuticas, temperatura...), por lo que es plausible pensar en que es un elemento de peso en la selección de dichos sitios y que «... la distribución e interacción del tejido socio-cultural con el territorio y en particular con algunas de sus singularidades (aguas termales/

---

<sup>4</sup> Binford, 1972, 1983; Clarke 1968, 1972, 1977.

<sup>5</sup> Vita-Finzi y Higgs, 1970; Davidson y Bailey, 1984.

<sup>6</sup> Conolly y Lake, 2009.

minero-medicinales) tuvo que irse integrando e incrementando progresivamente a medida que los grupos humanos anatómicamente modernos fueron conociendo y comprendiendo mejor el terreno a partir de su entrada en la península ibérica, instalándose en más cuevas y abrigos y, por ello, en las que tienen menor visibilidad desde el exterior».<sup>7</sup>

### SECUENCIAS DEPOSICIONALES Y TAFONOMÍA

En el hemisferio norte la procedencia y carácter de la información paleoclimática y ambiental se apoya en múltiples análisis: sondeos en los hielos de Groenlandia (GRIP, GISP2, NGRIP), en los océanos (ODP/IODP), en el mar de Alborán (MD), isotópicos, CO<sub>2</sub>, glaciares, turberas, espeleotemas, sedimentos kársticos; junto con los paleobiológicos (macro y micromamíferos, herpetofauna, ictiofauna, malacofauna...) y paleobotánicos (palinología, antracología, carpología...)<sup>8</sup>.

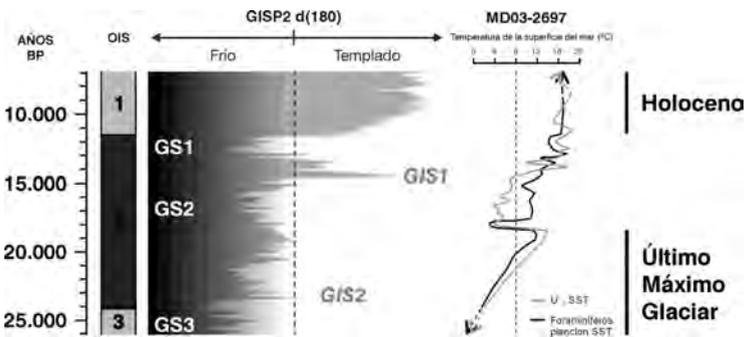


Figura 3. Desarrollo climático a partir de los datos de los hielos árticos y del Océano Atlántico. Esquema: E. Duarte.

En concreto, los cambios en las precipitaciones y en la humedad y los procesos del medio físico derivados (reactivación kárstica, erosiones, lavados, removilizaciones, subidas de nivel del río, etc.) han tenido consecuencias, por un lado, tafonómicas, en relación con la secuencia deposicional de los yacimientos arqueológicos, y, por otro, de la ocupación o no de una cavidad o

<sup>7</sup> Rasilla y Duarte, 2018: 31-32.

<sup>8</sup> Intergovernmental, 2014; Silva *et alii*, 2017; Moreno *et alii*, 2017.

lugar. Es sabido que a lo largo del Pleistoceno ha habido variaciones tanto en temperatura como en precipitaciones/humedad que han influido de diferentes formas en los grupos humanos, en la biota (entre otros, una mayor o menor masa boscosa) y en los registros arqueológicos.<sup>9</sup>

En la última fase glacial, durante las llamadas crisis climáticas de Laugerie ( $\pm 20\ 000$ – $18\ 800$  años uncal BP) y de Lascaux ( $\pm 18\ 000$ – $16\ 200$  años uncal BP), hay un significativo aumento de las precipitaciones/humedad, produciéndose erosiones y removilizaciones o impidiendo ocupar las cavidades cantábricas, limitando bastante la presencia, y por tanto el poblamiento y el registro, de los horizontes culturales correspondientes al Solutrense medio y al Magdaleniense inferior.<sup>10</sup>

Un ejemplo de lo anterior se observa en las series deposicionales más antiguas correspondientes al Musteriense (vinculado al neandertal) del Abrigo de La Viña (Asturias) en las que se documentan varias fases erosivas por la circulación de agua de escorrentía que, en ocasiones, interesaron a varios niveles de ese episodio. Una vez producida cada erosión se formaba un nuevo nivel sobre uno o dos dismantelamientos anteriores; incluso una fase erosiva previa a la deposición del primer nivel aurinaicense (correspondiente a los humanos anatómicamente modernos) hizo que este se apoyase sobre varios niveles musterienses distintos.<sup>11</sup>

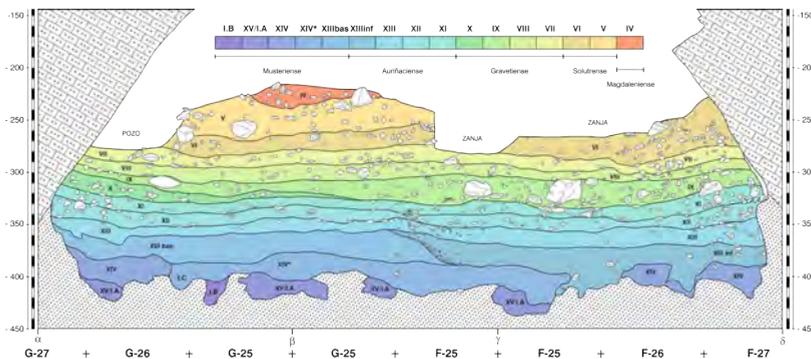


Figura 4. Abrigo de La Viña. Corte estratigráfico del Sector Occidental. Obsérvese que el primer nivel aurinaicense (XIII inferior) se apoya sobre tres niveles musterienses diferentes (XIII basal, XIV\*, XIV). Dibujo: D. Santamaría.

<sup>9</sup> Rasilla, 1993; Rasilla y Straus, 2004.

<sup>10</sup> Rasilla y Straus, 2004: 211–214.

<sup>11</sup> Santamaría, 2012.

La morfología, orografía y topografía de las cuevas de La Lluera I y II (Asturias) están en relación con las terrazas y flujos del río Nalón en la zona cercana de Las Caldas, implican que las ocupaciones paleolíticas (y las grafías rupestres ahí presentes) no pudieron producirse antes de la formación de la terraza +5 m, ni de la «erosión postdeposicional de los depósitos de dicha generados durante las últimas pulsaciones de la fase climática Würm III-IV localizadas en la base estratigráfica de La Lluera I». <sup>12</sup> Así pues, el inicio de la secuencia estratigráfica y las citadas grafías en ambas cavidades se corresponden con el Solutrense ( $\pm 21\ 000/20\ 500-18\ 400$  años uncal BP).

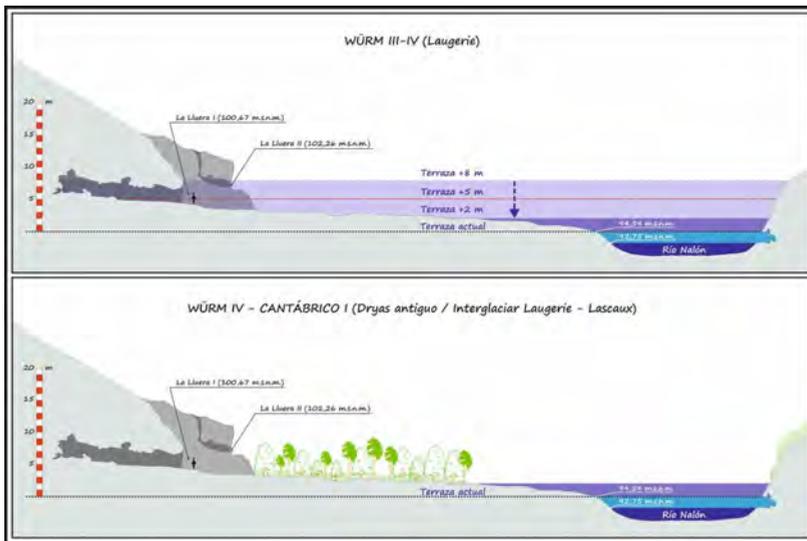


Figura 5. Cuevas de La Lluera I y II. Evolución de los niveles de terraza en la zona del río Nalón donde se encuentran dichas cuevas durante el Würm III-IV, según Hoyos (1995). Será a partir del desmantelamiento de la terraza + 5 m cuando se produjo el vaciado de La Lluera I y, ya durante el Cantábrico I, se dieron las condiciones de no intrusión fluvial que posibilitaron su habitabilidad (Rodríguez y Barrera, 2012). Esquema: J. M. Barrera.

Por su parte, en el Abrigo de Verdelpino (Cuenca) las repetidas inundaciones del río Valdecabras, que discurre muy próximo al yacimiento, provocaron potentes erosiones y removilizaciones en las dos fases arqueológicas presentes

<sup>12</sup> Rodríguez y Barrera, 2012: 520.

en el yacimiento (Magdaleniense y Neolítico) con importantes implicaciones tafonómicas e interpretativas.<sup>13</sup>

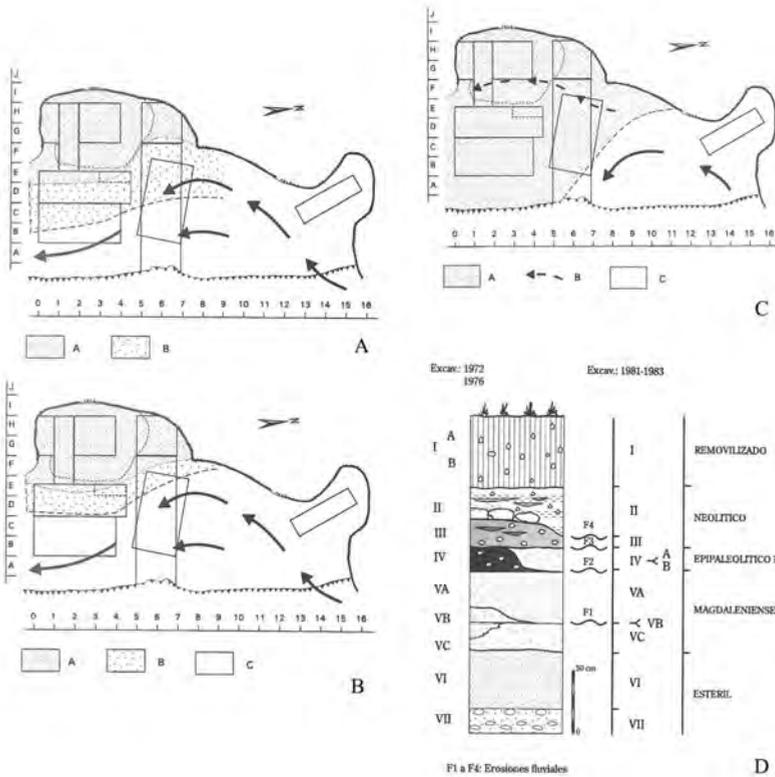


Figura 6: Abrigo de Verdelpino. Esquema de las diferentes etapas de la evolución sedimentaria. **A. Niveles Va-Vb-Vc:** A. Zona mejor conservada, B. Arenas fluviales con restos arqueológicos removilizados. **B. Nivel IV:** A. Zona conservada con mayor potencia. B. Zona parcialmente conservada. C. Zona totalmente erosionada. **C. Nivel III.** A. Zona conservada. B. Entradas ocasionales del río. Dirección de canales efímeros. C. Zona erosionada. **D.** Síntesis estratigráfica y cultural con las diferentes fases erosivas. Esquema: M. Hoyos.

Otro buen ejemplo de la influencia del clima y las tasas de precipitaciones en el registro arqueológico prehistórico queda muy bien reflejado en la Cueva del Sidrón (Asturias), que está situada en un poljé y es el sumidero de

<sup>13</sup> Rasilla *et alii*, 1996.

las aguas de varios regatos y contiene una singular colección de restos fósiles neandertales asociados a varios efectivos de industria lítica musteriense. Hace unos 49 000 años uncal BP, tras haber sido canibalizados, los restos humanos fueron dejados en una grieta o conducto. Más tarde, se produjo un evento de alta energía (tormenta/ *debris flow*) que hizo subir el nivel del agua en el sistema kárstico e introdujo a toda velocidad los distintos restos que quedan atrapados en los espeleotemas de una galería interior (Galería del Osario).<sup>14</sup>

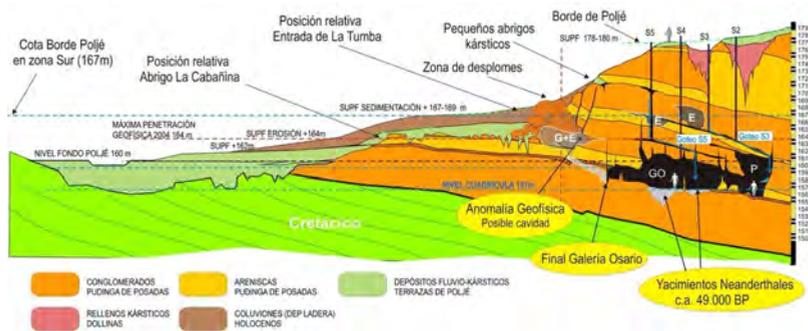


Figura 7. Cueva de El Sidrón. Corte geológico interpretativo sobre la Galería del Osario. Se muestran las características geológicas y niveles geomorfológicos más importantes en relación con las anomalías geofísicas detectadas, los sondeos mecánicos realizados y los perfiles de la Galería del Osario (GO) y de la Galería Principal de la Cueva de El Sidrón (P). Esquema: P. G. Silva.

Los procesos del medio físico relacionados con el agua que han afectado a los yacimientos arqueológicos pueden tener efectos perniciosos en la interpretación si no se les reconoce, de modo que pueda valorarse su impacto sobre el registro arqueológico. Así, es fundamental controlar las discordancias erosivas, máxime si son recurrentes en ciertas fases cronoclimáticas, porque pueden afectar a la definición del poblamiento de una zona dada. Otro tanto sucede con los procesos que han modificado la posición original de los objetos, aunque estos se encuentren en el yacimiento, porque al no estar *in situ*, sino *in loco*, el potencial análisis de la distribución espacial y las eventuales actividades deducibles será inexistente. En algún caso incluso, se producen mezclas inte-

<sup>14</sup> Rasilla *et alii*, 2020.

restratigráficas (verdaderas contaminaciones) de material arqueológico a causa del pisoteo, desplazamientos, alteraciones postdeposicionales varias, etc., que si coinciden con niveles culturalmente transicionales (p. ej. Transición Paleolítico Medio/Paleolítico Superior o Neandertales/humanos anatómicamente modernos), o con dos tecno-complejos diferentes (p. ej. Gravetiense/Solutrense) o entre un mismo tecno-complejo aunque vinculado con actividades internas diferentes, contribuyen a proponer conclusiones radicalmente falsas o, cuando menos, en absoluto ajustadas a la realidad; con el consiguiente perjuicio para el conocimiento.<sup>15</sup>

### GOTA A GOTA, GRAFÍAS RUPESTRES Y CRONOLOGÍA

Los espeleotemas (estalactitas, estalagmitas, costras calcáreas, coladas estalagmíticas, etc.) tienen relevancia arqueológica (prehistórica) porque registran las variaciones ambientales durante su formación (lluvia, temperatura, composición de la atmósfera, vegetación) y presentan un gran potencial como archivos de indicadores climáticos.<sup>16</sup> Además, su amplio desarrollo temporal y la posibilidad de ser datados con alta precisión los convierte en herramientas muy valiosas para reconstruir el ambiente y el clima de épocas pasadas<sup>17</sup> y son cada vez más usados para datar el arte rupestre. Por ejemplo, pueden ser utilizados para la datación mediante Uranio/Thorio (U/Th) de las costras estalagmíticas que recubren niveles arqueológicos y del carbonato cálcico que eventualmente recubre las grafías rupestres (pintadas o grabadas).

Tras datar mediante el desequilibrio de las series de uranio (U/Th) unas muestras en varias cuevas hispanas,<sup>18</sup> se obtuvieron unos resultados que, de forma sutil y sin aseverarlo fehacientemente, abrieron una impactante posibilidad con una potente repercusión mediática: que algunas grafías podían ser expresiones simbólicas de los neandertales. Posteriormente, se presentó un grabado en la Cueva de Gorham (Gibraltar) que estaba cubierto por estratigrafía de época musteriense, lo que implicaría una ejecución neandertal.<sup>19</sup> Finalmente, se entregaron las datas de unas representaciones pintadas en tres puntos geográficamente distantes entre sí, en las cuevas de La Pasiega (Cantabria), Maltravieso (Cáceres) y

<sup>15</sup> Santamaría, 2012; Duarte y Rasilla, 2020.

<sup>16</sup> Entre otros : Jiménez *et alii*, 2009; Fernández-Cortés *et alii*, 2010; Moreno *et alii*, 2013; Oster *et alii*, 2014; Bartolomé *et alii*, 2015.

<sup>17</sup> Sanchez-Moral *et al.*, 2021.

<sup>18</sup> Pike *et alii*, 2012.

<sup>19</sup> Rodríguez Vidal *et alii*, 2014,

Ardales (Málaga) en una cronología en torno a 65 000 años uncalBP y, por tanto, su autoría sería también neandertal en tres puntos geográficos distantes entre sí.<sup>20</sup>



Figura 8. Cueva de Llonin. Espeleotemas en los que se aprecian las gotas de agua antes de su caída. Foto: E. Duarte.

Cualquier sistema de datación es bienvenido para situar en el tiempo las evidencias arqueológicas y evaluar las similitudes o variaciones a lo largo del proceso evolutivo. En ocasiones, el U/Th contribuye a ello, si bien la información que ofrece es relativa (*ante quem* o *post quem*), en tanto que data algo que está a techo o a muro del espeleotema muestreado. Sin embargo, puede haber dificultades que mediatizan el uso un sistema dado. Este es el caso de El Sidrón,<sup>21</sup> donde los espeleotemas tienen una alta contaminación de <sup>230</sup>Thorio, por lo que

... *This extremely high Th contamination, the dripping water has a nominal age older than 30 ka, make sit unrealistic to try to use the isochron method [...] to remove*

<sup>20</sup> Hoffman *et alii*, 2018a.

<sup>21</sup> Torres *et alii*, 2010: 690, 693-695, 697-698.

*discrete  $^{232}\text{Th}$  contamination. In any case, the radionuclide concentrations along the same bed were also extremely variable, confirming the unreliability of these methods for these materials. The uranium-series disequilibrium method did not work adequately in El Sidrón cave sediment samples.*<sup>22</sup>

En el lado contrario tenemos un asunto con un denso debate, no concluido aún. Se refiere a la posible autoría neandertal de algunas representaciones rupestres, lo que aumenta de forma significativa su capacidad simbólica que ya se atisba en otros asuntos (p. ej. funeraria, antropofágica, uso de colorantes minerales, plumajes...). Como se resumía más arriba, entre el primer aviso (2012), la incorporación del grabado hallado en Gorham's Cave (2014) y los datos de Ardales, Maltravieso y La Pasiega (2018), hubo un importante intercambio de opiniones a favor o en contra.<sup>23</sup>

La hipótesis de que los grupos neandertales pudieran haber realizado representaciones es perfectamente válida, como lo es intentar aplicar un método de datación que puede contribuir a validarla o refutarla. El problema surge, entre otras razones, cuando la fe en el método no deja ver posibles inconsistencias que es necesario abordar. Este hecho ya se puso de manifiesto cuando se dataron pinturas rupestres mediante el  $^{14}\text{C}$  AMS, sujetas también a densos y tensos debates en algunos casos. La impresión era que se iban a acabar por subjetivos los procedimientos de análisis estilístico al uso hasta ese momento.<sup>24</sup> Pero la realidad se impuso y por diversas razones parece que han surgido más problemas que soluciones: diferentes pretratamientos y maquinaria entre laboratorios, la propia naturaleza de algunas muestras —con concreción de calcita, mezcla de carbón óseo y de madera, presencia de microorganismos, presencia de la materia orgánica que empapa la pared debido a la escorrentía y los productos químicos utilizados en el campo sobre el que se integra la cavidad y un largo etcétera—.<sup>25</sup>

En el caso que nos ocupa, la crítica se basa, en primer lugar, en que no hay información arqueológica que avale tal aseveración y, en segundo lugar, que la calcita puede perder uranio por disolución (lixiviación), lo que envejece la datación, es decir, pasa a ser un sistema abierto, en vez de cerrado, como exige el método para ser fiable. El argumento a favor de las fechas antiguas es que

<sup>22</sup> Torres *et alii*, 2010: 607–698.

<sup>23</sup> Entre otros, Hoffmann *et alii*, 2016; 2018b, 2018c; Pike *et alii*, 2017; Camarós *et alii*, 2017; Slimak *et alii*, 2018; White *et alii*, 2019, 2020.

<sup>24</sup> Lorblanchet y Bahn, 1993.

<sup>25</sup> Rasilla, e. p.

la frecuencia de edades se atiene a la seriación estratigráfica. No obstante, la potente estratigrafía documentada implica una circulación de agua importante que, a su vez, pudo disolver el uranio previamente depositado.<sup>26</sup> Asimismo, sorprende también que, en los tres yacimientos indicados, bien distantes entre sí, las fechas rondan de media los 65 ka (Pasiega: 64,8 ka. Ardales: 65,5 ka. Maltravieso: 66,7 ka.). Lo esperable en ese caso es que los grupos neandertales, si practicaban asiduamente esa tarea, pintasen a lo largo del tiempo y, por tanto, habría representaciones con diferentes datas.

Asimismo, y como que ya se vio con el uso del <sup>14</sup>C AMS para estos menesteres, es necesario un estudio geomorfológico, hidrológico, mineralógico y del comportamiento (crecimiento, disolución, paradas, arranques, etc.) de los espeleotemas a lo largo del tiempo, pues, entre otras razones, la circulación de agua no ha sido siempre la misma, ni tampoco la cantidad de CO<sub>2</sub> o CH<sub>4</sub> y la posibilidad de que los microorganismos potencialmente presentes metabolicen –¿y respiren o transformen?– el uranio perdiéndose este para siempre. Así pues, es ineludible comenzar a estudiar esos parámetros para valorar bien qué puede pasar, y en eso la arqueología es inexorable: si los neandertales hicieron esas representaciones tarde o temprano se demostrará, como también sucederá si no las hicieron.

### FLUJO ACUOSO, PATRIMONIO RUPESTRE Y CONSERVACIÓN

La investigación de la dinámica ambiental de un medio kárstico con arte rupestre es un parámetro clave en los estudios destinados a su conservación y protección. Además, la Ley de Patrimonio Histórico Español (Ley 16/1985. BOE-A-1985-12534) en su artículo 40 (2) dice: «Quedan declarados Bienes de Interés Cultural [BIC] por ministerio de esta Ley las cuevas, abrigos y lugares que contengan manifestaciones de arte rupestre». Así pues, los BIC están sometidos a la máxima protección legal y deben ser analizados para conocer su realidad a fin de establecer criterios para su conservación y protección. La experiencia muestra con perseverancia extrema que el factor humano es la mayor causa de desequilibrio y deterioro de esos bienes patrimoniales.

Es sabido que el agua disuelve y erosiona la caliza, genera espeleotemas, transporta sustancias y es un hábitat cómodo para ciertos tipos de microorganismos, de modo que, junto a un modelo analítico integrado de control de

---

<sup>26</sup> White *et alii*, 2019, 2020.

parámetros medioambientales (radón,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\delta^{13}\text{C}\text{O}_2$  y  $\delta^{13}\text{C}\text{H}_4$ , presión atmosférica, humedad, temperatura, agua de infiltración –cantidad e hidroquímica– microorganismos, geología y geomorfología del sistema kárstico y del entorno, y la caracterización de las membranas de interconexión –suelo, roca–), su estudio permite evaluar el estado de las cavidades con arte rupestre y establecer su grado de deterioro y los agentes causantes.

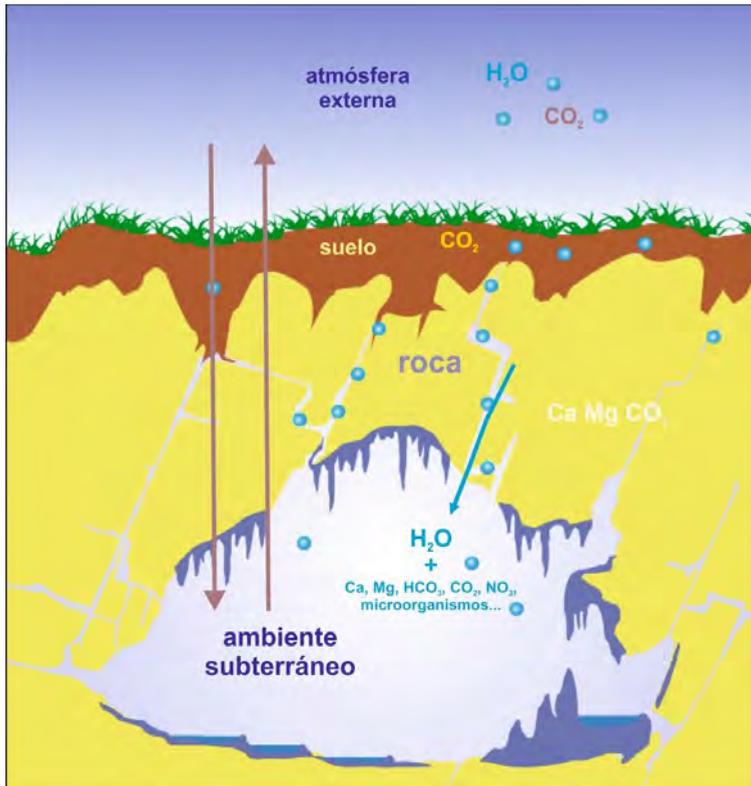


Figura 9. Croquis de una cavidad reflejando los intercambios de materia y energía entre el ambiente exterior y el kárstico somero y el modelo analítico integrado (Gas: microclima; Biología: geomicrobiología; Líquido: aguas kársticas; Sólido: roca y suelo). Esquema: S. Sánchez-Moral.

Los lugares con arte rupestre son sistemas muy dinámicos que interactúan, aunque diferencialmente, con las condiciones externas según estén directamente al aire libre o casi (abrigos) o en el subsuelo (cuevas), lo que les con-

vierte en bienes del patrimonio cultural extremadamente delicados.<sup>27</sup> Desde hace bastantes años, de forma especial en Francia y España por la cantidad de enclaves existentes y por las alarmas generadas en las cavidades de Lascaux y en Altamira, se ha puesto especial atención en estos asuntos, tanto a escala nacional<sup>28</sup> como internacional.<sup>29</sup>

Está sobradamente demostrado que los factores antrópicos son los más desestabilizadores de las condiciones ambientales de estos sitios; toda vez que los naturales son menos agresivos en general y, a la par, imposibles de prevenir o erradicar. Desde hace años se ha implementado un sistema, llamado áreas de protección, con unos criterios de actuación restrictivos de mayor a menor, que afecta a la zona del impluvio y al área más o menos próxima de estos yacimientos, según sean la morfología y topografía del entorno.<sup>30</sup> Ello se explica, entre otras cosas, porque en la interacción bidireccional arriba aludida (fig. 9) hay acciones en las que interviene de una u otra manera el agua con consecuencias nefastas:

- Encima de las cavidades es muy frecuente que haya un bosque (o plantación), de modo que el agua de lluvia se tamiza y tiene un ritmo de caída y una cadencia de infiltración «suave»; pero, si se tala, el agua cae directamente sobre el suelo modificando la fuerza y cantidad de entrada al sistema.

- También es muy frecuente que encima de las cavidades haya prados o zonas de cultivo, en los que se esparcen abono o se tienen animales pastando, los cuales evacuan sus desechos. Los componentes orgánicos y químicos de ambos elementos entran en la cavidad al llover y la escorrentía los extiende por las paredes en donde hay grañas rupestres, facilitando la colonización microbiana y la disolución de la roca soporte (en general caliza).

- Durante muchos años, y en algunos abrigos al aire libre, principalmente en la zona mediterránea, se utilizaban trapos y escobillas humedecidas para que el agua resaltase la pintura y las visitas la viesan mejor, con la consiguiente pérdida progresiva del color y de la propia pintura.

Estas situaciones, sumadas a otras muchas, entre las que destaca la presión por utilizar el patrimonio cultural, junto al natural, como elemento

---

<sup>27</sup> Cañaveras *et alii*, 2013; Sánchez, 2014.

<sup>28</sup> Fortea, 1993; Sánchez-Moral, 2014.

<sup>29</sup> Sanz y Keenan, 2011.

<sup>30</sup> Fortea, 1993.

dinamizador socio-económico de un territorio, sostenido principalmente a través del turismo, hacen que este patrimonio esté sometido a una presión a veces muy grave. Hay que buscar un equilibrio, siempre a favor del bien, entre esa dinamización y el derecho de la ciudadanía a conocer su patrimonio, y la obligación ética, moral y legal de conservarlo en las mejores condiciones posibles.

### LA PALABRA Y EL AGUA

El vocablo *agua* proviene del latín, a partir de la raíz indoeuropea *\*ak<sup>w</sup>ā*, con múltiples palabras derivadas (acuario, acueducto, aguada, aguardiente...); pero otra raíz indoeuropea *\*wed-* formó el vocablo griego *ὕδωρ* (léase *hydōr*) con otros derivados (hídrico, hidráulico...), y el árabe, aparte de los vocablos de ríos o ciudades que comienzan por *Guad-* (Guadalquivir, Guadalajara...), que vienen de *وادي* (*wadi, uadi, ued*), también ofrece varios derivados (acequia, alberca, aljibe...). Así pues, tanto en el registro arqueológico como epigráfico y paleográfico, abundan las palabras relacionadas con el agua.

En la investigación arqueológica pueden darse dos posibilidades. Por un lado, en las tareas de prospección el análisis de la toponimia es importante para reconocer posibles zonas de riesgo arqueológico a causa del significado de un vocablo y, naturalmente, las relativas al agua y sus variadas circunstancias. Por otro lado, se intenta conocer el significado de un topónimo en el que se encuentra un yacimiento arqueológico, como ha ocurrido tras muchos años sin saberlo con el conocido término de *El Sidrón* y, tras una consulta al especialista (Xulio Viejo de la Universidad de Oviedo), se ha podido saber que este «remite al latín *situlum* “vasija (cóncava y poco profunda) para coger agua”, “caldero”, entendible como alusión metafórica a sitios donde se acumula o se recoge el agua. En el caso concreto de este topónimo cabría partir de un aumentativo formado a partir del sufijo *-one> -on*. [...] En este sentido, podría asumirse para nuestro topónimo una forma conjetural tardorromana *\*situlone*, que no ofrece mayores objeciones de fonética evolutiva».<sup>31</sup>

En relación con *El Sidrón*, el topónimo expresa con precisión la realidad del sistema kárstico en el que está formada la cavidad, pues, como se afirma más arriba, es un vehículo y un contenedor de agua; que, además, sigue siendo un sistema activo, al correr esta en la actualidad desde octubre a junio. Lo más

<sup>31</sup> Rasilla *et alii*, 2020:218-219.

interesante es que el nombre se ha perpetuado a lo largo de los siglos expresando a la perfección su mismidad, sin que se conociese por el común su verdadero significado, que se vinculaba al aumentativo de un nombre de persona o a seres de la mitología asturiana conservados en las fiestas populares vigentes.

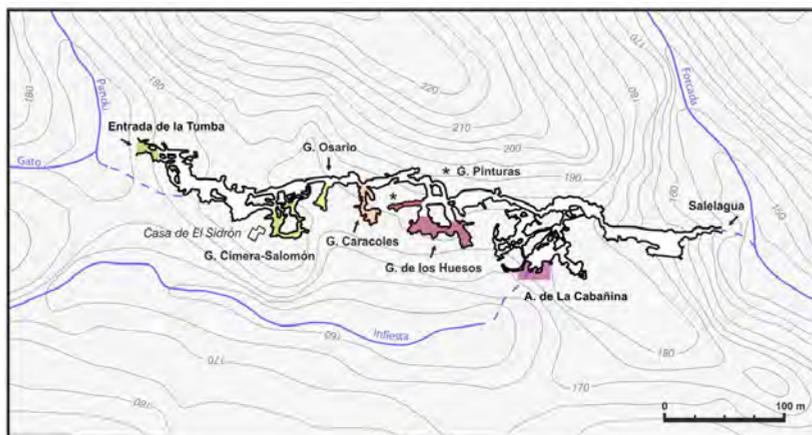


Figura 10. Cueva de El Sidrón. Planta de la cueva y zonas donde se han efectuado intervenciones arqueológicas. Obsérvese como el agua de las riegas de Gatu y de Pandu entra al comienzo de la caverna y circula por toda la galería que discurre al norte de la misma. La riega de La Infiesta entra hacia el final del sistema (Abrigo de La Cabañina), vertiéndose todas las aguas en la riega de La Forcada que a su vez desemboca en el río Borines. Dibujo: E. Duarte.

## CONCLUSIONES

Aunque el poeta J. M. Hinojosa (1904-1936) dice con tino que «Una gota de agua, / qué poco es / y qué pronto se acaba»,<sup>32</sup> lo cierto es que las gotas de agua sumadas generan una ingente cantidad de cosas y sucesos de muy variado tipo. Todo lo que se ha mostrado en este texto tiene como punto único el agua, y en casi todos los casos se relaciona de una u otra manera con la tafonomía y la entropía, expresadas sobre diferentes realidades vinculadas con la arqueología prehistórica.

La más importante es que esos inevitables fenómenos mencionados, que se manifiestan de múltiples maneras, se registren con detalle y se reconozcan

<sup>32</sup> <https://www.poemas-del-alma.com/jose-maria-hinojosa-elegia-del-rocio.htm> [consultado 01-03-2022].

los procesos de transformación y de desorden existentes en lo que se analiza. Así, podremos tomar el debido pulso al registro arqueológico, sin añadir ni quitar nada de su mismidad, sea esta la que sea y tenga el valor que tenga. En una investigación cualquiera vale tanto lo positivo (lo que se encuentra y de lo que puede deducirse algo y, si es algo novedoso e impactante, encumbrarse en las alturas del conocimiento) como lo negativo (lo que no está, pero estuvo y podemos explicar las causas).

Y, para terminar, recojamos el guante apoyando la invitación del también poeta latino Horacio: «*Nunc est bibendum*».

### AGRADECIMIENTOS

Agradezco la colaboración prestada a Sergio Sánchez Moral (MNCN-CSIC), Elsa Duarte Matías, José Manuel Barrera Logares (Universidad de Oviedo) y Soledad Cuezva Robleño (Universidad de Alcalá).

### REFERENCIAS

BARTOLOMÉ, M., MORENO, A., SANCHO, C., STOLL, H. M., CACHO, I., SPÖTL, Ch., BELMONTE, A., EDWARDS, R. L., CHENG, H., HELLSTROM, J. C.: «Hydrological change in Southern Europe responding to increasing North Atlantic overturning during Greenland Stadial 1». *PNAS*, 112 (21) (2015), 6568-6572.

BINFORD, L. R.: *An Archaeological Perspective*, Nueva York: Seminar Press, 1972.

——— *In pursuit of the past. Decoding the archaeological record*, Londres: Thames and Hudson, 1973.

BURKE, A., LAVAVASSEUR, G., JAMES, P. M. A; GUIDUCCI, D., IZQUIERDO, M. A., BOURGEON, L., KAGEYAMA, M., RAMSTEIN, G., VRAC, M.: «Exploring the impact of climate variability during the Last Glacial Maximum on the pattern of human occupation of Iberia», *Journal of Human Evolution*, 73, (2014), 35-46.

CAMARÓS, E., CUETO, M., TEIRA, L., MÜNDEL, S. C., PLASSARD, P., ARIAS, P., RIVALS, F.: «Bears in the scene: Pleistocene complex interactions with implications concerning the study of Neanderthal behaviour», *Quaternary International*, (2017), 435, 237-246.

CAÑAVÉRAS, J. C.; SÁNCHEZ-MORAL, S., CUEZVA, S., FERNÁNDEZ CORTÉS, A., MUÑOZ, C., SILVA, P. G., SANTOS, G., DUARTE, E., SANTAMARÍA, D., RASILLA, M.

de la: «Estudio geoarqueológico de la Cueva de El Sidrón (Asturias)», *Boletín del Instituto Geológico y Minero*, 129 (1), (2018), 107-128.

CAÑAVERAS, J. C., CUEZVA, S., FERNÁNDEZ CORTÉS, A., BENAVENTE, D. SÁNCHEZ MORAL, S. «Conservación del arte rupestre: aspectos geológicos y microambientales», M. de la Rasilla Vives (coord.): *F. Javier Fortea Pérez. Universitatis Ovetensis Magister. Estudios en Homenaje*, Oviedo: Ediciones de la Universidad de Oviedo y Ménsula Ediciones, 2013, 451-470.

CLARKE, David L.: *Analytical Archaeology*, Londres: Methuen, 1968.

——— *Models in Archaeology*. Londres: Methuen, 1972.

——— *Spatial Archaeology*. Boston: Academic Press, 1977.

CONKEY, M. W.: «The identification of prehistoric hunter-gatherer aggregation sites: the case of Altamira», *Current Anthropology*, 21 (5), (1980), 609-630.

CONOLLY, J., y LAKE, M.: *Sistemas de información geográfica aplicados a la arqueología*. Barcelona: Bellaterra Arqueología, Barcelona, 2009.

DAVIDSON, I., BAILEY, G. N.: «Los yacimientos, sus territorios de explotación y la topografía», *Boletín del Museo Arqueológico Nacional*, II (1), (1984), 25-46.

DUARTE, E., RASILLA, M. de la.: «Bone industry collections from the Middle and Upper Magdalenian of La Viña rock shelter and Llonin cave (Asturias, Northern Spain): domestic, hunting and symbolic spheres», L. G. Straus, L. G., M. Langlais (dirs.): *Magdalenian chrono-stratigraphic correlations and cultural connections between Cantabrian Spain and Southwest France... and beyond*. Actes de la séance de la Société Préhistorique Française. Session XVII-2 du XVIII Congrès UISPP (Paris, juin 2018): Paris: Société Préhistorique Française, 2020, 337-376.

FANO, M. Á., GARCÍA-MORENO, A., CHAUVIN, A., CLEMENTE-CONTE, I., COSTAMAGNO, S., ELORRIETABAIGORRI, I., PASCUAL, N., TARRIÑO, A.: «Contribution of landscape analysis to the characterisation of Palaeolithic sites: A case study from El Horno Cave (northern Spain)», *Quaternary International*, 412, (2016), 82-98.

FERNANDEZ-CORTÉS, Á., SÁNCHEZ-MORAL, S., CAÑAVERAS, J. C., CUEVAS-GONZÁLEZ, J., CUEZVA, S., ANDREU, J. M.: «Variations in seepage water geochemistry induced by natural and anthropogenic microclimatic changes: Implications for speleothem growth conditions», *Geodinamica Acta*, 23 (1-3), (2010), 1-13.

FORTEA, J. (coord.): 1993. *La protección y conservación del arte rupestre paleolítico. Mesa Redonda Hispano-Francesa (Colombres, Asturias, junio 1991)*, Oviedo: Servicio de Publicaciones del Principado de Asturias, 1993.

GARCÍA-MORENO, A.: «To see or to be seen is that the question? An evaluation of Palaeolithic sites visual presence and their role in social organization», *Journal of Anthropological Archaeology*, 32 (4), 2013, 647-658.

GARCÍA-MORENO, A., FANO, M. Á.: «Palaeolithic sites beyond the archaeological deposits», García-Moreno, A. et alii (eds.): *Debating Spatial Archaeology. Proceedings of the International Workshop on Landscape and Spatial Analysis in Archaeology (Santander, June, 2012)*, Santander: IIIPC Universidad de Cantabria, 2014, 231-241.

GONZÁLEZ MORALES, M. R.: «Changes in the use of caves in Cantabrian Spain during the Stone Age», C. Bonsall, Ch. Tolan-Smith (eds.): *The Human use of Caves*, Oxford: Archaeopress, 1997, 63-69.

HOFFMANN, D. L., PIKE, A. W. G., GARCÍA-DIEZ, M., PETTITT, P. B.: «Methods for U series dating of CaCO<sub>3</sub> crusts associated with Palaeolithic cave art and application to Iberian sites», *Quaternary Geochronology*, 36 (2016), 104-116.

HOFFMANN, D. L., STANDISH, C. D., GARCÍA-DIEZ, M., PETTITT, P. B., MILTON, J. A., ZILHÃO, J., ALCOLEA-GONZÁLEZ, J. J., CANTALEJO-DUARTE, P., COLLADO, H., DE BALBÍN, R., LORBLANCHET, M., RAMOS-MUÑOZ, J., WENIGER, G. C., PIKE, A. W. G., «U-Th dating of carbonate crusts reveal Neanderthal origin of Iberian cave art», *Science*, 359, (2018a), 912-915.

HOFFMANN, D. L., STANDISH, C. D., GARCÍA-DIEZ, M., PETTITT, P. B., MILTON, J. A., ZILHÃO, J., ALCOLEA-GONZÁLEZ, J. J., CANTALEJO-DUARTE, P., COLLADO, H., DE BALBÍN, R., LORBLANCHET, M.: «Response to Comment on U-Th dating of carbonate crusts reveal Neandertal origin of Iberian cave art». *Science*, 362, (2018b), eaau1736.

HOFFMANN, D. L., STANDISH, C. D., PIKE, A. W., GARCÍA-DIEZ, M., PETTITT, P. B., ANGELUCCI, D. E., VILLAVERDE, V., ZAPATA, J., MILTON, J. A., ALCOLEA-GONZÁLEZ, J. J., CANTALEJO-DUARTE, P., COLLADO, H., DE BALBÍN, R., LORBLANCHET, M., RAMOS-MUÑOZ, J., WENIGER, G. C., ZILHÃO, J.: «Dates for Neanderthal art and symbolic behaviour are reliable», *Nature Ecology & Evolution*, 2, (2018c), 1044-1045.

HOYOS, M.: «Paleoclimatología del Tardiglaciario en la Cornisa Cantábrica basada en los resultados sedimentológicos de los yacimientos arqueológicos kársticos», J. A. Moure, C. González Sainz, C. (coords.): *El final del paleolítico cantábrico: transformaciones ambientales y culturales durante el Tardiglaciario y comienzos del Holoceno en la Región Cantábrica*, Santander: Servicio de Publicaciones de la Universidad de Cantabria, 1995, 77-117.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE: Information from Paleoclimate Archives. In *Climate Change 2013 – The Physical Science Basis: Working Group I. Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge: Cambridge University Press, 2014, 383-464. DOI:10.1017/CBO9781107415324.013.

JIMÉNEZ-SÁNCHEZ, M., STOLL, H., MORENO, A., MÉNDEZ-VICENTE, A., DOMÍNGUEZ-CUESTA, M. J., ARANBURU, A., URIARTE, J., VALERO-GARCÉS, B. L. 2009. «Espeleotemas en la Cueva de El Pindal (Asturias, N España): contribución a la evolución geomorfológica de la Costa Cantábrica», G. Flor Rodríguez, J. Gallastegui, G. Flor Blanco, M. Martín Llana (eds.): *Actas del 6.º Simposio sobre el Margen Ibérico Atlántico. Nuevas contribuciones al margen ibérico atlántico (Oviedo 2009)*, Oviedo, 2009, 189-192.

LORBLANCHET, M., BAHN, P. (eds.): *Rock art studies: the post-stylistic era or where do we go from here? 2.º AURA Congress*, Oxford: Oxbow Monograph, 35, 1993.

MAIER, A., LEHMKUHL, F., LUDWIG, P., MELLES, M., SCHMIDT, I., SHAO, Y., ZEEDEN, Ch., ZIMMERMANN, A.: «Demographic estimates of hunter-gatherers during the Last Glacial Maximum in Europe against the background of paleoenvironmental data», *Quaternary International*, 425, (2016), 49-61.

MENÉNDEZ, M.: «Arte prehistórico y territorialidad en la cuenca media del Sella», R. de Balbín, P. Bueno (eds.): *El arte prehistórico desde los inicios del siglo XXI. Primer Symposium Internacional de Arte Prehistórico de Ribadesella (septiembre de 2002)*, Ribadesella: Asociación Cultural Amigos de Ribadesella, 2003, 185-199.

MORENO, A., BELMONTE, A., BARTOLOMÉ, M., SANCHO, C., OLIVA, B., STOLL, H. EDWARDS, L. R., CHENG, H., HELLSTROM, J.: «Formación de espeleotemas en el noroeste peninsular y su relación con las condiciones climáticas durante los últimos ciclos glaciares», *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 39 (1), (2013), 25-47.

MORENO, A., COLMENERO HIDALGO, E., MORELLÓN, M., VALERO GARCÉS, B., MATA, P.: «Descifrando el clima de los últimos 2,58 millones de años. ¿Cómo, dónde y por qué? Registros continentales y marinos», *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 25 (1), (2017), 14-27.

ORDOÑO, J.: «The use of caves and rock shelters by the last Neandertal and first Modern Human societies in Cantabrian Iberia: similarities, differences, and territorial implications», K. Bergsvik, K., R. Skeates (eds.): *Caves in Context: The Cultural Significance of Caves and Rock shelters in Europe*, Oxford: Oxbow Books, 2012, 82-100.

OSTER, J. L., MONTAÑEZ, I. P., MERTZ-KRAUS, R., SHARP, W. D., STOCK, G. M., SPERO, H. J., TINSLEY, J., ZACHOS, J. C.: «Millennial-scale variations in western Sierra Nevada precipitation during the last glacial cycle MIS 4/3 transition», *Quaternary Research*, 82, (2014), 236–248.

PIKE, A. W. G., HOFFMANN, D. L., GARCÍA-DIEZ, M., PETTITT, P. B., ALCOLEA, J., BALBÍN, R. de, GONZÁLEZ SAINZ, C., HERAS, C. de las, LASHERAS, J. A., MONTES, R., ZILHAO, J.: «U-series dating of Palaeolithic art in 11 caves in Spain», *Science*, 336, (2012), 1409–1413.

PIKE, A. W. G., HOFFMANN, D. L., PETTITT, P. B., GARCÍA-DIEZ, M., ZILHÃO, J.: «Dating Palaeolithic cave art: Why U-Th is the way to go», *Quaternary International*, 432, (2017), 41–49.

RASILLA VIVES, M. de la.: «Distribución y dispersión de yacimientos paleolíticos en Asturias y Santander», *Homenaje al Prof. Martín Almagro Basch*, (1983), 171–178.

——— «Asentamientos del Paleolítico Superior en Asturias y Santander: distribución, incidencia del medio físico y relaciones», *Arqueología Espacial*, 2, (1984), 165–179.

——— «Las dataciones radiocarbónicas de pinturas rupestres de la Región Cantábrica: resultados, problemas y futuro», *Actas del Congreso Internacional Datando el Arte Rupestre: el Arco Mediterráneo Peninsular entre lo absoluto y lo relativo. Barcelona (junio 2009)*, en prensa.

——— y LLANA RODRÍGUEZ, C.: «Procesos post-deposicionales documentados en el norte y noroeste de España durante el Pleistoceno Superior e inicios del Holoceno. Sus implicaciones arqueológicas», *Arqueología Espacial*, 16–17, (1993), 157–167.

RASILLA VIVES, M. de la y STRAUS, L. G.: «El Poblamiento de la Región Cantábrica durante el Último Máximo Glacial: Gravetiense y Solutrense», M. A. Fano (coord.): *Las sociedades del Paleolítico en la Región Cantábrica. De los orígenes del poblamiento en el Pleistoceno Medio al inicio del Neolítico en el V milenio*. Bilbao: Diputación Foral de Bizkaia, *Kobie* (serie anejos), 8, 2004, 209–242.

RASILLA, M. de la y DUARTE MATÍAS, E.: «¿Casualidad o Estrategia? Las aguas termales y minero-medicinales en la configuración de los yacimientos con arte rupestre paleolítico de Asturias y su correlato cantábrico», *Nailos*, 5, (2018), 17–41.

RASILLA VIVES, M. de la; HOYOS GÓMEZ, M. y CAÑAVÉRAS JIMÉNEZ, J. C.: 1996. «El Abrigo de Verdelpino (Cuenca). Revisión de su evolución

sedimentaria y arqueológica», *Homenaje al Prof. Manuel Fernández-Miranda*, M. A. Querol, T. Chapa (eds.): *Complutum Extra*, 6-I, 1996, 75-82.

RASILLA, M. de la, ROSAS, A., CAÑAVERAS, J. C., LALUEZA-FOX, C., DUARTE, E., SÁNCHEZ MORAL, S., ESTALRRICH, A., GARCÍA-TABERNERO, A., SANTOS, G., HUGUET, R., BASTIR, M., FERNÁNDEZ CASCÓN, B., RÍOS, L., CUEZVA, S., FERNÁNDEZ CORTÉS, A., LÓPEZ TASCÓN, C., MUÑOZ, C., SILVA, P. G., VIEJO, X.: «El grupo neandertal de la Cueva de El Sidrón (Piloña. Asturias. España)», A. Carretero, C. Papí (coords.): *Actualidad de la Investigación Arqueológica en España I (2018-2019). Conferencias impartidas en el Museo Arqueológico Nacional*, Madrid: Ministerio de Cultura y Deporte, 2020, 215-238.

RODRÍGUEZ ASENSIO, J. A., BARRERA, J. M.: «La Lluera II (San Juan de Priorio, Oviedo, Asturias, España): estudio integral de un santuario complementario solutrense», *Espacio, Tiempo y Forma, nueva época, Prehistoria y Arqueología*, 5, (2012), 517-525.

RODRÍGUEZ-VIDAL, J., D'ERRICO, F., GILES PACHECO, F., BLASCO, R., ROSELL, J., JENNINGS, R. P., QUEFFELECB, A., FINLAYSON, G., FAE, D. A., GUTIÉRREZ LÓPEZ, J. M., CARRIÓN, J. S., NEGRO, J. J., FINLAYSON, S., CÁCERES, L. M., BERNAL, M. A., FERNÁNDEZ JIMÉNEZ, S., FINLAYSON, C.: «A rock engraving made by Neanderthals in Gibraltar», *PNAS*, 111 (37), (2014), 13301-13306.

SÁNCHEZ-MORAL, S. (dir.): *Estudio integral del estado de conservación de la cueva de Altamira y su arte paleolítico (2007 - 2009). Perspectivas futuras de conservación*. Monografías, n.º 24, Museo Nacional y Centro de Investigación de Altamira, Ministerio de Educación, Cultura y Deporte, 2014.

SÁNCHEZ-MORAL, S., MARTÍN, T., CUEZVA, S., SEIJAS, N., FERNÁNDEZ-CORTÉS, Á.: «Ecosistemas subterráneos. Laboratorios Naturales», C. Cánovas Fernández (coord.). *Museo Nacional de Ciencias Naturales. Nuestra investigación al alcance de la mano*. CSIC, (2021), 293-297.

SANTAMARÍA, D.: *La transición del Paleolítico Medio al Superior en Asturias. El Abrigo de La Vina (La Manzaneda, Oviedo) y la Cueva de El Sidrón (Borines, Piloña)*, Oviedo: Servicio de Publicaciones de la Universidad de Oviedo, Oviedo, 2012. <http://hdl.handle.net/10651/19328>.

SANZ, N., KEENAN, P. (eds.): «Human Evolution: Adaptations, Dispersals and Social Developments (HEADS). World Heritage Thematic Programme», *World Heritage Papers*, 29, Paris: UNESCO, 2011.

SAUVET, G. 2019. «The lifeworld of hunter-gatherers and the concepts of territory», *Quaternary International*, 503, (201), 191-199.

SCHMIDT, I., BRADTMÖLLER, M., KEHL, M., PASTOORS, A., TAFELMAIER, Y., WENINGER, B., WENIGER, G.-Ch.: «Rapid climate change and variability of settlement patterns in Iberia during the Late Pleistocene», *Quaternary International*, 274, (2012), 179-204.

Sieveking, A. G.: «Groupes locaux et contacts à grande distance dans l'art paléolithique», *Préhistoire, Art et Sociétés*, LVIII, (2003), 85-97.

SILVA, P. G., BARDAJÍ, T., ROQUERO, E., BAENA-PREYSLER, J., CERRAETA, A., RODRÍGUEZ-PASCUA, A., ROSAS, A., ZAZO, C., GOY, J. L.: «El Periodo Cuaternario: La Historia Geológica de la Prehistoria», *Cuaternario y Geomorfología*. 31 (3-4), (2017), 113-154.

SLIMAK, L., FIETZKE, J., GENESTE, J.-M., ONTAÑÓN, R.: «Comment on U-Th dating of carbonate crusts reveal Neandertal origin of Iberian cave art», *Science*, 361, (2018), eaau1371.

TORRES, T. DE, ORTIZ, J. E., GRÜN, R., EGGINS, S., VALLADAS, H., MERCIER, N., TISNÉRAT-LABORDE, N., JULIÀ, R., SOLER, V., MARTÍNEZ, E., SÁNCHEZ-MORAL, S., CAÑAVERAS, J. C., LARIO, J., BADAL, E., ROSAS, A., SANTAMARÍA, D., RASILLA, M. DE LA, FORTEA, J.: «Dating of the hominid (*Homo Neanderthalensis*) remains accumulation from El Sidrón cave (Borines, Asturias, North Spain): an example of multi-methodological approach to the dating of Upper Pleistocene sites», *Archaeometry*, 52 (4), (2010), 680-705.

UTRILLA, P.: «Campamentos base, cazaderos y santuarios. Algunos ejemplos del paleolítico peninsular, J. A. Lasheras (ed.): *Homenaje al Dr. Joaquín González Echegaray*. Museo y Centro de Investigación de Altamira. Monografías, 17, 1994, 97-113.

VITA-FINZI C., HIGGS, E.: «Prehistoric Economy in the Mount Carmel Area of Palestine: Site Catchment Analysis», *Proceedings of the Prehistoric Society*, 36, (1970), 1-37.

WHITE, R., BOSINSKI, G., BOURRILLON, R., CLOTTES, J., *et alii* (+ 37): «Unas fechas antiguas no hacen una nueva arqueología: la necesidad de integrar métodos arqueométricos y arqueológicos en los estudios de arte rupestre», *Nailos*, 6, (2019), 17-38.

WHITE, R., BOSINSKI, G., BOURRILLON, R., CLOTTES, J., (+40): «Still no archaeological evidence that Neandertals created Iberian Cave Art. *Journal of Human Evolution*, 144, (2020), 102640.

## VII. EL AGUA Y LA VIDA: CÓMO LOS ANIMALES ACUÁTICOS CAMBIARON NUESTRA HISTORIA

**Andrés Arias Rodríguez**

Departamento de Biología de Organismos y Sistemas,  
Universidad de Oviedo

Como ya se ha ido explorando en los capítulos anteriores, el agua por sí misma constituye un recurso esencial para el ser humano. Y de igual modo, también es el medio en que viven diversas formas de vida, que son asimismo vitales para el hombre. La especie humana se ha aprovechado de los recursos acuáticos desde sus inicios, como ha quedado reflejado en numerosas evidencias arqueológicas e incluso en pictografías rupestres. De hecho, se ha relacionado la evolución del cerebro humano con la incorporación en la dieta de determinados tipos de ácidos grasos procedentes de animales acuáticos, tanto de agua dulce como salada. De entre los primeros animales acuáticos de los que se tiene evidencia de su uso como recurso, destacan los peces y los moluscos. Estos animales, además de constituir una importante fuente de alimento y haber jugado un papel potencial en la evolución humana, han desempeñado otras funciones, como ornamentos (p. ej. las conchas de los moluscos y los dientes de peces), símbolo de estatus social o moneda de intercambio de los primeros bienes y recursos. Poco a poco, el hombre empezó a conocer el uso medicinal que muchas especies de fauna acuática podían desempeñar.

En este capítulo, exploraremos el uso de los recursos de fauna acuática desde sus orígenes hasta la actualidad. Nos centraremos en los grupos y especies animales más representativos, desde los pequeños caracoles caurines o porcelanitas (*Monetaria moneta*), considerados como la primera moneda de la historia, hasta las ascidias *Ecteinascidia turbinata*, fuente del primer fármaco antitumoral de origen marino ('Yondelis'), o *Aplidium albicans*, productora de la plitidepsina (Aplidin®) que actualmente se encuentra en fase de estudio clínico para el tratamiento de la COVID-19. De igual modo, a partir de unas pinceladas básicas sobre su biología, iremos desentrañando por qué unos grupos animales producen más sustancias con potencial terapéutico o medicinal que otros o por qué determinadas especies son más o menos adecuadas para su uso en acuicultura.

#### **PRIMEROS ALIMENTOS DE ORIGEN ACUÁTICO, APARICIÓN Y DESARROLLO DE LA PESCA Y LA ACUICULTURA**

Aunque la especie humana es de condición terrestre, su aparición y desarrollo han estado, y están, íntima e irreversiblemente unidos al agua. Gracias a esta y a la interacción con los ambientes acuáticos, los homínidos premodernos (p. ej. *Homo habilis*; *Homo erectus*) han podido prosperar y desarrollarse, practicando un forrajeo basado en peces, moluscos y otros invertebrados acuáticos. De igual modo, también se ha relacionado el suministro de los ácidos grasos docosahexaenoico-DHA, omega 3-, araquidónico-AA y omega 6- (procedentes de la dieta basada en recursos de origen acuático) con la evolución del cerebro humano.<sup>1</sup> En relación con la identidad de los primeros organismos acuáticos utilizados como recurso por el hombre premoderno, destacan los restos fósiles encontrados asociados al yacimiento arqueológico del Pleistoceno (2,3 o 2 millones de años) 'Senga 5'.<sup>2</sup> Este yacimiento fue descubierto en 1985 al este del río Semliki en la parte occidental del Valle del Rift (Zaire oriental, África) y durante sus excavaciones fue encontrada toda una serie de restos fósiles de animales terrestres y acuáticos. Entre los segundos, destacan fragmentos óseos de mamíferos acuáticos como el hipopótamo, conchas de moluscos gasterópodos y bivalvos, y huesos y dientes de peces lacustres. En cuanto a los peces (ictiofauna), aunque no se consiguió una identificación específica, se logró identificar nueve géneros distintos pertenecientes a los órdenes

---

<sup>1</sup> Cunnane y Stewart, 2010

<sup>2</sup> Cuadrado-Martín, 2016

Osteoglossiformes, Characiformes, Siluriformes y Perciformes. De entre todos ellos, se pueden destacar por su abundancia la familia Cichlidae (cíclidos) del orden Perciformes y dos familias (Siluriidae y Clariidae) pertenecientes al orden de los Siluriformes, conocidas comúnmente como peces gato o bagres. Los peces gato reciben su nombre porque poseen una serie de barbillones que flanquean sus bocas y funcionan como órganos sensoriales para orientarse y detectar el alimento en aguas turbias. Otra característica importante de algunas especies de este grupo (los Clariidae, también llamados bagres andarines) es que poseen un órgano especializado (órgano laberinto) que les permite respirar aire, lo cual los facultó para realizar desplazamientos terrestres, ocasionales o estacionales, entre diferentes puntos de agua. Este hecho, que promueve que sean fácilmente capturados, unido a su considerable tamaño (entre 30 y 150 cm) y el consiguiente aporte nutricional de proteína, grasas y aceites, pudo motivar en gran medida el interés de los homínidos premodernos por su pesca y posterior consumo. Por otro lado, los moluscos encontrados en 'Senga 5A' se lograron identificar, en gran medida, a nivel específico, destacando las especies de caracoles gasterópodos *Pila ovata*, *Cleopatra bulimoides*, *Melanooides tuberculata*, *Bulinus* sp. y el bivalvo *Coleatura bakeri*. Todas ellas fueron halladas junto con artefactos líticos y restos de animales vertebrados, por lo que se cree que pudieron formar parte de la dieta de estos homínidos. Otro yacimiento plioleocénico importante que arrojó datos valiosos sobre los primeros animales acuáticos asociados con restos de homínidos, fue el de la Garganta de Olduvai (Tanzania). Aquí también se volvió a encontrar una gran abundancia de moluscos, destacando las almejas de agua dulce próximas al género *Corbicula* y el caracol *M. turbeculata*. En este punto, cabe destacar que el hecho de que estos caracoles dulceacuícolas empezaran a formar parte de la dieta de los primeros seres humanos abrió la puerta al desarrollo de algunas enfermedades parasitarias humanas, como las trematodiasis, causadas por platelmintos parásitos (conocidos también como duelas). Estos trematodos utilizan a estas especies de caracoles acuáticos como los primeros hospedadores intermediarios en sus complejos ciclos de vida, en los que tienen como hospedador definitivo (en el que se reproducen) a la especie humana.

Tradicionalmente, se ha considerado que la dieta humana paleolítica, incluida la de los neandertales, estaba dominada por el consumo de grandes mamíferos terrestres (teoría del forrajeo óptimo y dieta). No obstante, estudios más recientes en yacimientos de neandertales, como la excavación de Figueira Brava en Portugal (datada entre hace 86 000 y 10 600 años), sugieren que

actividades como la pesca y el marisqueo fueron vitales para el mantenimiento y desarrollo de estas poblaciones (Figura 1). Es más, establecen que hasta el 50 % de su dieta estaba basada en recursos marinos de la costa, como moluscos, crustáceos, peces, aves y mamíferos marinos, como el delfín y la foca gris. La mayor parte de los moluscos y de los crustáceos encontrados en este yacimiento siguen constituyendo hoy en día una parte importante de nuestra dieta. Entre estas especies de mariscos, destacan las lapas (*Patella* spp.), los mejillones (*Mytilus* sp.), la almeja fina (*Ruditapes decussatus*), las ostras (*Ostraea* sp.), las vieras o conchas del peregrino (*Pecten* spp.), la ñocla o buey de mar (*Cancer pagurus*) o el centollo (*Maja squinado*).<sup>3</sup> Además, los neandertales de esta zona capturaron animales de agua dulce, como tortugas semiacuáticas (p. ej. *Emys orbicularis*), para completar su dieta. De igual modo, también se tiene evidencia de que perforaban y utilizan las conchas de los moluscos gasterópodos y bivalvos capturadas como colgantes y ornamentos.



Figura 1. Representación idealizada de una escena de pesca y recolección marina por parte de los humanos paleolíticos (expuesta en el Museo Canario de Las Palmas de Gran Canaria).

---

<sup>3</sup> Zilhão *et al.*, 2020.

De este modo, en las orillas de ríos, lagos y mares las sociedades humanas prehistóricas consiguieron encontrar todos los recursos necesarios para empezar a formar las primeras grandes civilizaciones, como la mesopotámica (también conocida como civilización sumeria), entre los ríos Tigris y Éufrates, y la egipcia, a las orillas del río Nilo. Es bien sabido que el desarrollo de la alta cultura egipcia (a partir del 3000 a. C.) fue posible gracias al río Nilo y sus grandes inundaciones anuales, no solo por el limo que fertilizaba sus campos, sino por el pescado, una de sus principales fuentes de proteína. A juzgar por el testimonio pictográfico y escultórico conservado, uno de los pescados favoritos de los egipcios era, y aún es hoy en día, la tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*), un pez de la familia de los cíclidos. Para los antiguos egipcios, la importancia de la tilapia del Nilo y del pez gato o bagre andarín (*Clarias* sp.) fue tal que se los consideró como símbolos del renacimiento, la vida y la fertilidad, y se los relacionó con la habilidad para dominar el caos.<sup>4</sup>

No obstante, a los animales acuáticos se les han dado otros usos, haciendo que algunas especies hayan pasado a los anales de la historia como animales célebres. Entre estos, destacan los pequeños caracoles marinos de la especie *M. moneta*, conocidos comúnmente como porcelanitas o cauries y que son considerados como la primera moneda documentada de la historia. Estos pequeños cauries empezaron a utilizarse en la antigua China, hacia el año 2200 a. C., como moneda de intercambio. Desde esa época lejana hasta la actualidad, las conchas de diferentes especies de moluscos han sido usadas como moneda en prácticamente todos los rincones a lo largo y ancho del globo.

Y desde el momento en el que el ser humano empezó a aventurarse mar adentro, los ambientes marinos empezaron a constituir toda una fuente de riquezas. Los antiguos romanos empezaron a aficionarse al consumo de pescado de agua salada, lo que hizo que, en diferentes partes de su amplio territorio, se empezaran a desarrollar importantes pesquerías, haciendo que la península ibérica se colocara a la cabeza de los territorios pesqueros de aquella época. Con la caída de Roma, los pueblos normandos del mar del Norte tomaron el relevo a los romanos, empezando a dominar la industria pesquera y desarrollando técnicas de pesca metodizadas para la captura de dos especies principales: el bacalao (*Gadus morhua*) y el arenque (*Clupea harengus*). Así, ambas especies se convirtieron en recursos alimenticios comunes en el norte de Europa durante el siglo IX.<sup>5</sup>

---

<sup>4</sup> Castel, 2009.

<sup>5</sup> Ortea *et al.*, 1980.

En la Edad Media, empieza a desarrollarse la pesca de la ballena, aunque los primeros datos sobre su consumo por parte de los seres humanos se sitúan en el Paleolítico Superior, cuando estos aprovechan los cetáceos varados en la costa. En esta época, los marineros normandos y españoles empiezan a disputarse la primacía sobre la pesca de la ballena y aparece la profesión de ballenero. Los balleneros vascos, cántabros y asturianos, principalmente, fueron conocidos durante el Medievo por su gran habilidad y destreza en la caza de estos majestuosos mamíferos marinos. La ballena habitual en las costas cantábricas era la ballena franca, *Eubalaena glacialis*, que podía alcanzar en torno a 15 metros de longitud y pesar hasta 70 toneladas. El producto principal que se obtenía de su caza era la grasa, que posteriormente se transformaba en aceite (el saín) y se utilizaba para el alumbrado en lámparas y candiles, ya que ardía sin desprender humo ni dar olor. También se utilizaban las barbas (láminas elásticas de queratina que las ballenas poseen en el maxilar superior y que utilizan para alimentarse), ya que eran uno de los pocos materiales flexibles disponibles en la Edad Media. Su carne apenas era consumida en España, pero se salaba y se exportaba para su venta en Francia. Su osamenta servía como material de construcción, adorno o se utilizaba en ebanistería. Todo este comercio y la elaboración de productos relacionados con la actividad ballenera dieron un gran impulso a la economía de las comunidades del norte de España.<sup>6</sup>

La sombra de la sobrepesca, el colapso de muchas pesquerías, la contaminación y el cambio global ponen en duda la capacidad del océano para seguir proporcionando alimento y recursos a la humanidad. Una gestión más eficiente de los recursos marinos, la reducción y control de los contaminantes y el desarrollo de medidas para la conservación de la biodiversidad podrían ayudar a resolver el problema, pero por sí solos no constituirían una solución, ya que el aumento de la población mundial hace que la demanda de recursos marinos aumente. Una posible solución es el cultivo de las especies marinas y de agua dulce, al igual que hacemos con las especies terrestres, actividad conocida como acuicultura. Este planteamiento no es nuevo: los antiguos chinos (desde aproximadamente el año 1100 a. C.) cultivaban carpas (*Cyprinus carpio*) en estanques (Figura 2) y ostras en el mar,<sup>7</sup> al igual que los antiguos griegos y romanos, que poseían viveros de peces y moluscos. El primer documento escrito sobre acuicultura fue redactado en China en el año 474 a. C. y trataba sobre el cultivo de la carpa común en estanques, y fue precisamente este ciprínido

---

<sup>6</sup> Campos y Peñalba, 1997.

<sup>7</sup> González-Serrano, 1998.

la especie que dominó en acuicultura desde sus inicios hasta la Edad Media. Poco después, hacia el año 460 a. C. también en el gigante asiático se redacta el primer tratado técnico sobre el cultivo de moluscos, en concreto de la ostra u ostión (*Crassostrea*) –ostricultura–, en el que utilizaban bloques de piedra entrelazados con conchas de ostras. En Europa, se considera que el romano Sergius Orata (140–191 a. C.) fue el padre de la ostricultura europea, ya que fue el creador de los primeros parques de engorde de ostra plana (*Ostreaa edulis*) y también diseñó los primeros sistemas de captación de semilla (juveniles de ostra) en lagos y ensenadas. Actualmente, la acuicultura es considerada, según la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura), como el sector de producción de alimentos de más rápido crecimiento y responsable del 50 % del pescado destinado a la alimentación a nivel mundial. Esta misma organización internacional define esta actividad como «el cultivo de organismos acuáticos, incluyendo peces, moluscos, crustáceos y vegetales acuáticos (...) El Hombre interviene en el proceso para aumentar la producción, en operaciones como la siembra, la alimentación, la protección frente a depredadores, etc. Esta actividad de cultivo presupone que los individuos o asociaciones que la ejercen son propietarios de la población bajo crianza». Existen cerca de 580 especies acuáticas que se cultivan actualmente en todo el mundo, aunque con la tecnología actual no se pueden cultivar todas las especies que se querría. En relación con las especies cultivables de peces, estas deben reunir unas características generales, como ser de fácil reproducción, poner más de 50 000 huevos por kilogramo de peso de la hembra, tener una mortalidad de la descendencia menor del 50 %, una alta eficiencia en la conversión de alimento en kilogramos de peso corporal, alcanzar el tamaño comercial en menos dos años y estar adaptados a vivir en altas densidades.

No obstante, hoy en día, en acuicultura no solo se cultivan especies de peces, moluscos y crustáceos, sino que también se han ido incorporando otras, como, por ejemplo, las ranas. La carne de estos anfibios, las conocidas ancas de rana, ha sido consumida desde antiguo. Herodoto se refiere a estas como un delicado manjar que era muy apreciado por los miembros de alta sociedad griega de la época.<sup>8</sup> El cultivo de estos anfibios, la ranicultura, es una actividad relativamente nueva, cuya producción no está solo orientada hacia su consumo como alimento, sino también para su uso en la investigación biológica y biomédica. La carne de rana tiene un alto valor nutricional, contiene 10 aminoácidos esenciales

---

<sup>8</sup> Rodríguez, 2007.

y es baja en colesterol. Estas cualidades, junto con su alta digestibilidad, han llevado a su recomendación médica en dietas de personas convalecientes y en tratamientos de cuadros alérgicos y de otras afecciones. Como complemento a la producción de carne, de las ranas también se obtienen otros subproductos como el cuero (su piel curtida o teñida) para la confección de prendas de vestir y complementos, o su hígado y su grasa para la elaboración de cosméticos y medicamentos. De igual modo, también se está experimentado el uso médico de su piel para el tratamiento de quemaduras de segundo grado y para la obtención de antibióticos como las magaininas, que podrían tener utilidad en el tratamiento de diferentes enfermedades bacterianas humanas.



Figura 2. Carpas (*Cyprinus carpio*) en estanque. Variedad salvaje (izquierda); variedad cultivada o koi (derecha).

A pesar de las bondades de la acuicultura anteriormente mencionadas, las actividades acuícolas también son productoras de un gran volumen de desechos y contaminantes que pueden acabar en el medio natural. Esto ha propiciado que los sectores más comprometidos con el medio ambiente y preocupados por la naturaleza estén apostando hoy en día por un nuevo sistema de cultivo acuícola, la acuicultura multitrófica integrada (AMI). La AMI consiste en una nueva modalidad de acuicultura que hace un mejor aprovechamiento de los recursos, retirando el exceso de materia orgánica generado en el cultivo acuícola

principal (especies de peces) mediante la incorporación de cultivos secundarios (moluscos, cangrejos y algas). Las primeras especies de estos cultivos secundarios (bivalvos filtradores y cangrejos detritívoros/carroñeros) se alimentan de un modo secuencial de los restos de pienso y desechos de los peces del cultivo principal y finalmente la extracción inorgánica y reciclaje total de los residuos generados sería llevada a cabo por el cultivo secundario de algas (Figura 3). Así se consigue una mejora en el medio ambiente, una diversificación de especies y un beneficio económico adicional.

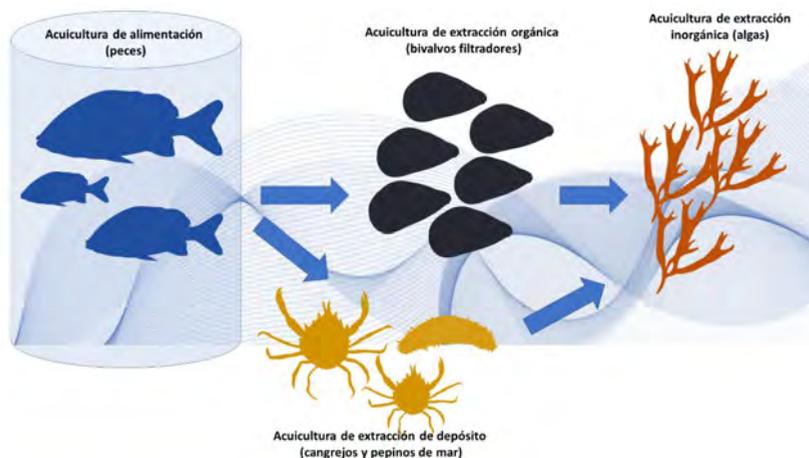


Figura 3. Esquema funcional de un sistema de acuicultura multitrofica integrada.

En la actualidad, algunos productos obtenidos de los animales acuáticos, como la piel e incluso las escamas de algunas especies de peces, están causando tendencia en la moda contemporánea y se están confeccionando con ellos diferentes tipos de ropa (incluidas prendas de alta costura), bolsos y otros complementos. Las pieles del salmón, el bacalao o la perca del Nilo son algunas de las más utilizadas. Varias empresas de todo el mundo, incluida España, se han unido a esta iniciativa que se está empezando a denominar moda azul, haciendo un guiño al concepto de economía azul, el cual persigue desarrollar nuevos productos biológicos con materias primas de origen marino o dulceacuícola que, de otra forma, serían desechadas por otras industrias. Se calcula que aproximadamente el 35 % del pescado y del marisco de todo el mundo se pierde o se desperdicia, sin obtener ningún beneficio de su pesca o producción (FAO). Así,

con el desarrollo y la implantación de la economía azul en la producción textil y de complementos a partir de productos como la piel de pescado, se podría beneficiar en gran medida al sector pesquero y al de la producción acuícola. Según la FAO, la industria del pescado emplea a unos 60 millones de personas en el mundo, muchas de las cuales viven en pequeñas localidades de tradición pesquera. Las oportunidades de estas pequeñas comunidades pesqueras son muy limitadas y, si se crea un valor para esa parte del pescado que se desecha, mejorarán las condiciones de vida de muchas de ellas. De igual modo, la piel de los peces cartilagosos, como el tiburón, está sirviendo como inspiración para el diseño de trajes para la natación y el buceo.

#### **ANIMALES ACUÁTICOS MEDICINALES Y PRODUCTOS TERAPÉUTICOS DE ORIGEN ACUÁTICO**

El agua siempre ha sido considerada como una fuente de vida y remedios para muchos de los males que afligen al ser humano. Ya en el siglo I, Plinio el Viejo manifestó en su *Naturalis historia* que la naturaleza había distribuido medicinas por todas partes e hizo referencia a toda una serie de animales y plantas con utilidad medicinal de la época. Su coetáneo, el famoso médico griego Dioscórides, hizo una revisión exhaustiva sobre esta temática y recopiló en su obra *De materia medica*, la mayoría de los remedios naturales y los venenos procedentes de diferentes organismos, que eran utilizados en esos tiempos. La importancia de estos trabajos fue tal que sus remedios y recetas fueron utilizados hasta la Edad Media y están considerados como obras clave en farmacopea (literatura recopilatoria de recetarios de productos con propiedades medicinales reales o supuestas).

Cuando se piensa en animales acuáticos con importancia o uso medicinal, uno de los primeros que nos viene a la cabeza es la célebre sanguijuela medicinal, la cual lleva el epíteto medicinal tanto en su nombre común como en el científico, *Hirudo medicinalis*. Al contrario de lo que se creía tradicionalmente, bajo el nombre de sanguijuela medicinal no existe solo una especie, sino que acoge al menos cinco, y todas ellas son hematófagas y pueden tener uso terapéutico. Las sanguijuelas medicinales se han utilizado durante miles de años, conociéndose su uso desde la antigua Grecia y el Egipto faraónico, cuando las sangrías (flebotomía) constituían una práctica común en el tratamiento de diferentes enfermedades y afecciones humanas. En la Europa de los siglos XVIII y XIX, la popularidad de estos anélidos fue tan alta que empezaron a utilizarse de forma masiva en las práctica médica y paramédica de la época. Actualmente

han vuelto a recobrar su protagonismo en los tratamientos postoperatorios de cirugías de reconstrucción y en los injertos de piel. Y, aunque la mayoría de las personas se estremecen ante la mera mención de la palabra sanguijuela y la idea de tenerlas adheridas a su piel como parte de su tratamiento médico les resultaría inaudita, esto es lo que está sucediendo en los quirófanos más avanzados de EE. UU., Francia y Alemania. De igual modo, se están caracterizando y aislando nuevos anticoagulantes procedentes de su saliva, lo que puede abrir la puerta a nuevos tratamientos y usos en biomedicina. Durante los siglos XVIII y XIX, las sanguijuelas medicinales se criaron en estanques con fines comerciales, en varios países europeos, incluida España y nuestros vecinos Portugal y Francia. Millones de estas sanguijuelas se utilizaron en hospitales, barberías y farmacias de la época. Existía un gran comercio de sanguijuelas medicinales y la producción local se complementaba habitualmente con importaciones del extranjero. Solo en España, a mediados del siglo XIX, el tráfico de importación/exportación por comercio marítimo suponía el trasiego de entre 10 000 y un millón de sanguijuelas al año. Gracias a la obra de Pascual Madoz (1845-1850), se sabe que en nuestro país existían depósitos o reservorios de sanguijuelas registrados, e incluso estanques de cría, en hospitales (p. ej. Hospital de la Resurrección en Valladolid), en recintos privados (p. ej. Algete en Madrid) o en farmacias y herbolarios (p. ej. herbolarios en Valencia).<sup>9</sup>

Esto desencadenó una sobreexplotación masiva de las poblaciones naturales de sanguijuelas medicinales, lo que provocó que estas especies empezaran a escasear desde mediados del siglo XIX y sus poblaciones han continuado mermando hasta nuestros días. De hecho, actualmente estos hirudíneos se consideran prácticamente extintos en la mayor parte de la península ibérica. A pesar de su gran importancia pasada y presente en medicina y farmacología, nuestro conocimiento sobre su diversidad y distribución es aún bastante incompleto. Un claro ejemplo de ello lo representan las sanguijuelas medicinales ibéricas, que han sido estudiadas de forma insuficiente y totalmente asistemática. Recientemente, se ha descubierto la existencia de una nueva subespecie endémica en el norte de la península ibérica, *Hirudo verbana bilineata* (Figura 4). Esta subespecie se caracteriza por la presencia de un par de líneas pares dorsales que recorren su cuerpo, y actualmente solo se encuentra en un par de charcas de alta montaña, en las provincias de León y de Álava, aunque es probable que en el pasado tuviera una distribución mucho más amplia que abarcaba la mitad norte de la península ibérica.

---

<sup>9</sup> Arias *et al.*, 2021.



Figura 4. Ejemplar de sanguijuela medicinal ibérica (*Hirudo verbana bilineata*) en la naturaleza.

Una de las últimas aplicaciones de los peces de agua dulce en medicina humana es el uso de su piel como vendaje para el tratamiento de quemaduras de segundo y tercer grado. Recientemente, se han empezado a llevar a cabo los primeros tratamientos de quemados con piel de tilapia y se han obtenido excelentes resultados. La piel del pescado tiene una gran cantidad de colágeno, lo que le da resistencia al vendaje y proporciona al tejido dañado un grado de humedad adecuado que ayuda en el proceso de cicatrización. De igual modo, la piel de los peces posee una buena adherencia a la piel humana, lo que ayuda a evitar la contaminación externa, limita la pérdida de proteínas y plasma, y evita así la deshidratación de la dermis y el desarrollo de zonas necróticas.

En el mundo marino, los organismos que lo pueblan son capaces de producir una amplia variedad de biomoléculas, a menudo únicas y críticas para su supervivencia en términos de alimentación, reproducción o protección (Figura 5). Estos productos naturales son la base de la especialización ecológica porque pueden afectar tanto a la distribución de las especies como a sus patrones de alimentación o la estructura de la comunidad y su biodiversidad.<sup>10</sup> Dentro de los principales grupos de animales marinos productores de sustancias con potencial terapéutico, destacan las esponjas, los cnidarios, los briozoos, los molus-

---

<sup>10</sup> Ávila *et al.*, 2018.

cos heterobranquios marinos (babosas y liebres de mar) y las ascidias.<sup>11</sup> Entre las principales características de estas sustancias bioactivas destaca su especificidad, ya que su síntesis *de novo* o su asimilación no son posibles para todas las especies. Otra característica destacable es su alta heterogeneidad a nivel funcional, como repelentes frente a depredadores, mediadores en la competencia por el espacio con otras especies, antimicrobianos y antivirales, señalizadores celulares, etc.<sup>12</sup> En general, las sustancias químicas responsables de esta bioactividad ecológica son compuestos orgánicos, denominados productos naturales o metabolitos secundarios, para distinguirlos de los metabolitos primarios (azúcares, lípidos, proteínas y ácidos nucleicos). Se denominan secundarios, independientemente de que puedan ser cruciales para la supervivencia de las especies que los producen, porque se sintetizan a partir de metabolitos primarios. Las rutas bioquímicas para sintetizar/asimilar estos productos naturales suelen ser complejas e implican un gasto metabólico alto, incluso cuando provienen de la dieta, ya que los compuestos deben procesarse, transferirse o almacenarse en sitios específicos del cuerpo del animal. Entre estas moléculas bioactivas, los compuestos del grupo de los terpenoides son los más abundantemente producidos por los animales marinos, representando aproximadamente el 60 % de todos los productos naturales conocidos. Los terpenoides (o isoprenoides) son una clase grande y diversa de productos químicos orgánicos derivados de los terpenos, con estimaciones de la existencia de más de 70 000 compuestos distintos, lo que nos proporciona una idea de su complejidad y presencia en una gran variedad de formas de vida.<sup>13</sup>

Como ya se ha mencionado en el capítulo 4, las esponjas o poríferos son un grupo de invertebrados marinos muy antiguo que se alimentan principalmente por filtración (a excepción de una familia, los Cladorhizidae, que viven en cuevas submarinas o a gran profundidad y que, debido a la ausencia de alimento en suspensión de estas zonas, han desarrollado un hábito de alimentación carnívoro). Las esponjas viven fijas a un sustrato (vida sésil), filtrando diariamente un gran volumen de agua y reteniendo de esta las partículas alimenticias (plancton, bacterias, materia orgánica particulada, etc.). Como es lógico, en el agua de mar no solo se encuentran organismos que les sirven de alimento, sino que también hay bacterias, protozoos y virus patógenos. Por tanto, para poder mantener este tipo de alimentación, las esponjas tienen que

---

<sup>11</sup> Proksch *et al.*, 2002.

<sup>12</sup> Pietra, 2002.

<sup>13</sup> Ávila, 2020.

desarrollar algún tipo de mecanismo para evitar ser infectadas por estos otros organismos. Así, empezaron a desarrollar diferentes tipos de compuestos con actividad antibiótica. De igual modo, estos animales sésiles tienen que competir por el espacio con otros, evitar ser comidos e impedir que otros organismos crezcan encima de su superficie y los asfixien, lo que conlleva la producción, o asimilación procedente de la dieta, de diferentes metabolitos o sustancias bioactivas para poder solucionar estos problemas. Muchos de los productos biológicos (esteroles, alcaloides, terpenos, fenoles y quinonas, entre otros) utilizados por los poríferos para estos fines, que pueden ser de síntesis propia o asimilados de la dieta, tienen actividad de tipo antimitótico, es decir, impiden el normal desarrollo de la mitosis o proceso de división celular. Uno de los mecanismos más comunes es que imposibilitan la polimerización de la tubulina, la proteína responsable de la formación de los husos acromáticos o mitóticos. Otros metabolitos bioactivos inducen la apoptosis o muerte celular.<sup>14</sup>

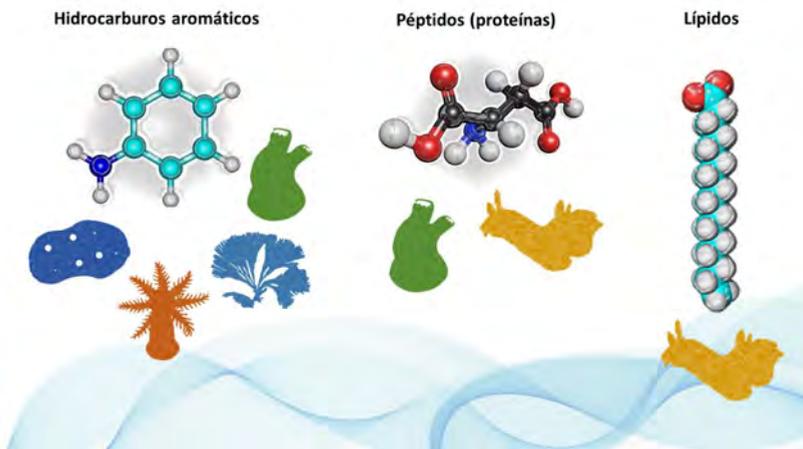


Figura 5. Naturaleza química de los principales productos bioactivos procedentes de invertebrados marinos (esponjas, cnidarios, briozoos, moluscos y ascidias).

Entre los productos obtenidos a partir de los poríferos, destaca el avarol, un terpeno hidroquinonado procedente de *Dysidea avara*, una especie que se puede encontrar en la zona intermareal de las costas cantábricas y mediterráneas ibéricas. El avarol es un compuesto con actividad citotóxica con propiedades antibacterianas, antitumorales, antivíricas y antiinflamatorias. Actualmente se

utiliza en el tratamiento de enfermedades de la piel como la psoriasis. También en otras especies del género *Dysidea* se han aislado diferentes tipos de esteroides, los cuales ejercen su acción sobre las membranas biológicas, ya que forman parte de su composición, y, al igual que los alcaloides sulfatados (también encontrados en estas esponjas), han mostrado actividades antimicrobianas. A mediados de los años 80, en aguas de la Micronesia se descubrieron dos nuevos alcaloides esteroideos con función antimicrobiana en la esponja *Plakina* sp. Posteriormente, se comprobó que estos dos metabolitos secundarios eran capaces de inhibir el crecimiento de las bacterias *Staphylococcus aureus* y *Candida albicans*, ambas patógenas y causantes de afecciones en el ser humano. También se han encontrado sesquiterpenos con actividades antibióticas contra *S. aureus* y *Bacillus subtilis*, procedentes del metabolismo secundario de esponjas como *Luffariella variabilis*.

Otro de los productos de renombre obtenidos de las esponjas del género *Haliclona* son las manzaminas, alcaloides con actividad anticancerígena frente a la leucemia murina y que también se ha comprobado que inhiben el crecimiento del agente causal de la malaria (*Plasmodium*) en roedores. Un ejemplo más cercano de las bondades de estos poríferos lo tenemos en la cotidiana esponja de baño (*Spongia officinalis*), que es rica en terpenoides, como los furano-diterpenos tetracíclicos, que tienen propiedades antifúngicas y antimicrobianas.<sup>11</sup>

Con relación a los cnidarios, estos también presentan un elenco de metabolitos secundarios que tienen actividad terapéutica. Las principales sustancias bioactivas provienen de los miembros de la clase antozoos o animales flor, entre los que encontramos a las anémonas, los corales, las gorgonias y las plumas de mar. La mayor parte de los compuestos obtenidos de estos cnidarios tienen actividad anticancerígena y se corresponden generalmente con esteroides, terpenos y otros compuestos como las ceramidas. La gorgonia *Plexaura homomalla* es la principal fuente natural de prostaglandinas cuya actividad antiinflamatoria es muy importante en usos terapéuticos. Otros corales blandos, como *Subergorgia suberosa*, producen sesquiterpenos capaces de inhibir la transmisión neuromuscular en el músculo cardíaco, actuando sobre los canales de sodio dependientes de voltaje, lo que hace que su estudio sea muy importante para el tratamiento de la citólisis (ruptura) de células tumorales. De igual modo, en otros corales blandos como *Simularia cervicornis* o *Clavularia viridis*, se consiguieron aislar diferentes compuestos del tipo de los glucósidos y los cervicósidos, entre otros, con actividad antitumoral potencial frente a diferentes procesos cancerígenos humanos.<sup>14</sup>

Uno de los productos estrella de los cnidarios antozoos es el denominado eleutherobín, un diterpeno glicosilado extraído del coral blando del género *Eleutherobia*. Este compuesto tiene actividad antitumoral y actúa impidiendo la proliferación celular mediante la inhibición de la polimerización de la tubulina a la hora de formación de los husos acromáticos durante la mitosis. Se ha ensayado en el tratamiento de cáncer de mama, renal, de ovario y de pulmón, obteniéndose una efectividad superior a la de otros medicamentos anticancerígenos tradicionales, como el taxol.<sup>14</sup> Otros compuestos del grupo de los glucósidos, denominados pseudoteropsinas, originalmente extraídos de la gorgonia o abanico del mar del Caribe, *Antillogorgia elisabethae* (antes *Pseudopterogorgia elisabethae*), tienen actividad antiinflamatoria y analgésica y se están comercializando actualmente en cremas cosméticas antiarrugas (bajo el nombre de Resilience®).

Con relación a los otros grupos de cnidarios, se pueden destacar también algunos descubrimientos de metabolitos secundarios en diferentes especies de la clase de los hidrozooos. En este caso, estos productos bioactivos están generalmente asociados a los componentes del veneno que liberan a través de sus nematocistos (tipo de cnido, orgánulo celular utilizado para la inyección de toxinas) como mecanismo de defensa. Una de las especies más conocidas de este grupo es *Physalia physalis*, una colonia flotante de pólipos también conocida como carabela portuguesa, por su forma y modo de vida. Su veneno consiste en una mezcla de péptidos y enzimas citotóxicos que, una vez aislados y purificados, mostraron un amplio abanico de efectos neurotóxicos, cardiotoxicos, necróticos y hemolíticos que pueden tener aplicación terapéutica.

Los briozoos o ‘animales musgo’ son un grupo de invertebrados coloniales marinos cuya alimentación es de tipo suspensívoro o filtrador. Para ello, utilizan una estructura denominada lofóforo, que es una corona o herradura de tentáculos ciliados que rodea a la boca. El metabolito secundario bioactivo más importante producido por los briozoos es la briostatina, un policétido tipo lactona macrocíclica con actividad antineoplásica, aislado en especies como *Bugula neritina*. Las briostatinas tienen un efecto potencial en el tratamiento de diferentes tipos de cánceres. En otras especies, como *Phidolopora pacifica* se encontraron compuestos como la phidolopina, que posee actividad antifúngica, y en *Alcyonidium gelatinosum* se halló un ion sulfoxonio que actúa como hapteno en las dermatitis alérgicas de contacto.<sup>15</sup>

---

<sup>14</sup> Long *et al.*, 1998.

<sup>15</sup> Christophersen, 1985.

Los moluscos bivalvos son un grupo exclusivamente acuático y el segundo más diverso de su filo, después de los gasterópodos. La ostra rizada u ostión asiático, *Magallana gigas*, es una especie icónica en acuicultura y también es una de las especies invasoras más dañinas a nivel mundial. Sin embargo, su fama no termina aquí, ya que en ella se han conseguido aislar dos péptidos, LLEYSI y LLEYSL, con actividad antiviral, ya que inhiben la replicación viral impidiendo el ensamblaje de los nuevos viriones dentro de las células hospedadoras. Esto es de especial importancia en el tratamiento de algunas enfermedades humanas como las causadas por el virus de la inmunodeficiencia humana (VIH).<sup>11</sup>

El grupo de los mejillones es una de las fuentes de metabolitos secundarios más prolífica dentro de los bivalvos. A partir de diferentes productos bioactivos extraídos de estos, se han comercializado varios fármacos o suplementos dietéticos con propiedades antimicrobianas, antiinflamatorias y anticancerígenas. Uno de ellos es el Lyprinol®, un extracto lipídico del mejillón neozelandés de labio verde *Perna canaliculus*, al que se le atribuyen propiedades antiinflamatorias y antiartríticas, lo que lo hace especialmente indicado para el tratamiento de la osteoartritis, artritis reumatoide o procesos asmáticos. Dicho extracto está compuesto por ésteres de esterol, triglicéridos, ácidos grasos libres (saturados e insaturados), carotenoides, esteroides y lípidos polares. Su mecanismo de acción antiinflamatoria está relacionado con su actividad inhibitoria de la producción de mediadores inflamatorios de la cascada del ácido araquidónico.<sup>11</sup>

Los culinariamente apreciados bivalvos del género *Mytilus*, al que pertenece el mejillón mediterráneo (*M. galloprovincialis*) y el mejillón azul (*M. edulis*), también contienen ácidos grasos poliinsaturados (PUFA), como el omega-3 de cadena larga, el ácido eicosadienoico, el ácido eicosapentaenoico o el ácido decapentaenoico (DHA), pero su proporción es mucho menor que en los mejillones verdes del género *Perna*. En el mejillón mediterráneo se han encontrado lípidos bioactivos con acción terapéutica en el tratamiento de quemaduras y que aceleran el proceso de cicatrización de la piel. Además de lípidos, en *M. galloprovincialis* se aisló el compuesto anticancerígeno registrado como Mytilec®, una proteína de tipo lectina de unión a azúcares ( $\alpha$ -galactosa de 17 kDa), que demostró una actividad citotóxica significativa sobre células cancerígenas en el tratamiento del linfoma de Burkitt. Otros tipos proteicos aislados de *M. galloprovincialis* son las denominadas mitimicinas, un conjunto de péptidos naturales no hidrolizados enzimáticamente que están presentes en la hemolinfa del mejillón y que les confieren cierta inmunidad innata, causando la lisis o ruptura celular de células bacteriana y fúngicas, al alterar la permeabilidad de sus mem-

branas celulares. Las mitomicinas son conocidas como péptidos antimicrobianos (AMP) y han demostrado una gran actividad antifúngica en el tratamiento de las afecciones causadas por *Neurospora crassa* y contra *Fusarium oxysporum*.<sup>16</sup>

Las babosas y las liebres de mar son un extraño grupo de moluscos mayoritariamente marinos que han perdido o reducido mucho su concha. Entre las principales innovaciones detrás del éxito evolutivo de este grupo de animales, se encuentra su habilidad para robar estructuras funcionales (cleptoplastia) o productos químicos (cleptoquímica) de otros organismos. En la cleptoplastia, las babosas de mar adquieren ciertas estructuras funcionales de sus presas y las aprovechan para su propio beneficio. Estas estructuras robadas pueden ser cloroplastos de las algas, que utilizan para obtener energía o camuflarse, o los nematocistos (cleptocnidos) de los cnidarios de su dieta, para usarlos posteriormente como mecanismos de defensa (cleptodefensas). La cleptoquímica consiste en la incorporación de productos naturales de la dieta (cleptoquímicos), que se denominan cleptoquimodefensas cuando se utilizan para su defensa propia. El uso de armas químicas es, sin duda, la estrategia más llamativa entre los moluscos heterobranquios marinos. Los metabolitos bioactivos, que a menudo se derivan de la dieta, pueden usarse de diversas maneras, transferirse, acumularse en diferentes órganos, glándulas o partes externas del animal, o pueden liberarse junto con las secreciones mucosas. Algunas especies pueden transformar los metabolitos de la dieta para hacerlos menos tóxicos para el molusco, o más dañinos y disuasorios para sus depredadores. De igual modo, algunas especies de babosas y liebres de mar pueden sintetizar sus propias sustancias bioactivas a través de precursores químicos simples. A menudo, las defensas químicas están asociadas a coloraciones de advertencia (aposemáticas), lo que permite a las especies sobrevivir en hábitats expuestos, donde los depredadores aprenden a asociar coloraciones brillantes o llamativas con su mal sabor. Además, muchos pigmentos poseen propiedades bioactivas (por ejemplo, algunos alcaloides) o pueden actuar como filtros solares que brindan protección frente a la radiación ultravioleta.<sup>10</sup>

Dentro de los moluscos heterobranquios, las liebres de mar del género *Aplysia* son probablemente las más exhaustivamente estudiadas con relación a las sustancias bioactivas que producen (Figura 6). Esto ha sido, probablemente, debido a que tienen una amplia distribución a lo largo y ancho del globo y habitan en aguas relativamente someras. Se considera que los principales productos naturales

---

<sup>16</sup> Mitta *et al.*, 1999.

que se obtienen de ellas son metabolitos secundarios modificados que adquieren de las algas y las cianobacterias de su dieta. Entre estos destacan las aplironinas, policétidos macrólidos que tienen actividad antitumoral, sesquiterpenos como el aplisin y el aplisinol o péptidos citotóxicos como la aplisianina, que presentan actividad antimicrobiana y antifúngica. Otras especies de liebres de mar, como *Dolabella auricularia* y *Dolabrifera dolabrifera*, además de procesar metabolitos secundarios que obtienen de las algas rojas y pardas de las que se alimentan, son capaces de biosintetizar otros productos como polipropionatos y péptidos, con propiedades antitumorales y antineoplásicas. Entre estos productos sintetizados *de novo*, destacan las dolastatinas obtenidas de *Dolabella*, un tipo de péptidos con propiedades antimitóticas que bloquean la polimerización de la tubulina y que son utilizados como agentes anticancerígenos. El nudibranquio *Hypselodoris orsini* lleva a cabo la transformación endógena de un metabolito secundario sesquiterpenoide, el scalarial, que obtiene de la esponja *Cacospongia mollior* de la que se alimenta y, mediante una serie de reacciones metabólicas propias, transforma en deoxoscalarin y ketodeoxoscalarin, y almacena en formaciones dérmicas del manto (parte dorsal de la pared del cuerpo que cubre la masa visceral del molusco).<sup>10</sup>



Figura 6. Liebres de mar en su hábitat natural. *Aplysia dactylomela* (izquierda); *Aplysia fasciata* (derecha).

Otro molusco, un gasterópodo de la familia de los cónidos, *Conus magnus*, produce una conotoxina denominada ziconotida que se ha convertido en uno de los productos naturales más icónicos de los producidos por los moluscos. La ziconotida es un péptido que tiene propiedades analgésicas para tratar el dolor crónico, y se considera que tiene un efecto 50 veces superior al de otros

productos como la morfina. El mecanismo de acción de esta conotoxina consiste en el bloqueo de los canales de calcio necesarios para la liberación de los neurotransmisores durante la transmisión sináptica. De esta forma se impide la comunicación entre las células sensorias aferentes nociceptivas (receptoras de dolor) y las neuronas de la médula espinal que transmiten las señales al cerebro. La ziconotoxina es utilizada actualmente como anestésico y para el tratamiento del dolor crónico grave, bajo el nombre comercial de Prialt®.

Los equinodermos (estrellas de mar, ofiuras, erizos, pepinos y lirios de mar) son un grupo de invertebrados exclusivamente marinos que se caracterizan por la producción de diversos metabolitos secundarios que presentan cierta toxicidad. Estos compuestos bioactivos les brindan alguna protección frente a la depredación por muchas especies de peces y caracoles marinos y frente a los ataques de diferentes microorganismos patógenos. Sus principales metabolitos secundarios son las saponinas, que suelen estar presentes en sus secreciones de mucus y les ayudan a repeler el ataque de sus depredadores. Dentro de estas, encontramos las asterosaponinas, que son glucósidos esteroideos con propiedades hemolíticas, citotóxicas, antitumorales, antimicrobianas, antifúngicas y antiinflamatorias. Entre los pepinos de mar u holoturias, se han encontrado diferentes péptidos bioactivos. La especie *Acaudina molpadiodes* es considerada un manjar en las regiones costeras de China: es un marisco rico en proteínas y posee un péptido que actúa sobre la enzima convertidora de la angiotensina (ACE) y por tanto desempeña un papel importante en la regulación de la presión sanguínea y en los tratamientos para la hipertensión. Este compuesto funciona como un intensificador de la actividad inhibitoria sobre la ACE, tras su digestión con peptina y quimiotripsina. Además, el consumo de *A. molpadiodes* como parte de la dieta supone una gran ventaja a la hora de la administración de este péptido para un posible tratamiento. De esta misma especie de holoturia y de *Thelenota ananas* se consiguió aislar el polisacárido condroitín sulfato, al cual se le han sugerido propiedades antivirales e incluso anti-VIH que están en fase de estudio en laboratorio. Además, el condroitín sulfato también es utilizado como complemento alimenticio para aliviar el dolor derivado de la artrosis. Estudios más recientes revelaron que la especie *Holothuria fuscocinerea* poseía un triterpeno bioactivo que presenta actividad citotóxica frente a células cancerígenas humanas.<sup>17</sup>

Los equinoideos o erizos de mar también poseen determinados productos bioactivos de síntesis propia. Entre ellos, cabe destacar los ácidos grasos

---

<sup>17</sup> Zhang *et al.*, 2006.

poliinsaturados (PUFA) y los pigmentos carotenoides presentes en las gónadas, tanto masculinas como femeninas, de los erizos tropicales *Diadema setosum* y *Salmacis sphaeroides*. Entre los PUFA, los ácidos eicosapentanoico y docosahexanoico presentan actividad preventiva sobre diferentes tipos de enfermedades cardiovasculares y propiedades anticancerígenas. En cuanto a los carotenoides, predominan los betacarotenos y las xantofilas, los cuales han demostrado efectividad en la prevención de desarrollo de distintos tipos de tumores.<sup>18</sup>

Entre los asteroides o estrellas de mar, destaca la especie tropical conocida como la gran corona de espinas, *Acanthaster planci*, que es una gran depredadora de corales hermatípicos o formadores de arrecife. En el análisis de los extractos bioactivos obtenidos de esta especie se encontraron compuestos con actividad citotóxica e inductora del proceso de apoptosis o muerte celular, con aplicaciones en el tratamiento del cáncer de mama. De hecho, actualmente, un compuesto no esteroideo extraído de *A. planci*, que modula la expresión génica de los receptores de estrógeno e induce apoptosis en las células cancerígenas, se considera un potente agente quimioterapéutico de acción rápida. Este compuesto se está comercializando bajo el nombre de *Tamoxifen*® y se administra en tratamientos de quimioterapia del cáncer de mama.

Las ascidias son un grupo de invertebrados marinos bentónicos, conocidos también como tunicados, ya que poseen una capa o túnica inerte de naturaleza celuloide que los envuelve y protege. Estos animales filtradores son grandes fuentes de metabolitos secundarios con utilidad biomédica y se han convertido en uno de los grupos más estudiados con el objetivo de encontrar nuevos productos marinos con potencial terapéutico. La producción de compuestos químicos es especialmente importante para las ascidias, ya que son animales de cuerpo blando y vida sésil, que utilizan los metabolitos secundarios para disuadir a sus depredadores (como diferentes especies de peces), competir por el espacio, controlar el asentamiento y el crecimiento de otros organismos sobre sus cuerpos o de microorganismos patógenos que les puedan causar enfermedad. Uno de los compuestos más comunes obtenidos de las ascidias son los péptidos cíclicos del grupo de las dideminas y las más conocidas han sido aisladas de las ascidias del Caribe pertenecientes al género de *Trididemnum*. Más del 80 % de los nuevos compuestos bioactivos obtenidos de estos tunicados contienen nitrógeno y casi el 70 % de los metabolitos nitrogenados son alcaloides.<sup>19</sup> Estos compuestos suelen presentar distintos tipos de actividad terapéutica, desde la

---

<sup>18</sup> Kalinin, 2021.

<sup>19</sup> Palanisamy *et al.*, 2017.

citotoxicidad o la capacidad antibiótica hasta actividades inmunosupresoras o inhibitoras de topoisomerasas y ciclina-quinasas. Los principales usos de estos productos naturales son los tratamientos anticancerígenos y antipalúdicos o antimaláricos. Sin embargo, los productos estrella de este grupo están a cargo de dos especies de ascidias, una caribeña, *Ecteinascidia turbinata*, y otra mediterránea, *Aplidium albicans*. La primera es la fuente de un alcaloide conocido como trabectedina o ecteinascidina 743, un compuesto con capacidad para inducir la apoptosis celular y que está actualmente en uso clínico para el tratamiento del sarcoma de tejidos blandos (STT) y del cáncer de ovario, con la denominación comercial de *Yondelis*®. Este fármaco fue el primer anticancerígeno de origen marino que fue comercializado y también el primero que demostró actividad antitumoral en pacientes adultos con STT que no habían respondido a otros tratamientos de quimioterapia. Por otro lado, *Aplidium albicans* produce la plitidepsina o dehidrodidemnina B, un depsipéptido cíclico con actividad antitumoral, antiviral e inmunosupresora, que es comercializado como *Aplidin*®. Actualmente, la plitidepsina está en uso clínico para el tratamiento de cánceres específicos y recientemente se ha comprobado que inhibe la proteína humana eEF1A, que se cree interacciona con varias proteínas del nuevo coronavirus SARS-CoV-2. En ensayos de laboratorio se ha comprobado que la plitidepsina posee actividad antiviral contra el coronavirus *in vitro* y también *in vivo* en un modelo de ratón.<sup>20</sup> Estos resultados podrían augurar un futuro prometedor del uso de la plitidepsina en el tratamiento de la COVID-19.

Durante los últimos años se ha empezado a conocer que algunos de los productos bioactivos obtenidos de las especies animales no habían sido sintetizados por estas, sino por sus microorganismos simbioses. Actualmente, gracias al desarrollo de diferentes técnicas de análisis molecular como la construcción de genotecas de rRNA 16S bacteriano o las técnicas de fluorescencia FISH –hibridación *in situ* fluorescente–, se ha descubierto una gran diversidad microbiana que vive en simbiosis con muchos invertebrados marinos. Se sabe que las esponjas generan en su interior un ambiente adecuado para el crecimiento de diversas especies de microorganismos como arqueobacterias, cianobacterias, microalgas, hongos y protozoos dinoflagelados, entre otros. Estos simbioses contribuyen a la nutrición de la esponja, gracias al aporte de compuestos orgánicos, como azúcares, o nitrogenados (p. ej. algunas bacterias y las zooxantelas), a la protección frente a la radiación ultravioleta (p. ej. las zooxantelas),

---

<sup>20</sup> White *et al.*, 2021.

o a la prevención del crecimiento de otros organismos epibiontes sobre esta. Un buen ejemplo de esto ha sido la desmitificación de la producción de las manzaminas por parte de algunas esponjas como *Haliclona* sp., ya que gracias a la secuenciación del rRNA 16S, se descubrió que un hongo actinomiceto simbiote era el responsable de su biosíntesis. De un modo similar, se comprobó también que algunas toxinas, como el ácido okadaico, que se habían encontrado en esponjas del género *Halichondria*, eran en realidad un metabolito producido por uno de sus simbiontes, el dinoflagelado *Prorocentrum lima*. En otros grupos, como las ascidias, de los 1000 metabolitos secundarios bioactivos que se han aislado de ellas, se calcula que aproximadamente el 8 % son producidos por sus microorganismos simbiontes.<sup>11</sup>

En los últimos años se ha empezado a estudiar la biodiversidad metagenómica marina con el objetivo de mapear la gran diversidad de productos naturales bioactivos e identificar a los organismos productores. El estudio metagenómico, junto con un cribado químico de ecofocalización, aumentaría significativamente el descubrimiento de nuevas sustancias bioactivas con potencial terapéutico o aplicación biotecnológica. Sin embargo, hasta la fecha no existen muchos estudios involucrados en la genómica de organismos marinos y su relación con la producción de compuestos bioactivos. La mayoría de estos estudios se centran en microorganismos y solo una pequeña fracción se ocupa de los macroorganismos o animales. Por lo tanto, existe un enorme potencial para el estudio de los compuestos naturales de los animales marinos y sus posibles aplicaciones al combinarlo con los estudios metagenéticos. Además, un buen conocimiento del genoma completo de las especies productoras permite la determinación del gen o los grupos de genes implicados en la biosíntesis de dichas sustancias bioactivas, aumentando así las posibilidades de encontrar y producir nuevos compuestos marinos bioactivos.

#### **IMPORTANCIA DE LOS GUSANOS MARINOS PARA EL HOMBRE Y EL ECOSISTEMA: LOS POLIQUETOS EUNICIFORMES COMO EJEMPLO**

Históricamente, los anélidos poliquetos (del griego *polús*, mucho y *khaítē*, sedas o quetas) han sido considerados como un grupo de animales invertebrados más o menos homogéneo, siendo incluidos por Linneo en 1758 en su clase Vermes, junto con otros invertebrados vermiformes. Posteriormente, Lamarck en 1818 introdujo el término *Annelida* (del latín *annellum*, anillo) para denominar al conjunto de invertebrados vermiformes con órganos exteriores (su clase

*Vers*), el cual incluía a los poliquetos (anélidos marinos), los oligoquetos (lombrices de tierra), sanguijuelas y otros grupos de invertebrados. No obstante, el grupo de los poliquetos como tal no apareció hasta la clasificación de Grube en 1850, en la que incluyó el orden *Appendiculata polychaeta*. Actualmente, el término poliqueto se considera un nombre informal y sin valor taxonómico, usado para referirse a los gusanos anélidos principalmente marinos que no tienen clitelo (excluyendo así a las lombrices de tierra y a las sanguijuelas).

Uno de los principales y más antiguos usos de los poliquetos, principalmente de las especies intermareales o submareales poco profundas de gran tamaño, es su utilización como cebo de pesca. Actualmente algunas de las especies más valoradas pertenecen al grupo de los poliquetos euniciformes, las cuales están sujetas a una importante explotación en las principales bahías y estuarios de países como España, Francia, Portugal o Italia. Son *D. neapolitana*, *D. marocensis*, *Marphysa* spp., *Lumbrineris latreilli* y *Scoletoma impatiens*.

Por otro lado, los eunícidos tropicales llamados comúnmente palolos (*Palaola viridis*), del Océano Pacífico, sirven de alimento a los habitantes indígenas de las islas de Samoa y Fiyi. En la época de su reproducción, la cual sigue una periodicidad lunar, los palolos abandonan las rocas y los arrecifes entre los que habitualmente viven y nadan hacia la superficie formando enjambres de miles de individuos reproductores. Los indígenas saben predecir su época de reproducción y aprovechan esta para pescarlos en grandes cantidades, ya que los palolos constituyen un recurso alimenticio muy importante para los habitantes de estas islas.

Las especies tubícolas que construyen sus tubos en diferentes tipos de sustratos blandos, como los onúfidos de los géneros *Diopatra* y *Onuphis*, pueden alcanzar grandes densidades en muchos hábitats y juegan un papel ecológico muy importante estabilizando el sedimento, incrementando su complejidad estructural y potenciando la biodiversidad, así como facilitando la fijación y el desarrollo de varias especies de algas. De la misma manera, las especies que construyen tubos que sobresalen del sedimento unos pocos centímetros confieren una cierta heterogeneidad al medio topográficamente plano de los alrededores, proporcionando refugios frente a la depredación y favoreciendo el asentamiento de larvas de organismos bentónicos sobre estas estructuras, aumentando la riqueza y biodiversidad de fauna bentónica.

Los poliquetos euniciformes, gracias a su aparato mandibulomaxilar perdurable, poseen un excelente registro fósil que data del Cámbrico Superior (490 M. a.), siendo, por tanto, de un gran interés paleontológico. Los euniciformes más antiguos conocidos tenían un aparato maxilar de tipo

placognato o ctenognato primitivo. Muchos de estos fósiles son piezas aisladas o fragmentos de mandíbulas o maxilas que reciben el nombre de escolecodontos. Los trabajos de algunos paleontólogos como Hints y Eriksson demostraron que los euniciformes primitivos del Ordovícico Inferior (480 M. a.) eran mucho más abundantes y diversos de lo que se pensaba anteriormente y que alcanzaron una gran diversidad entre mediados y finales del Ordovícico.

Algunas especies de euniciformes, como las del género *Ophryotrocha* (Dorvilleidae), han sido ampliamente estudiadas por sus respuestas frente a la contaminación ambiental por tóxicos o metales pesados y por su capacidad bioacumuladora de los mismos. De la misma manera, la presencia/ausencia y la abundancia de especies del género *Lumbrineris* han sido consideradas como un indicador del grado de contaminación en los sedimentos. Recientemente, los onúfidios del género *Diopatra* también están empezando a ganar importancia como especies bioindicadoras, tanto de metales pesados como de contaminación orgánica o por productos farmacéuticos (como el paracetamol) en ambientes costeros y estuarinos. Y actualmente esos últimos también se están empezando a considerar como indicadores de cambio climático en la zona intermareal. Según estudios recientes, los rangos de distribución nativa de algunas especies europeas de los géneros *Diopatra* y *Onuphis* estarían desplazando su límite septentrional más hacia el norte, como consecuencia del aumento de la temperatura. También se ha relacionado su capacidad de regeneración y supervivencia con los nuevos escenarios que vaticina el cambio climático en los hábitats costeros y estuarinos.

Finalmente, podemos concluir que muchos animales marinos y de agua dulce, incluidos aquellos de pequeño tamaño y que pasan desapercibidos para el gran público (como el caso de los gusanos poliquetos anteriormente reseñados), han contribuido y aún contribuyen hoy en día a que la vida de la especie humana sea como es. Muchos de los grandes avances y logros de la humanidad, desde sus primeros pasos tímidos como especie hasta la actual era tecnológica y globalizada (conocida para algunos autores como Antropoceno), han estado condicionados por los animales y plantas, entre los cuales los representantes acuáticos han tenido un papel sobresaliente. Sin duda, los animales han cambiado el curso de la historia humana. No solo nos han proporcionado comida, refugio, ropa y compañía, sino que también han trabajado para nosotros o incluso han luchado por nosotros en las guerras. Sin ellos, nuestra historia habría sido incierta y nuestro desarrollo como una civilización avanzada habría sido poco probable. Sin embargo, nuestra sociedad actual parece haber olvidado cuánto le debemos a los animales. Suscribo plenamente las palabras de la renombrada

filósofa Christine M. Korsgaard, cuando expresa que «la forma en que los seres humanos tratan ahora a los animales es una atrocidad moral de enormes proporciones». Espero realmente que este texto, aparte de cumplir con sus fines didácticos y divulgativos, sirva para que nos paremos un momento a reflexionar sobre el trato que le estamos dando a nuestro planeta y a los animales y plantas que lo pueblan. Es necesario que nos concienciamos realmente de los problemas más acuciantes que tenemos encima, como el cambio global y climático, la pérdida de biodiversidad, la contaminación, la sobrepesca o el maltrato animal. Solo con una conciencia colectiva y global podremos hacer frente a estos retos y amenazas, y, a pesar de lo tópico y típico de esta máxima, es conveniente recordar que el cambio comienza por uno mismo.

## REFERENCIAS

ÁVILA, Conxita: «Terpenoids in marine heterobranch molluscs», *Marine Drugs*, 18, 162, (2020), 1-38.

——— NÚÑEZ-PONS, Laura y MOLES, Juan: «From the tropics to the poles: Chemical defensive strategies in sea slugs (Mollusca: Heterobranchia)», *Chemical Ecology: The Ecological Impacts of Marine Natural Products*: Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2018, 93.

ARIAS, Andrés, SURUGIU, Victor, CARBALLEIRA, Rafael, POPA, Oana P., POPA, Luis O. y UTEVSKY, Serge: «Unravelling the Extent of Diversity within the Iberian Medicinal Leeches (Hirudinea: *Hirudo*) Using Molecules and Morphology», *Biology*, 10, 315, (2021), 1-22.

CAMPOS, Miken K. y PEÑALBA, Mauro: «La caza de la ballena. Su influencia en los usos y costumbres desde la Edad Media», *Zainak: Cuaderno de Antropología y Etnografía*, 15, (1997), 251-262.

CASTEL, Elisa: *Diccionario de signos y símbolos del antiguo Egipto*, Madrid: Alderabán, 2009.

CHRISTOPHERSEN, Carsten: «Secondary metabolites from marine bryozoans. A review», *Acta Chemica Scandinavica B*, 39, (1985), 517-529.

CUADRADO-MARTÍN, Luis Blas.: «Uso y explotación de los recursos acuáticos por el hombre premoderno: el caso de África», *Revista Atlántica-Mediterránea*, 18, (2016), 19-43.

CUNNANE, Stephen C. y STEWART, Kathlyn M.: *Human Brain Revolution. The Influence of Freshwater and Marine Food Re-sources*, New Jersey: Wiley-Blackwell, 2010.

GONZÁLEZ-SERRANO, José Luis: *Evolución histórica y situación actual de la acuicultura en el mundo y en España*, Madrid: Subdirección General Caladeros Nacionales y Acuicultura, 1998.

KALININ, Vladimir I.: «Echinoderms Metabolites: Structure, Functions, and Biomedical Perspectives», *Marine Drugs*, 19, 3, (2021), 1-4.

LONG, Byron H., CARBONI, Joan M., WASSERMAN, Arthur J, CORNELL, Laurie A., CASAZZA, Anna M., JENSEN, Paul R., LINDEL, Thomas, FENICAL, William, FAIRCHILD, Craig R.: «Eleutherobin, a Novel Cytotoxic Agent That Induces Tubulin Polymerization, Is Similar to Paclitaxel (Taxol)», *Cancer Research*, 58, 6, (1998), 1111-1115.

MITTA, Guillaume., HUBERT, Florence, NOËL, Thierry, ROCH, Philippe: «Myticin, a Novel Cysteine-Rich Antimicrobial Peptide Isolated from Haemocytes and Plasma of the Mussel *Mytilus galloprovincialis*», *European Journal of Biochemistry*, 265, 1, (1999), 71-78.

ORTEA, Jesús, VIZCAÍNO, Alberto, CARRASCO, José y ALCÁZAR, Jorge: *Recursos Pesqueros de Asturias I*, Gijón: Consejería de Comercio, Turismo y Pesca del Consejo Regional de Asturias, 1980.

PALANISAMY, Satheesh K., RAJENDRAN, Nair M., MARINO, Angela: «Natural products diversity of marine ascidians (Tunicates; Ascidiacea) and successful drugs in clinical development», *Natural Products and Bioprospecting*, 7, (2017), 1-111.

PIETRA, Francesco: *Biodiversity and Natural Product Diversity*, Londres: Elsevier, 2002.

PROKSCH, Peter, EDRADA, RuAngelie y EBEL, Ru: «Drugs from the Seas - Current Status and Microbiological Implications», *Applied Microbiology and Biotechnology*, 59, 2-3, (2022), 125-134.

RODRÍGUEZ, Fabián: *Cría rentable de ranas: manual teórico-práctico para su producción y consumo*, Buenos Aires: Ediciones Continente, 2007.

WHITE, Kris M., ROSALES, Romel, YILDIZ, Soner, KEHRER, Thomas, MIORIN, Lisa, MORENO, Elena, JANGRA, Sonia, UCCELLINI, Melissa B., RATHNASINGHE, Raveen, COUGHLAN, Lynda, MARTINEZ-ROMERO, Carles, BATRA, Jyoti, ROJC, Ajda, BOUHADDOU, Mehdi, FABIUS, Jacqueline M., OBERNIER, Kirsten, DEJOSEZ, Marion, GUILLÉN, María J., LOSADA, Alejandro, AVILÉS, Pablo, SCHOTSART, Michael, ZWAKA, Thomas, VIGNUZZI, Marco, SHOKAT, Kevan M., KROGAN, Nevan J. y GARCÍA-SASTRE, Ana: «Plitidepsin has potent preclinical efficacy against SARS-CoV-2 by targeting the host protein eEF1A», *Science*, 371, 6532, (2021), 926-931.

ZHANG, Wen, GUO, Yue-Wei y GU, Yucheng: 2006. «Secondary Metabolites from the South China Sea Invertebrates: Chemistry and Biological Activity». *Current Medicinal Chemistry*, 13, 17, (2006), 2041-2090.

ZILHÃO, J., ANGELUCCI, D. E., ARAÚJO IGREJA M., ARNOLD, L. J., BADAL, E., CALLAPEZ, P., CARDOSO, J. L., D'ERRICO, F., DAURA, J., DEMURO, M., DESCHAMPS, M., DUPONT, C., GABRIEL, S., HOFFMANN, D. L., LEGOINHA P., MATIAS, H., MONGE SOARES, A. M., NABAIS, M., PORTELA, P., QUEFFELEC, A., RODRIGUES, F. y SOUTO, P.: «Last Interglacial Iberian Neandertals as fisher-hunter-gatherers», *Science*, 367, 6485, (2020), 1-13.

## VIII. ECOLOGÍA ACUÁTICA Y SERES HUMANOS: PERSPECTIVA DIDÁCTICA

**Antonio Torralba-Burrial**

Dpto. de Ciencias de la Educación e Instituto de Recursos Naturales y  
Ordenación del Territorio (Indurot), Universidad de Oviedo

### **INTRODUCCIÓN**

El agua está ligada a la vida y a las relaciones entre los seres vivos, y entre ellos y el ambiente, paradigma de la conexión entre el medio físico y el medio biótico, sin ser a este respecto los seres humanos una excepción. De hecho, estas relaciones son bidireccionales, produciéndose interrelaciones entre el agua y el conjunto de los seres vivos, la ecología acuática, cómo esas relaciones afectan a los seres humanos y cómo estos afectan también a las interacciones ecológicas en los ecosistemas acuáticos.

A este respecto, hay que tener en cuenta que el inicio del concepto de ecología está íntimamente asociado al agua desde que fue propuesto por Ernst Haeckel (1834-1919). Zoólogo marino, identificado habitualmente con sus famosas láminas de organismos recolectados durante campañas oceanográficas, de enorme belleza y sumamente icónicas, con las que podemos acercarnos a la biodiversidad de los océanos desde perspectivas biológicas, históricas y artísticas. Haeckel planteó inicialmente el concepto de ecología para referirse al estudio de las interacciones que determinan la distribución y abundancia de los organismos en el medioambiente.

En este capítulo, comenzaremos repasando la importancia del agua como medio en el que se pueden encontrar la mayoría de los grandes grupos de seres vivos. Continuaremos con conceptos claves desde la perspectiva educativa para comprender las relaciones entre el agua y la distribución de la biodiversidad: el ciclo natural del agua, las cuencas hidrográficas, el río como un continuo y los corredores fluviales, que son revisados desde la perspectiva de sus valores naturales (biodiversidad), su importancia cultural, los servicios ecosistémicos que proporcionan a las personas, y cómo las personas modificamos el ciclo del agua, la biodiversidad que albergan los medios acuáticos y la potencialidad de los Objetivos de Desarrollo Sostenible para revertir la situación actual. Todo ello para proporcionar algunas orientaciones didácticas para el tratamiento del agua y nuestras interacciones con los medios acuáticos en el marco de la Gran Historia.

#### EL AGUA Y LA DISTRIBUCIÓN DE LA BIODIVERSIDAD

A la hora de hablar de la distribución de los organismos, debemos tener en cuenta su número e identidad, la biodiversidad existente. Hay descritas alrededor de 1,5 millones de especies actuales, que podemos clasificar en 93 grandes grupos,<sup>1</sup> denominados *filo* en el caso de animales y protozoos y *filo* o *división* en el caso de plantas, hongos, algas y similares. Ese concepto de filo, por cierto, fue también definido por Haeckel, como *planes básicos de organización*, siendo categoría taxonómica. Actualmente, alrededor de la mitad de las especies descritas son insectos (dentro del filo de los artrópodos), y otra quinta parte pertenecen a otros grupos de invertebrados. Las plantas representarían solo un poco más de la sexta parte y el filo de los cordados, el grupo en el que nos encontramos los mamíferos, junto con aves o anfibios, representa alrededor del 3 % de las especies descritas. No obstante, si atendemos a estimaciones de las especies existentes, aunque no hayan sido descritas, apenas representaríamos el uno por ciento.<sup>2</sup>

En cómo están distribuidos estos organismos influye, y mucho, el agua. De acuerdo con el tipo de ambiente en el que se encuentran en relación con el agua, podemos observar que la mayoría de los grupos están presentes en ambientes acuáticos (81 filos, 40 exclusivos) frente a terrestres (54 filos, 13 exclusivos).<sup>3</sup> Dentro de los ambientes acuáticos, 21 son exclusivos de los marinos (de los 65 presentes en estos ambientes), mientras que solo 4 lo son de

---

<sup>1</sup> Ruggiero *et al.*, 2015.

<sup>2</sup> Ruggiero *et al.*, 2015.

<sup>3</sup> Moss, 2010.

los continentales (de los 60 presentes).<sup>4</sup> Y eso, teniendo en cuenta que las aguas continentales representan menos del 1 % del agua presente en la Tierra.

### CICLO NATURAL DEL AGUA

Estos ambientes acuáticos van a depender del ciclo natural del agua, cuyas moléculas pasan por distintos estados, lugares y procesos: evaporación desde los océanos, lagos o evapotranspiración de la vegetación, condensación en la atmósfera formando nubes, que luego descargarán precipitaciones sobre océanos y continentes. Aquellas que hayan descargado, sin evaporar directamente, sobre la tierra y montañas se moverán a través de escorrentía superficial y llegarán a los ríos, o se infiltrarán en el terreno. El agua, directamente de esta escorrentía superficial, y en gran parte a través de los acuíferos, podrá discurrir por dichos ríos hasta llegar a lagos y mares. En este planteamiento muy simplificado se recogerían los cambios de estado y desplazamientos principales del ciclo del agua.<sup>5</sup> No obstante, no ahondaremos sobre el ciclo del agua y su tratamiento educativo, puesto que, siendo un tema básico en la educación primaria, existen numerosos trabajos sobre las ideas previas del alumnado, cuestiones para tener en cuenta desde distintas perspectivas, actividades y recursos didácticos para trabajarlo.<sup>6</sup>

### CUENCAS HIDROGRÁFICAS Y CORREDORES FLUVIALES

Centraremos este capítulo en las aguas dulces, puesto que existe otro basado específicamente en animales marinos.<sup>7</sup> En estas aguas continentales, ríos, lagos y aguas subterráneas, habría descritas unas 125 000 especies, un 80 % de ellas insectos.<sup>8</sup> Nos vamos a acercar a las aguas dulces a partir del concepto de cuenca hidrográfica, definida como el ámbito territorial, limitado por el relieve, que vierte sus aguas en un único punto, que, generalmente, desemboca en el mar. Toda cuenca hidrográfica posee una red fluvial que confluye en un cauce común. Cada cuenca tiene, por tanto, entidad y consideración unitaria, si bien puede estar compuesta por subcuencas. Hay cuencas enormes, como aquellas que podemos ver en América (con los casi 6 millones de km<sup>2</sup> de la cuenca del Amazonas), África (más de 3 millones de km<sup>2</sup> la del Congo y la del Nilo) o Asia

---

<sup>4</sup> *Idem.*

<sup>5</sup> De Miguel *et al.*, 2009; Díez, 2017; Hernández Arnedo, 2014.

<sup>6</sup> Díez, 2017.

<sup>7</sup> Arias Rodríguez, 2022.

<sup>8</sup> Balian *et al.*, 2008.

(casi 3 millones la del Obi o 2,5 la del Yeniséi), que comparten continente con otras de menor tamaño. En el caso de Europa, las mayores cuencas son menores que las mayores de hemos nombrado en los otros continentes. En Europa, encontramos las mayores en el centro de Europa (casi 800 000 km<sup>2</sup> la mayor, la del río Danubio), y más pequeñas en las penínsulas (Helénica, Itálica, Ibérica). Dentro de la península ibérica, vemos también diferencias de extensión importantes entre las mayores, como Duero (97 000 km<sup>2</sup>), Ebro (85 550 km<sup>2</sup>) o Tajo (casi 78 500 km<sup>2</sup>), y más pequeñas en la cornisa cantábrica, con ríos de pequeño recorrido entre la cordillera y el mar Cantábrico (la mayor de estas, la asturiana cuenca del Nalón, no llega a los 4900 km<sup>2</sup>).

Estas cuencas hidrográficas, determinadas en sus límites por las vertientes de las elevaciones montañosas, representan territorios de unión, tanto para la biodiversidad como para los seres humanos. Es en el nivel de cuenca hidrográfica donde esas relaciones son más intensas. Son las unidades naturales de planificación territorial. Los grandes ríos dan forma a parte de su territorio, a sus paisajes, a los espacios donde se producen fenómenos de especiación y sustitución de especies y se van desarrollando las sociedades, pueden ser empleados como ejes para un aprendizaje global siguiendo la perspectiva de la Gran Historia.<sup>9</sup>

La red de drenaje de estas cuencas hidrográficas está relacionada con las funciones de corredores fluviales que ejercen los ríos. En efecto, algo que caracteriza a los ríos es que fluyen, conectando poblaciones, especies, nutrientes, agua y sedimentos entre distintas zonas de esas cuencas hidrográficas. Y esas relaciones generalmente siguen el sentido de la corriente, por lo menos en lo que se refiere a sedimentos y nutrientes, así como a gran parte de organismos que bajan con la deriva (con independencia de que se produzcan aportes de nutrientes y materia orgánica en el sentido contrario, por organismos que migran contracorriente, ya sea por dentro o fuera del agua). Fijándonos en las condiciones hidrogeológicas y biológicas de un río, se puede observar que se da un continuo de condiciones ambientales cambiantes, comprendidas en el concepto de río continuo (*River Continuum Concept*).<sup>10</sup> En ese marco conceptual, las variables físicas dentro de un río presentan un gradiente continuo de condiciones físicas que acaban determinando la estructura de las comunidades biológicas presentes en los distintos tramos. Así, dentro de la red hidrográfica, podríamos distinguir entre los arroyos de cabecera, los tramos medios y los tramos bajos de los grandes ríos.

---

<sup>9</sup> Alvarez, 2016; García-Moreno *et al.*, 2019.

<sup>10</sup> Vannote *et al.*, 1980.

1) Arroyos de cabecera: estrechos, con escasa producción de materia orgánica en el interior del cauce del río, muy inferior en todo caso a la que entra en el agua proveniente de los bosques de ribera o vegetación aledaña. Esto determina que la mayor parte de esa materia orgánica esté compuesta por hojas y restos vegetales (materia orgánica particulada de gran tamaño). Por tanto, los procesos dominantes para la materia orgánica son la acumulación, procesado y transporte. Esto da lugar a unas comunidades de invertebrados acuáticos en las que los fragmentadores (tricópteros, leúctridos) y los recolectores (p. ej., larvas de simúlidos) dominan, siendo más escasos los ramoneadores. Entre estos ramoneadores podemos destacar a algunas larvas de tricópteros que construyen estuches con piedrecitas adheridos a piedras en el cauce, lo que reduce las posibilidades de ser arrastrados por la relativamente fuerte corriente y las de ser depredados. Los predadores, que representan un porcentaje bajo en todos los tramos, serían aquí numéricamente similares a ramoneadores, siendo representados por larvas de plecópteros, como los pérlidos, y de algunos tricópteros, como las riacofilas.

2) Tramos de anchura mediana: conforme descendemos por el río, se va incrementando la anchura del cauce, en el que, como mínimo, la zona central ya no está cubierta por el dosel arbóreo, permitiendo la llegada de luz al lecho y el crecimiento de algas (en gran parte diatomeas) sobre las rocas y de plantas (macrófitos vasculares). De hecho, lo que predomina es esa producción primaria por algas y macrófitos acuáticos (como los ranúnculos acuáticos), frente a la incorporación de materia orgánica desde el bosque y vegetación circundantes. Se va incrementando la materia orgánica particulada fina, en suspensión en el agua fluyente. Entre los macroinvertebrados, se incrementan los ramoneadores (caracoles, efémeras, algunos grupos de tricópteros), mientras que disminuyen porcentualmente los fragmentadores (gammáridos, típulas). Los colectores mantienen su amplia representación, ejemplificados aquí por diversas efémeras o por tricópteros como los hidrosíquidos, que tejen redes para recolectar su alimento, esa materia orgánica particulada fina que va incrementando su disponibilidad.

3) Tramos bajos, anchos, de ríos de cierta entidad: el agua se mueve a menor velocidad, con menos zonas de rápidos, el cauce permanece soleado en su mayor parte, determinando ambas características la presencia de comunidades fitoplactónicas (productoras) y zooplantónicas (filtradores sobre todo, como copépodos y cladóceros). Las aguas son menos transparentes, predominando elevada turbidez, disminuyendo la producción primaria en el lecho del río.

Domina el consumo y, en el conjunto de macroinvertebrados, predominan los colectores (náyades, anélidos, hidrosíquidos) sobre el resto de los grupos. El río, llegado a este punto, discurre por amplias vegas, fertilizándolas con nutrientes y sedimentos durante las crecidas.

Este esquema general puede cambiar de acuerdo con las circunstancias concretas de cada tramo. Así, afluentes de menor orden que vayan incorporándose al río principal proporcionarán un incremento de la materia orgánica que proviene del bosque de ribera y vegetación adyacente, en forma de materia particulada tanto gruesa como fina. Perturbaciones de los sedimentos y nutrientes que transporta el río, bien por disminución (debido por ejemplo a presas) o por incremento (debido a un aporte de fertilizantes agrícolas) pueden alejar también las comunidades reales de este esquema de río continuo.

Pero lo cierto es que, pese a esas diferencias con la realidad, el concepto de río continuo puede ser considerado como un marco de trabajo en el que ir integrando el estudio de la ecología de las aguas dulces. Además, en él aparece ya manifestado que, para comprender la ecología de un río, no es posible limitarse al cauce por el que discurre el agua superficial, sino que hay que tener en cuenta también lo que ocurre en sus orillas, en las riberas y llanuras de inundación en su conjunto, atendiendo a esos intercambios de materia (que se traducen en animales y plantas, en agua, en nutrientes y en sedimentos) entre ambos ambientes. De hecho, tampoco hay que obviar las actuaciones que ocurren a nivel de cuenca hidrográfica. Por tanto, es la entrada necesaria para avanzar hacia el concepto de corredor fluvial, que también incorpora cuestiones vistas en la cuenca hidrográfica y la relación con la humanidad.

El concepto de corredor fluvial, por tanto, no se limita al cauce mojado del río en estiaje, sino que abarca el conjunto del territorio fluvial, incluyendo la vegetación de ribera y el espacio que ocupan las aguas durante las crecidas, junto con la cubierta vegetal asociada. El corredor fluvial, considerado mediante esta visión holística, presenta distintas funciones y servicios ecosistémicos, funcionando no solo desde la perspectiva de suministro de agua, sino representando un papel clave como reservorio de la biodiversidad, posibilitador de la movilidad de las especies, conector de territorios y ecosistemas (no solo de los acuáticos) y distribuidor claro de sedimentos y nutrientes a tramos bajos, vegas, estuarios y costa.

Como reservorio de biodiversidad, en los corredores fluviales se encuentra una diversidad de ecosistemas, asociados en mayor o menor medida precisamente al agua. Así, además de las aguas libres y corrientes caracterizadas en el

concepto de río continuo, sus orillas presentan bosques de ribera, de amplitud y composición específica variable según el tramo en el que se encuentren, la potencialidad del suelo y los usos humanos de esos espacios. Algo más separados del cauce podríamos tener otros bosques naturales adyacentes (p. ej. robledales). En zonas con vegas algo más amplias, se pueden encontrar charcas o medios estancados que dependen de las crecidas del río y de las aguas subterráneas para su mantenimiento. Conforme seguimos descendiendo en el río, en el ámbito de las aguas de transición entre el continente y el mar llegamos a las zonas fluvio-estuarinas y estuarinas, que pueden generar rías de amplitud variable según el tamaño del río y su cuenca hidrográfica. Varios de estos hábitats presentes en los corredores fluviales son hábitats de interés comunitario, recogidos como tales en la legislación europea (Directiva 92/43/CEE) para su conservación (Tabla 1).

**Tabla 1.** Tipos de hábitats de interés comunitario asociados a corredores fluviales en la península ibérica.

<b>Categoría</b>	<b>Tipos de hábitat</b>
11 Hábitats costeros y medios de marea	1130 Estuarios
13 Marismas y pastizales salinos atlánticos y continentales	1310, 1320, 1330
14 Marismas y pastizales salinos mediterráneos y termoatlánticos	1410, 1420, 1430
31 Aguas estancadas	3110, 3140, 3150, 3160, 3170*
32 Aguas corrientes –tramos de cursos de agua con dinámica natural y seminatural (lechos menores, medios y mayores)– en los que la calidad del agua no presenta alteraciones significativas	3220, 3230, 3240, 3250, 3260, 3270, 3280, 3290
64 Prados húmedos seminaturales de hierbas altas	6410, 6420, 6430

71 Turberas ácidas de esfagnos	7110*, 7130*, 7140, 7150
72 Áreas pantanosas calcáreas	7210*, 7220*, 7230, 7240*
91 Bosques de la Europa templada	9160, 91B0, 91E0*
92 Bosques mediterráneos caducifolios	9230, 92A0, 92B0, 92D0

\* Hábitats prioritarios (extraídos a partir de <sup>11</sup>)

En estos hábitats viven numerosas especies amenazadas de animales (nutrias, mirlos acuáticos, martines pescadores, libélulas como *Macromia* y *Oxygastra*, anfibios, náyades, peces). Varias de esas especies, además de residir en un determinado tramo, lo emplean necesariamente en sus migraciones, ya sea en el interior del corredor fluvial, ya para residir una fase de su vida en él y otra en los mares, ya como lugar para pasar una parte del año. Así, peces tan característicos y con tanta importancia social, cultural y económica como el salmón, la lamprea o la anguila pasan una fase de su ciclo vital en el corredor fluvial (los dos primeros reproduciéndose en el río, la última creciendo y madurando en el río). En otros casos, como los de muchas aves limícolas y otras acuáticas, llegan a finales del otoño a las rías, para pasarlo ahí o como escala en su viaje migratorio. De hecho, los hábitats de los estuarios albergan una enorme biodiversidad, que comporta importancia cultural y de servicios ecosistémicos.<sup>12</sup>

#### IMPORTANCIA CULTURAL DE LA ECOLOGÍA ACUÁTICA

Pero los corredores fluviales no solo resultan de importancia para la biodiversidad, sino también para la humanidad. A ese respecto, las grandes civilizaciones evolucionaron en los valles de los grandes ríos (Tigris, Éufrates, Nilo, Indo, Yangtsé, Amarillo), que en sus amplias y fértiles vegas favorecieron la agricultura.<sup>13</sup> Fruto de esta importancia para los seres humanos, se encuentra un importante patrimonio cultural asociado, tanto material como inmaterial. Así, son numerosos los molinos y otros ingenios hidráulicos empleados especialmente en el pasado para moler cereales o lavar la ropa, así como pasos en los

<sup>11</sup> Bartolomé *et al.*, 2005.

<sup>12</sup> Basset *et al.*, 2013.

<sup>13</sup> Benjamin, 2016.

vados, barcas y restos de infraestructuras dedicadas a la captura de diversos peces. Esta unión del medio natural y del cultural en los mismos elementos convierte a este patrimonio en recursos didácticos adecuados para interrelacionar ambos medios, y, por tanto, puede ser base de secuencias didácticas orientadas desde la Gran Historia.

Además, esta importancia cultural queda también asociada, y puede ser trabajada desde aspectos tan variados como la mitología, la poesía o la pintura. Así, en cierto modo equivalentes, aunque con sus particularidades, a las náyades acuáticas griegas, las sumpall mapuches o las nixes alemanas, en la zona cantábrica se encuentran leyendas sobre seres mitológicos que habitan estos corredores fluviales: las xanas asturianas, las anjanas cántabras, las xacias gallegas o las lamias vascas serían sus representantes. Con cuerpo de pez y torso humano, han dado lugar a numerosas leyendas, que perviven todavía oralmente y en forma de topónimos asociados a los corredores fluviales. En algunos casos, quedan integradas en la identidad de las poblaciones locales, como las lamias que caracterizan los escudos de las casas del valle navarro de Baztán.

Respecto a referencias en la poesía, podemos buscar poetas cercanos al entorno cultural en el que nos encontremos, con los que afianzar esta relación del medio natural y el cultural. A fin de cuentas, los ríos conforman ese patrimonio cultural común, son reflejados de muchas maneras, algunas referidas a su ecología, otras a su disfrute, y, otras veces, a la nostalgia de perdernos el visitarlos. Así podríamos recurrir, entre otras, a las referencias a los bosques de ribera en Federico García Lorca (*Las alamedas se van, pero dejan su reflejo*), Antonio Machado (*No será, cual los álamos cantores | que guardan el camino y la ribera, | habitado de pardos ruiseñores*) o Juan Ramón Jiménez (*Río encantado; las ramas | soñolientas de los sauces, | en los remansos dormidos | besan los claros cristales*). También a ese recuerdo y deseo de estar en ellos, como el emigrante de Rosalía de Castro que se despide de ellos al marcharse (*Adiós ríos; adiós, fontes; adiós regatos pequeños*) o como Marcos Ana, que pide que se los recuerden desde la prisión (*contadme el canto de un río cuando se cubre de pájaros*). Y, también desde una óptica de defensa del patrimonio natural, abanderar con poesía la lucha contra su contaminación, como Gloria Fuertes (*Que los hombres no manchen los ríos. | Que los hombres no manchen el mar*).

Y esta importancia en las manifestaciones culturales viene derivada precisamente del uso que los seres humanos hemos realizado de los corredores fluviales y los ríos. Esto es, de los servicios ecosistémicos que nos reportan, desde aquellos de abastecimiento (no solo de agua, que es el primero que

suele venir a la cabeza, sino también de energía, como hemos visto en el caso de los molinos y las centrales hidroeléctricas, de madera y alimentos), regulación (depuración, ciclo del agua, fijación de carbono, amortiguación de las inundaciones, vivero de especies) o culturales (ocio de proximidad, deporte en la naturaleza, turismo, observación naturalística, educación ambiental). Los ríos son, por tanto, una buena muestra de cómo la pequeña gran historia del agua conecta la Tierra, la vida y la humanidad en diferentes escalas espaciales y temporales.

### **LA HUMANIDAD MODIFICA EL CICLO DEL AGUA...**

Pero no solo el ciclo del agua y su circulación superficial y freática determinan estos servicios ecosistémicos. Como hemos visto, los seres humanos realizan una gran cantidad de actividades dentro de los corredores fluviales y en el conjunto de la cuenca de drenaje. Los seres humanos están interactuando con ese ciclo de agua natural que habíamos visto al principio. Tenemos lugares en estos corredores fluviales donde se han colocado presas que embalsan el agua, y lugares a donde se lleva esta agua para emplearla, por ejemplo, como agua de boca en las ciudades, o en la generación de energía en las centrales hidroeléctricas o para la refrigeración de otras centrales eléctricas (térmicas, nucleares). No obstante, la mayor parte del agua empleada por los seres humanos, al menos en el caso ibérico, lo es para el riego de cultivos, incorporada por tanto a esos alimentos, o evapotranspirada a partir de esas plantas. Esto es, los seres humanos están insertos ya en el ciclo del agua, modificándolo.

Esta capacidad de la humanidad para modificar el ciclo del agua es una de las cuestiones que suele tardar en incorporar a su conocimiento el alumnado, manteniéndose como idea previa alternativa a lo largo de las etapas educativas.<sup>14</sup> Es habitual la falta de énfasis en gran parte de los libros de texto escolares, y especialmente en los diagramas del ciclo del agua, sobre la medida en la que los seres humanos modifican dicho ciclo. En un reciente análisis, Abbott y colaboradores<sup>15</sup> encontraron que, pese a que la apropiación humana del agua dulce equivale a cerca de la mitad de la descarga global de los ríos, solo el 15 % de los diagramas sobre el ciclo del agua explicitaban la interacción humana con el agua. Y eso desde una perspectiva de cantidad de agua, no de calidad, que es todavía menos incluida en los diagramas. Insistir en estas cuestiones resultaría

---

<sup>14</sup> De Miguel *et al.*, 2009.

<sup>15</sup> Abbott *et al.*, 2019.

clave, dada la escasa atención que han recibido en las investigaciones didácticas relacionadas con el agua en las distintas etapas educativas.<sup>16</sup>

Para poner en perspectiva esta nueva situación de interrelación entre la humanidad y el agua, hay que tener en cuenta que estas presiones que hemos visto producidas por los seres humanos se están incrementando a gran velocidad. Es lo que Steffen y colaboradores<sup>17</sup> han venido en llamar *la gran aceleración*, observándose desde los años 50 del pasado siglo. Como consideración, resulta fácilmente encajable en el marco conceptual de la Gran Historia, puesto que une la visión de los ámbitos socioeconómico y biofísico del sistema Tierra en un análisis conjunto de la situación. En efecto, se ha producido una aceleración de una magnitud no comparable a ningún momento pasado en cambios socioeconómicos claves, algunos de los cuales están directamente relacionados con las presiones comentadas sobre las aguas (población global, población urbana, uso primario de la energía, construcción de grandes presas, consumo de fertilizantes y uso del agua). Se ha detectado igualmente una aceleración muy significativa en el ámbito biofísico al mismo tiempo, estando casi todos esos cambios relacionados con el agua, desde el incremento de gases de efecto invernadero en la atmósfera al aumento de la temperatura en la superficie, la acidificación de los océanos, las capturas de peces marinos y la acuicultura marina (Tabla 2).

Estos cambios ocasionados por los seres humanos en los sistemas socioeconómicos han generado alteraciones en los sistemas biofísicos y una serie de tendencias muy preocupantes en todo el sistema Tierra que afectan al agua. De hecho, en 2020, más de 11 000 científicos de todo el mundo, organizados por Ripple y colaboradores,<sup>18</sup> firmaron un segundo aviso a la humanidad sobre la emergencia climática en la que nos encontramos, listando, entre otras, tendencias de respuestas climáticas con afección directa al agua (concentración de gases de efecto invernadero y cambio de temperatura en la superficie, mínima extensión del hielo polar en Groenlandia y en la Antártida, calor contenido en el océano y su acidificación, subida del nivel del mar y frecuencia de eventos climáticos extremos) (Tabla 2). Los cambios presentan tanta magnitud, de hecho, que diversos autores consideran que estaríamos ante un nuevo periodo, el

---

<sup>16</sup> Ramírez-Segado *et al.*, 2021.

<sup>17</sup> Steffen *et al.*, 2015.

<sup>18</sup> *Idem.*

Antropoceno,<sup>19</sup> en el cual los seres humanos tienen una influencia decisiva en el estado, la dinámica y el futuro del sistema Tierra.<sup>20</sup>

**Tabla 2.** Aceleración en variables relacionadas con el agua de los sistemas socioeconómicos y biofísicos del sistema Tierra, incluyendo tendencias climáticas. (Todas las variables indican incremento, salvo las referencias a la extensión del hielo, que disminuyen).

Ámbito socioeconómico <sup>21</sup>	Ámbito biofísico <sup>21</sup>	Tendencias climáticas <sup>22</sup>
Población global Población urbana Uso primario de la energía Construcción de grandes presas Consumo de fertilizantes Uso del agua	Concentración gases efecto invernadero (CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> ) Temperatura superficie Acidificación océanos	
	Capturas peces marinos Acuicultura camarones	Hielo ártico Hielo en Groenlandia Hielo en la Antártida Calor contenido en el océano Cambio nivel del mar Eventos climáticos extremos

Una vez entendida la capacidad que ha alcanzado la especie humana para cambiar los parámetros del sistema Tierra, resulta más sencillo interiorizar cómo los seres humanos están cambiando el ciclo del agua con su interacción. Las vías principales en las que lo modificamos, y que suelen ser obviadas, representan la alteración de los ríos, reteniendo, desviando y consumiendo el agua (para la industria, la agricultura o, en menor medida, para agua de boca), que se traducen en el secado de lagos, zonas húmedas e incremento de la temporalidad de los ríos cuyos caudales se desvían, así como disminución del agua

<sup>19</sup> Crutzen, 2002

<sup>20</sup> Steffen *et al.*, 2015.

<sup>21</sup> Steffen, *et al.*, 2015.

<sup>22</sup> Ripple *et al.*, 2020.

renovable de los acuíferos; los cambios en el uso del suelo que afectan tanto al uso del agua (para riego en agricultura, con la evapotranspiración asociada a los cultivos) como a su capacidad de infiltración en el suelo (eliminación de bosques y turberas, impermeabilización del sustrato) o a la escorrentía; y la devolución de parte de esa agua contaminada a través de los efluentes (en lugares concretos o de forma difusa) y que afecta tanto a las aguas superficiales como a las subterráneas.<sup>23</sup>

### ... TRASLOCA ESPECIES...

Como presión añadida sobre esos ecosistemas, los seres humanos estamos homogenizando la biodiversidad de los ecosistemas acuáticos, por expansión de especies exóticas y exóticas invasoras, tanto en los ambientes marinos<sup>24</sup> como continentales.<sup>25</sup> Esta presión se incrementa sin parar, detectándose nuevas poblaciones y especies introducidas en los ecosistemas acuáticos constantemente. Una revisión pormenorizada realizada en 2019 registraba 125 especies animales introducidas en las aguas continentales ibéricas (más 24 inciertas en cuanto a su estatus),<sup>26</sup> mientras que la lista actualizada identifica 200 especies introducidas entre animales, plantas, macroalgas y hongos (más 106 inciertos).<sup>27</sup> Estas introducciones de especies pueden tener varios orígenes: las realizadas intencionadamente con objetivos lúdicos (caso habitual en peces introducidos y expandidos para la pesca recreativa), en ocasiones combinadas con la perspectiva de obtención de ingresos (peces, cangrejos, árboles), liberaciones y escapes de especies mantenidas en cautividad o jardines (peces, cangrejos, invertebrados, y bastantes plantas de interés ornamental, que acaban expandiéndose en el medio natural), escapes y liberaciones de animales criados en granjas (peces, visones americanos, coipus), introducciones intencionadas en el medio natural buscando alguna característica concreta de la especie (gambusias como controladoras de mosquitos, plumeros de la Pampa para fijar el terreno en taludes), o introducciones accidentales derivadas del transporte internacional de mercancías o de personas (invertebrados asociados a las aguas de lastre o adheridos

---

<sup>23</sup> Abbott *et al.*, 2019.

<sup>24</sup> Magurran, *et al.*, 2015.

<sup>25</sup> Rahel, 2002.

<sup>26</sup> Muñoz-Mas y García-Berthou, 2020.

<sup>27</sup> Oliva-Paterna *et al.*, 2021.

en transportes, ropas y materiales, o que viajan en otros bienes, animales o plantas que son transportados) (Figura 1).

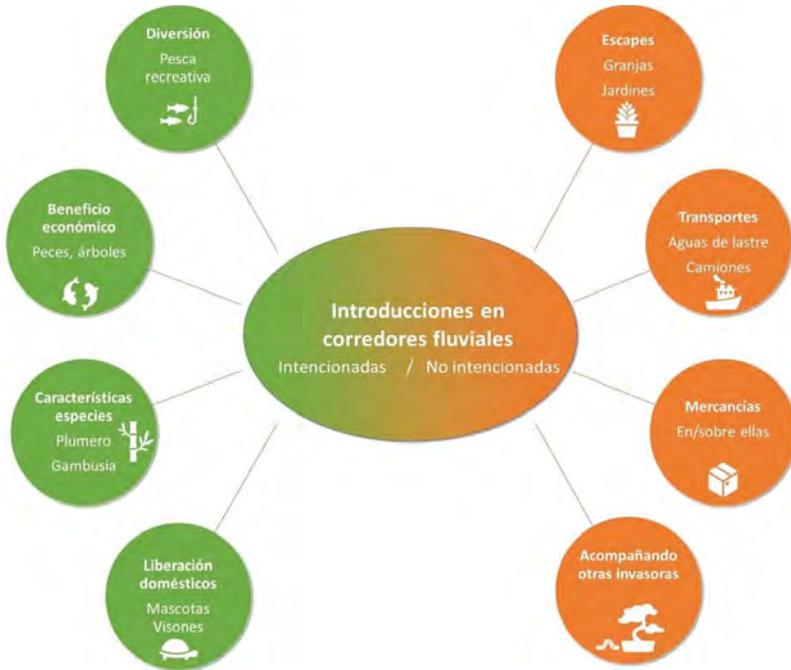


Figura 1. Principales vías de introducción de especies alóctonas en los corredores fluviales.

### ... AFECTA A LA CALIDAD DEL AGUA...

El concepto de contaminación y de calidad de las aguas cambia con el tiempo, dependiendo de actitudes, costumbres, conocimientos y modas.<sup>28</sup> Y seguir los cambios de este concepto a lo largo de la historia muestra cómo se ha desplazado desde valoraciones similares, asociadas a las posibilidades de ingerirla y emplearla en la cocina, a aquellas más recientes en función de otros aprovechamientos dependientes de su biodiversidad y, finalmente, de la capacidad de sustentar los ecosistemas que le son propios.<sup>29</sup> Así, valorando únicamente su utilización como agua de boca, en su *Historia Natural*, Plinio el Viejo (siglo I)

<sup>28</sup> Margalef, 1983.

<sup>29</sup> Torralba-Burrial, 2009.

considera que son aguas de buena calidad aquellas que carecen de olor y sabor, que no tarden en cocer legumbres y no dejen tierra<sup>30</sup> (lo que traduciríamos hoy en día con la indicación de que presenten pocos carbonatos y sólidos en suspensión). Similar criterio de calidad y de evaluación se mantuvo durante bastante tiempo (p. ej., Bowles en el siglo XVIII),<sup>31</sup> modificándose parcialmente con el auge de los balnearios y sus aguas supuestamente medicinales un siglo después (p. ej., Alvarado y de la Pena).<sup>32</sup>

Esta consideración de la calidad de las aguas, y de los factores que la empeoran genera una legislación destinada a protegerla. La Ley de Aguas española de 1866 ya indicaba la necesidad de evitar comunicar a las aguas sustancias y propiedades nocivas, para la salubridad o la vegetación, desde establecimientos industriales, limitando por tanto la posibilidad de vertidos. En 1900 se prohibía por Real Decreto enturbiar e infectar aguas públicas, así como el aterramiento de cauces por lavado de minerales o residuos de fábricas (aunque su puesta en práctica no fue tan tajante, como pudo comprobarse durante gran parte del siglo XX en las cuencas mineras de Asturias, por ejemplo).

En el primer cuarto del siglo XX se planteaba, en el proyecto de ley sobre *Aguas potables, su protección y alimentación*, la prohibición de arrojar a aguas corrientes sustancias que pudieran contaminarlas o hacerlas impropias para necesidades domésticas o del ganado, incluyendo también en la prohibición el vertido directo a los pozos usados para beber y las aguas subterráneas, que no podrían verse afectadas por filtraciones desde fosos sépticos. La principal causa de contaminación del agua en aquel momento eran los vertidos de aguas residuales no tratadas. El tratamiento en los medios de comunicación de la época indica que esta cuestión era una necesidad socialmente reconocida y asumida, dentro de las consideraciones de lo que hoy denominaríamos salud ambiental.<sup>33</sup> No obstante, no llegó a emitirse dictamen antes de que finalizara la legislatura, si bien se adoptaron ordenanzas sobre las fosas sépticas y su vertido o filtración a las aguas (Real Orden de 22 de abril 1922).

A mediados del siglo XX se introduce legislación que tiene en consideración la calidad de las aguas necesaria, no solo para uso de boca, para la ganadería o para riego, sino también para los peces que habitaban los ríos. Ya existían normas que prohibían echar sustancias o vegetales machacados para matar o

---

<sup>30</sup> Plinio II, C. «El Viejo», Siglo I.

<sup>31</sup> Bowles, 1789.

<sup>32</sup> Alvarado y de la Pena 1832.

<sup>33</sup> Fernández, 2001.

adormecer a los peces y facilitar a así su captura desde el siglo XII, pero es ahora cuando se incluyen también los residuos vertidos sin la intención de capturar los peces. No obstante, no se valora esa falta de calidad como una posible afección al ecosistema acuático como tal, sino al servicio ecosistémico de la pesca (Ley de 20 de febrero de 1942, que precisamente lleva por título *por la que se regula el fomento y conservación de la pesca fluvial*).<sup>34</sup>

Así, el criterio habitual para considerar un agua de buena calidad ha seguido siendo su posibilidad de aprovechamiento como agua de boca hasta recientemente (de hecho, los planes hidrológicos de finales del siglo pasado era lo que consideraban, atendiendo a los procesos que era necesario acometer para para que fuera potable). En este caso, algunas de las interacciones entre los seres humanos y el agua generan un empeoramiento de su calidad. Así, la contaminación con materia orgánica o con compuestos químicos afecta directamente a nuestra capacidad para disponer de esa agua.

El incremento de la materia orgánica de un río puede provenir de dos fuentes principales: incremento directo de esa materia orgánica o incremento indirecto, al incrementar los nutrientes. El primer caso sería, por ejemplo, el de los vertidos urbanos sin depurar o con depuración insuficiente, incluidos los de instalaciones industriales como los mataderos, que provocan la entrada en el ecosistema acuático de una gran cantidad de materia orgánica. En la península ibérica y otros países europeos, gracias precisamente a la legislación de la Unión Europea, la inmensa mayoría de las poblaciones de tamaño grande y mediano depuran las aguas antes de devolverlas al medio natural. No obstante, todavía existen algunas que envían parte de esos residuos mediante emisarios submarinos sin tratar al mar, y zonas de urbanización dispersa y poblaciones de menor tamaño cuyos efluentes llegan a los ríos o a los acuíferos. Algo más comunes en la actualidad ibérica son los vertidos difusos agroganaderos, ya sean fertilizantes nitrogenados químicos o purines de las explotaciones ganaderas, que acaban por escorrentía superficial en ríos y lagos o, de forma más habitual en la región mediterránea, alcanzando los acuíferos. Generan eutrofización, debido a ese exceso antrópico de nutrientes, lo que acaba acarreado una disminución del oxígeno disponible en el medio acuático. Otros vertidos urbanos que generaban indirectamente un incremento de la materia orgánica, los derivados de jabones con fosfatos, se han visto reducidos por su prohibición a nivel europeo.

---

<sup>34</sup> Ley de 20 de febrero de 1942 por la que se regula el fomento y conservación de la pesca fluvial. *Boletín Oficial del Estado*, núm. 67, de 8 de marzo de 1942, 1681-1694.

Entre la contaminación química se puede destacar la derivada de pesticidas (insecticidas, herbicidas, fungicidas), tanto cuando son empleados en agricultura sin las debidas cautelas como durante su producción, en el caso de que los vertidos lleguen a las aguas. Pueden tener tanto un efecto directo sobre las personas al beber el agua (dependiendo del compuesto y concentración) como un efecto indirecto por comer animales acuáticos (como los peces), especialmente cuando se producen efectos de bioacumulación y biomagnificación (al igual que algunos semimetales y metales pesados). Precisamente fue en los ecosistemas acuáticos donde surgieron las alarmas por los efectos de la bioacumulación. En los años 50 del pasado siglo apareció un brote de una enfermedad neurológica en la ciudad japonesa de Minamata, que se denominó *enfermedad de Minamata* y que consistió en un envenenamiento por mercurio. Ese mercurio provenía de los vertidos de una fábrica química local, que llegaban desde el río al mar, donde se bioacumulaban en peces y marisco que posteriormente eran ingeridos por la gente. Del medio centenar de muertes del brote agudo, se pasó a un incremento crónico, habiendo sido diagnosticados más de dos mil casos, la mitad de los cuales murieron por la enfermedad.<sup>35</sup> El convenio internacional para limitar el mercurio, llamado precisamente *Convenio de Minamata*, se aprobó en 2013, mostrando la rapidez de actuación de las administraciones internacionales ante la contaminación química. Sin darse esas circunstancias, hay limitaciones en las recomendaciones de ingesta de peces marinos de gran tamaño (como el atún o el pez espada), especialmente en niños y embarazadas, sin problemas en consumos moderados.

Hay que tener en cuenta que este tipo de compuestos pueden encontrarse en el agua en una concentración que resulte inofensiva, o por lo menos de efectos poco apreciables, pero irse acumulando según pasa por la cadena trófica, como se vio en Minamata. Recordando los grupos tróficos que veíamos al describir las comunidades de los ríos, los invertebrados filtradores incorporarán estos compuestos en sus cuerpos, los predadores (consumidores secundarios) incrementarán la concentración en sus cuerpos al alimentarse de los primeros, y los predadores que se los coman incrementarán todavía más la concentración temporal. Debido a esta bioacumulación, en el caso de España la contaminación por pesticidas agrícolas ha determinado la prohibición de consumo de los peces de los ríos Cinca (por derivados del DDT) y Gállego (por el lindano) en Aragón, aguas situadas debajo de las fábricas que los producían.

---

<sup>35</sup> Harada, 1995.

**... Y MODIFICA LAS COMUNIDADES DE SERES VIVOS ASOCIADAS**

El concepto de calidad del agua ha integrado en los últimos años el estado de conservación del ecosistema acuático, adquiriendo rango legal en la Unión Europea a través de la Directiva Marco del Agua (Directiva 2000/60/CE).<sup>36</sup> Esta directiva considera en primer lugar que el agua no es un bien comercial, sino un patrimonio que hay que proteger, defender y tratar como tal. En ella se define el concepto de estado ecológico como una «expresión de la calidad de la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas acuáticos asociados a las aguas superficiales». Es un planteamiento integrador, en el que se asocia la capacidad de la masa de agua en general (río, lago) de seguir soportando un ecosistema propio, del tramo concreto, con lo que se considera agua de buena calidad. Esto es, el estado ecológico se obtiene por la comparación entre cómo se esperaría que se encontrara ese ecosistema en ausencia de perturbación humana y cómo se encuentra realmente. Según sea esta semejanza, se puede clasificar el estado ecológico de una masa de agua en cinco categorías: muy bueno, bueno, aceptable, deficiente y malo, cuyos umbrales se fijan legalmente por las autoridades tras estudios de intercalibración. Para valorar ese estado, se analizan una serie de parámetros o indicadores de calidad: biológicos, hidromorfológicos que afectan a los biológicos, y fisicoquímicos que afectan a los biológicos. En el caso de los seres vivos presentes en el ecosistema acuático, las pequeñas algas bentónicas (diatomeas), las plantas y macroalgas (macrófitos), los peces y los macroinvertebrados son los indicadores escogidos (aunque con distinto nivel de desarrollo en su aplicación).

Se basan estos indicadores en la sensibilidad diferencial de determinados grupos (familias en el caso de macroinvertebrados, especies en los de peces, plantas o diatomeas) frente a las presiones ejercidas sobre los ecosistemas acuáticos. Así, habrá algunos grupos muy sensibles a determinadas presiones, como la contaminación orgánica, que desaparecerán cuando aparezca aquella. Habrá otros que podrán resistir niveles mayores de contaminación, y algunos otros que serán extremadamente tolerantes, pudiendo mantenerse e incluso incrementar sus poblaciones en presencia de esa contaminación. Finalmente, ante niveles de esa presión (contaminación en este ejemplo) más elevados que los que soporten los grupos más sensibles, desaparecerá toda la comunidad. Sin

---

<sup>36</sup> Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas. *Diario Oficial de las Comunidades Europeas*, 327, de 22 de diciembre de 2000, 1-73.

ser equivalentes entre los distintos grupos, se muestran algunos seres vivos de las aguas continentales según su tolerancia a la contaminación, en especial la orgánica, en la Tabla 3.

**Tabla 3.** Ejemplos de organismos acuáticos con distinta tolerancia a la contaminación orgánica

	<b>Tolerancia a la contaminación</b>		
<b>Grupo</b>	<b>Muy sensibles</b>	<b>Tolerancia media</b>	<b>Muy tolerantes</b>
Diatomeas*	<i>Achnantheidium pyrenaicum</i> <i>Eunotia implicata</i> <i>Frustulia saxonica</i>	<i>Navicula viridula</i> <i>Surirella minuta</i> <i>Diatoma elongatum</i>	<i>Nitzschia capitellata</i> <i>Fistulifera saprophila</i>
Macrófitos**	<i>Chara vulgaris</i> , mayoría musgos y hepáticas	<i>Fontinalis antipyretica</i> (musgo), <i>Nostoc</i> , <i>Ranunculus fluitans</i>	<i>Ceratophyllum submersum</i> , <i>Enteromorpha</i> , <i>Potamogeton pectinatus</i>
Invertebrados***	Pérlidos, perlódidos, efeméridos, heptagénidos, blefaricéridos	Hidrosíquidos, élmidos, simúlidos, polimítarcidos	Quironómicos, culícidos, sírfidos oligoquetos, guérridos
Peces	Salmónidos		Ciprínidos (algunas especies)

\* OMNIDIA v5.3<sup>37</sup> \*\* IBMR<sup>38</sup> \*\*\* IBMWP<sup>39</sup>

No es la contaminación orgánica la única perturbación antrópica que afecta al agua y, de hecho, se podrían encontrar organismos sensibles a otro tipo de presiones, aunque gran parte de los sensibles a otras perturbaciones humanas

<sup>37</sup> La versión 5.3 del software OMNIDIA de cálculo de índices de diatomeas es de 2009, véase Lecointe *et al.* (1993) para una descripción inicial del mismo.

<sup>38</sup> Haury *et al.*, 2006.

<sup>39</sup> Alba-Tercedor *et al.*, 2002.

también lo son a la contaminación orgánica (con lo que mantendrían también su potencial indicador). Como hemos indicado anteriormente, la ocupación y simplificación del ámbito fluvial, la construcción de presas, que fragmentan los ecosistemas acuáticos y reducen sus funciones como corredores fluviales, alteraciones de la carga de sedimentos de un tramo, ya sea por su eliminación (por las presas, por dragados) o incremento (por cambios en el uso del suelo, eliminación de bosque de ribera, incendios) o cambios en la temperatura propia de cada tramo (incrementos: refrigeración de grandes centrales eléctricas, vertidos a mayor temperatura, cambio climático; disminuciones: descargas desde desagües de fondo de embalses), modifican las comunidades de seres vivos presentes. Al final, todas estas presiones incrementan la crisis actual de pérdida de la biodiversidad.

#### **REVERTIENDO INTERACCIONES NEGATIVAS**

Es importante que, como especie humana, seamos conscientes de nuestra interrelación con el ciclo del agua y la ecología acuática. Estamos insertos en ese ciclo, modificándolo, y debemos actuar consecuentemente. Las alteraciones que hemos visto pueden ser parcialmente mitigadas, teniendo en mente la sostenibilidad de nuestras acciones. Así, la depuración de los vertidos, la eliminación de contaminantes químicos, la restauración de los bosques de ribera y de la continuidad fluvial serían medidas de gestión más favorables a la conservación de la biodiversidad y la recuperación de unas relaciones más positivas entre los seres humanos y los ecosistemas acuáticos.

Para enmarcar estas acciones, se pueden tener en perspectiva, además de la literalidad de la Directiva Marco de Aguas antes mencionada, las metas que deberíamos ir alcanzando en la búsqueda de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU y la Agenda 2030. De acuerdo con la propia definición que de ellos realiza la ONU, los ODS constituyen un llamamiento universal a la acción para poner fin a la pobreza, proteger el planeta y mejorar las vidas y las perspectivas de las personas en todo el mundo. Esto es, un futuro que sea sostenible. Y en esa búsqueda de la sostenibilidad, el agua es una parte fundamental. De hecho, la mayor parte de los 17 ODS están fuertemente relacionados con el agua (Figura 2), mostrando las múltiples caras de la relación entre la ecología acuática y los seres humanos, y cómo la perspectiva de la Gran Historia puede ayudarnos a comprender los problemas ambientales.



Figura 2. Relaciones principales entre los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU y el agua y la ecología acuática, remarcando la parte de las metas directamente implicadas.

En algunos de esos ODS, el agua y los ecosistemas acuáticos representan el eje principal de acción. Esto queda claro, por ejemplo, en el ODS 6, que busca garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todo el mundo. Todas las metas de dicho objetivo estarían relacionadas: lograr el acceso universal, equitativo y asequible al agua potable, lograr el acceso a servicios de saneamiento e higiene adecuados y equitativos, mejorar la calidad del agua reduciendo la contaminación (lo que incluye eliminar vertidos químicos y materiales peligrosos, minimizando su emisión, reducir a la mitad las aguas residuales no tratadas y promover reutilización seguras), aumentar su uso eficiente, implementando una gestión integrada y actuando como sociedad protegiendo los ecosistemas relacionados con el agua, incrementando la cooperación internacional relacionada con el agua y apoyando a las comunidades locales en su gestión.

En otros casos, es la gestión sostenible de los propios ecosistemas acuáticos la que conforma el objetivo, para lo cual la comprensión de la ecología acuática resulta clave. El ODS 14, sobre vida submarina, busca conservar y utilizar sosteniblemente los océanos, los mares y los recursos marinos.

Algunas de las metas son comunes con otros objetivos, incluso en la forma de adoptarlas, como reducir la contaminación o minimizar la acidificación de los océanos (que, como hemos comentado, también va a estar relacionada con las emisiones de CO<sub>2</sub> y el calentamiento global). Otras requieren activar los mecanismos de alianzas y cooperación internacional, y, especialmente, analizar las pesquerías artesanales, eliminando las subvenciones a la sobrecapacidad y pesca excesiva en el caso de las industriales, al tiempo que incrementar nuestros conocimientos sobre la ecología de las especies pescables y el funcionamiento de los ecosistemas en los que se hayan inmersas.

No se van a conseguir en el tiempo marcado todas las metas, y probablemente algunos de los ODS quedarán lejos de su consecución en 2030. Los propósitos que marcaban los Objetivos de Desarrollo del Milenio, sus antecesores más próximos, así como los que emanaban de la Agenda 2020, no se llegaron a alcanzar. La asunción de la sostenibilidad como elemento imprescindible e incondicionable a otros intereses es algo que todavía no ha sido asumido en nuestras sociedades, que siguen ancladas a los combustibles fósiles y a una externalización globalizadora de los impactos ambientales. Sin un compromiso social firme, los ODS quedarán banalizados en las campañas empresariales y políticas de lavado verde, sin poder alcanzar sus metas. Y, no obstante, no hemos de olvidar que son precisamente objetivos hacia los que encaminarnos como sociedad, y que avanzar en esa dirección resulta positivo aun en el caso de no llegar a ellos.

#### **ALGUNAS ORIENTACIONES DIDÁCTICAS**

Para alcanzar esos ODS en lo relativo al agua, resulta necesario que la sociedad quiera moverse en esa dirección, lo que implica comprender y asimilar estas cuestiones sobre la ecología acuática en el Antropoceno. En esta tarea de transición social a la sostenibilidad, la educación representa un aspecto clave desde los niveles elementales.<sup>40</sup> Una mayor comprensión del medio ambiente, desde la perspectiva entrelazada de la educación para la sostenibilidad, de la

---

<sup>40</sup> Vilches *et al.*, 2009, 2014.

educación ambiental y la enseñanza de las ciencias, puede dar lugar a experiencias fecundas en conocimientos y actitudes.<sup>41</sup> En el caso del agua, en demasiadas ocasiones se ha mantenido una visión del ciclo del agua separada del territorio, del suelo y de los distintos usos (tanto del suelo como de la misma agua), lo que dificulta la comprensión de la ecología acuática y su interrelación con los seres humanos.<sup>42</sup> En este recorrido, la perspectiva de la Gran Historia puede resultar especialmente prometedora, al tratar problemas ambientales que requieren una comprensión holística de la situación,<sup>43</sup> especialmente teniendo en cuenta que el Antropoceno se configura como el octavo umbral de la Gran Historia<sup>44</sup> y que es posible estudiar la problemática ambiental mediante valoraciones de la complejidad creciente y las propiedades emergentes.<sup>45</sup> Si bien la Gran Historia se ha aplicado sobre todo en la educación universitaria y secundaria,<sup>46</sup> se están abriendo interesantes perspectivas para tratar la problemática ambiental en educación primaria a través de la formación del profesorado.<sup>47</sup>

Aquí se plantean unas orientaciones didácticas que pudieran ser tenidas en cuenta a la hora de implementar procesos de enseñanza-aprendizaje sobre el agua, la ecología acuática y los seres humanos, teniendo en cuenta la perspectiva de la Gran Historia (Figura 3).

Toda secuencia didáctica debería partir del análisis de las ideas previas del alumnado (o de la sociedad, si estamos valorando una actuación más integral). En ese sentido, conviene tener en cuenta que los planteamientos educativos han subestimado habitualmente el efecto de la humanidad en el ciclo del agua<sup>48</sup> y, como consecuencia, esto ha influido en que sea de las cuestiones menos comprendidas entre el alumnado y que generan un mayor porcentaje de ideas alternativas.<sup>49</sup> No obstante, es una cuestión que va cambiando, observándose una mejor comprensión del ciclo del agua y de lo que representan los ríos en los últimos años,<sup>50</sup> si bien, al llegar a secundaria, el alumnado todavía

---

<sup>41</sup> Sauv , 2010.

<sup>42</sup> Basterretxea *et al.*, 2019.

<sup>43</sup> Crosby, 2013.

<sup>44</sup> Christian, 2018.

<sup>45</sup> Fernández-Arroyo y Rodríguez-Marín, 2016; Simon, 2018.

<sup>46</sup> Bain, 2020; García Moreno y  lvarez, 2016; Simon *et al.*, 2015; Sullivan, 2020.

<sup>47</sup> Gómez Gonçalves *et al.*, 2020.

<sup>48</sup> Abbott *et al.*, 2019; De Miguel *et al.*, 2009; Ramírez-Segado *et al.*, 2021; Reyer *et al.*, 2007.

<sup>49</sup> Basterretxea *et al.*, 2019; De Miguel *et al.*, 2009.

<sup>50</sup> Basterretxea *et al.*, 2019.

mantiene conceptos estáticos ligados a las propiedades del agua y ambiente, con poca comprensión de los procesos implicados.<sup>51</sup>



Figura 3. Posibles orientaciones didácticas para implementar un proceso de enseñanza-aprendizaje sobre el agua, la ecología acuática y los seres humanos con la perspectiva de la Gran Historia.

Desde una perspectiva de ecología acuática, tanto el alumnado de primaria como el de secundaria presenta una comprensión limitada del concepto y estructura de río, mucho más simple que la visión ecosistémica, relacionada con la biodiversidad acuática, la importancia de los bosques de ribera, el papel de la materia orgánica o de los sedimentos.<sup>52</sup> Las aguas subterráneas, cómo se encuentran o los intercambios entre los compartimentos del ciclo del agua que las incluyen son también cuestiones en las que se alejan sus ideas del conocimiento científico actual.<sup>53</sup> Si bien conforme se incrementa la etapa educativa se alcanza una mejor comprensión, lo cierto es que esta comprensión incompleta sigue propiciando constructos reducidos sobre la sostenibilidad de la gestión del agua y los ecosistemas acuáticos,<sup>54</sup> que se mantienen hasta la edad adulta.<sup>55</sup>

Desde una perspectiva integradora, a la hora de trabajar el agua, la ecología acuática y su relación con los seres humanos, es posible comenzar empleando objetos simbólicos de los usos del agua, tanto de los usos directos (griño) como de los indirectos (manzana, camiseta de algodón) y de aquellos que permiten analizar también esos usos históricos de gran reminiscencia cultural, como un

<sup>51</sup> Marcen Albero y Cuadrat Prats, 2012.

<sup>52</sup> Ladrera *et al.*, 2020.

<sup>53</sup> De Miguel *et al.*, 2009; Hernández Arnedo, 2014.

<sup>54</sup> Ladrera *et al.*, 2020; Martínez-Borreguero *et al.*, 2020.

<sup>55</sup> Hernández Arnedo, 2014.

papiro.<sup>56</sup> Trabajar los conceptos de ciclo hidrológico de forma manipulativa, mediante analogías experimentales, puede facilitar su comprensión.<sup>57</sup> Tener en cuenta, comprender y elaborar discursos que analicen el conocimiento de procesos transmitidos en las comunidades locales, ribereñas, y su contraste con planteamientos científicos puede ser también objeto de secuencias de aprendizaje específicas,<sup>58</sup> combinadas con una interacción más profunda con el medio.<sup>59</sup> Igualmente, la búsqueda, localización y análisis de los elementos culturales que muestran esa importancia de los ecosistemas acuáticos en el desarrollo de las sociedades humanas, tanto desde una perspectiva local, apegada al territorio, como desde un planteamiento global, destacando su importancia en la historia de las civilizaciones.<sup>60</sup>

En ambos casos, el concepto de cuenca hidrográfica puede resultar clave en la comprensión tanto biológica como histórica y cultural del agua. Y, por supuesto, introducir los conceptos de territorio fluvial, corredor fluvial, zona inundable, que no siempre están adecuadamente recogidos en los libros de texto, puede proporcionarnos el andamiaje necesario para integrar esas cuestiones que relacionan directamente la ecología acuática con los seres humanos.

En este sentido, una posible fuente de recursos didácticos adecuados para la educación ambiental relacionada con el agua pueden ser los proyectos LIFE, si bien suele ser necesaria una adaptación (de edad o curricular) para su incorporación exitosa en el aula.<sup>61</sup> Íntimamente relacionados con el planteamiento de los corredores fluviales, podemos destacar los recursos didácticos del LIFE Fluvial, basados en juegos, cómics y talleres para alumnado de educación primaria y secundaria.<sup>62</sup>

Una forma muy poco intrusiva pero muy efectiva de recoger la información sobre lo que ha aprendido e interiorizado el alumnado de las etapas educativas iniciales, que permite el análisis y la reflexión incluso sobre cuestiones complejas del medio natural, es la realización de dibujos,<sup>63</sup> aplicada con éxito también en experiencias didácticas bajo el prisma de la Gran Historia.<sup>64</sup> De

---

<sup>56</sup> Castelltort *et al.*, 2014.

<sup>57</sup> Cruz-Guzmán *et al.*, 2017; De Miguel *et al.*, 2009.

<sup>58</sup> Gearey, 2018.

<sup>59</sup> Gearey, 2020.

<sup>60</sup> Benjamin, 2016.

<sup>61</sup> Ramos Pérez y Torralba-Burrial, 2020.

<sup>62</sup> Carreiro y Equipo LIFE Fluvial, 2019; García Manteca *et al.*, 2020; LIFE Fluvial, 2021; Torralba-Burrial, 2020.

<sup>63</sup> Arillo *et al.*, 2013; Dai, 2017; Pinillas Fernández y Torralba-Burrial, 2021; Villarroel *et al.*, 2018.

<sup>64</sup> Codetta Raiteri *et al.*, 2019.

hecho, a través de los dibujos de alumnado de primaria se han podido analizar las ideas alternativas y conocimientos científicos que presentaban sobre el ciclo del agua y su problemática ambiental.<sup>65</sup>

Conforme el alumnado avanza en las etapas educativas, se puede ir integrando cada vez más la reflexión sobre comportamientos y aptitudes, tanto individuales como sociales. Cobrarán también mayor importancia los conceptos relativos a la gestión del agua y del territorio fluvial, y cómo afectan a las relaciones de los seres humanos con estos ecosistemas. En otro de los capítulos de este libro se habla de cómo las situaciones de riesgo ambiental relacionadas con el agua afectan de forma diferencial a las sociedades, y a determinadas partes de la sociedad, atendiendo a criterios de vulnerabilidad, economía y género, que pueden ser integrados igualmente en secuencias didácticas que incorporen la ordenación del territorio y la resiliencia ambiental.

La inclusión de salidas de campo, en las que el alumnado pueda explorar, sentir y comprobar en la naturaleza, y, a ser posible, aprender directamente en ella las cuestiones relacionadas, resultan especialmente útiles.<sup>66</sup> En este contexto, hay que tener en cuenta que la salida de campo puede ser realizada, de darse las condiciones ambientales adecuadas, en la propia localidad del centro, minimizando los desplazamientos y procurando reconducir la conexión con la naturaleza cercana y las relaciones ciudad-río desde distintas perspectivas, no siempre adecuadamente incorporadas en acciones y discursos,<sup>67</sup> no solo desde los conceptos científicos, sino también desde la afinidad ambiental necesaria para integrar en su proceder la sostenibilidad, puesto que la conexión con el medio ambiente, desde edades tempranas, favorece esas actitudes sostenibles en la infancia<sup>68</sup> y en la etapa adulta.<sup>69</sup>

Dentro de esa interacción con el medio, se puede implementar una actividad de ciencia ciudadana con el alumnado, de forma que pueda comprender también la metodología científica para el conocimiento del entorno y los procesos de creación de ese conocimiento. De hecho, innovaciones educativas basadas en ciencia ciudadana parecen funcionar con éxito tanto en educación formal como informal<sup>70</sup> y pueden presentar un fuerte componente interdisci-

---

<sup>65</sup> Pozo-Muñoz *et al.*, 2021.

<sup>66</sup> Basterretxea *et al.*, 2019; Díez, 2017.

<sup>67</sup> Colding *et al.*, 2020; Cuello Gijón y García-Pérez, 2019.

<sup>68</sup> Corraliza y Collado, 2019.

<sup>69</sup> Wells y Lekies, 2006.

<sup>70</sup> Kloetzer *et al.* 2021; Torralba-Burrial, 2021.

plinar que integre tanto las ciencias experimentales como las sociales,<sup>71</sup> lo que las puede hacer adecuadas para una aproximación dentro del marco de la Gran Historia. En el caso concreto del aprendizaje sobre el agua, hay experiencias basadas tanto en los ecosistemas;<sup>72</sup> (el proyecto VoluntaRíos), en la calidad del agua de boca<sup>73</sup> o en su consumo.<sup>74</sup>

Al final, el alumnado debería ser capaz de comprender que, a la hora de aprender sobre el agua, la ecología acuática y los seres humanos, no se encuentra ante conceptos separados, sino íntimamente ligados a través del tiempo, que son resultado de la interrelación de procesos geológicos, físicos, químicos, biológicos y sociales, para cuya integración didáctica el prisma de la Gran Historia puede ser especialmente útil.

## REFERENCIAS

ABBOTT, Benjamin W., BISHOP, Kevin, ZARNETSKIE, Jay P., MINAUDO, Camille, CHAPIN III, F. S., KRAUSE, Stefan, HANNAH, David M., CONNER, Lafe, ELLISON, David, GODSEY, Sarah E., PLONT, Stephen, MARÇAIS, Jean, KOLBE, Tamara, HUEBNER, Amanda, FREI, Rebecca J., HAMPTON, Tyler, GU, Sen, BUHMAN, Madeline, SAYEDI, Sayedeh Sara, URSACHE, Ovidiu, CHAPIN, Melissa GILLES, HENDERSON, Kathryn D. y PINAY, Gilles: «Human domination of the global water cycle absent from depictions and perceptions», *Nature Geoscience*, 12, (2019), 533-540.

ALBA-TERCEDOR, Javier, JÁIMEZ-CUÉLLAR, Pablo, ÁLVAREZ, Maruxa, AVILÉS, Juan, BONADA, Núria, CASAS, Jesús, MELLADO, Andrés, ORTEGA, Manuel, PARDO, Isabel, PRAT, Narcís, RIERADEVALL, Maria, ROBLES, Santiago, SÁINZ-CANTERO, Carmen Elisa, SÁNCHEZ-ORTEGA, Antonino, SUÁREZ, María Luisa, TORO, Manuel, VIDAL-ABARCA, María Rosario, VIVAS, Soledad, y ZAMORA-MUÑOZ, Carmen: «Caracterización del estado ecológico de ríos mediterráneos ibéricos mediante el índice IBMWP (antes BMWP)», *Limnetica*, 21, 3-4, (2002), 175-185.

ALVARADO Y DE LA PENA, Santiago de: *El reino mineral y la mineralogía en general y en particular de España*, Madrid: Imprenta de Villamil, 1832.

ÁLVAREZ, Walter: *A most improbable journey. A Big History of our planet and ourselves*, New York, London: W.W. Norton & Company, 2016.

<sup>71</sup> Tauginiené et al., 2020.

<sup>72</sup> Ladrera et al., 2019.

<sup>73</sup> Queiruga-Dios et al., 2020.

<sup>74</sup> Tsivitanidou y Ioannou, 2020.

ARILLO, M. A., EZQUERRA, A., FERNÁNDEZ, P., GALÁN, P., GARCÍA, E., GONZÁLEZ, M., DE JUANAS, A., MARTÍN DEL POZO, R., REYERO, C. y SAN MARTÍN, C.: *Las ideas «científicas» de los alumnos y alumnas de Primaria: tareas, dibujos y textos*. Madrid: Universidad Complutense de Madrid, 2013.

BAIN, Robert B.: «Crossing thresholds. Using big history to meet challenges in teaching and learning in the United States», C. Benjamin, E. Quaedackers y D. Baker (eds.), *The Routledge Companion to Big History*: Routledge, 2020, 372-393.

BALIAN, E. V., SEGERS, H., MARTENS, K., y LÉVÉQUE, C.: «The freshwater animal diversity assessment: an overview of the results», *Hydrobiologia*, 595, (2008), 627-637.

BARTOLOMÉ, Carmen, ÁLVAREZ JIMÉNEZ, Julio, VAQUERO, Jesús, COSTA, Margarita, CASERMEIRO, Miguel Ángel, GIRALDO, Jesús y ZAMORA, Julián: *Los tipos de hábitat de interés comunitario de España. Guía básica*. Madrid: Ministerio de Medio Ambiente, Dirección General para la Biodiversidad, 2005.

BASSET, A., ELLIOTT, M., WEST, R. J., y WILSON, J. G.: «Estuarine and lagoon biodiversity and their natural goods and services», *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 132, (2013), 1-4.

BASTERRETxea, Gurutzne, BASTIDA, Soraya, Díez, José Ramón y GUTIÉRREZ, José Manuel: *Ideas Previas y Educación Ambiental: Comparación entre las ideas del alumnado de dos generaciones (1996 y 2013)*, Vitoria-Gasteiz: Departamento de Medio Ambiente, Planificación Territorial y Vivienda del País Vasco. Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco, 2019.

BENJAMIN, Craig. G.: *The Big History of Civilizations*, Wolverhampton: The Great Courses, 2016.

BOWLES, Guillermo: *Introducción á la Historia Natural y á la Geografía Física de España*. Tercera edición. Madrid: Imprenta Real, 1789.

CARREIRO, Pepe y EQUIPO LIFE FLUVIAL: *Los Bolechas van por el río*, A Coruña: Bolanda Ediciones, 2019.

CASTELLTORT, Alba, SANMARTÍ, Neus, y PUJOL, Diana: «Actividades en el entorno: una oportunidad para aprender sobre el agua», *Alambique: Didáctica de las Ciencias Experimentales*, 77, (2014), 54-61.

CHRISTIAN, David: *Origin story. A Big History of everything*. New York, Little, Brown Spark, 2018. (Existe edición en español de 2019, *La Gran Historia de Todo*, Editorial Crítica).

CODETTA RAITERI, Adalberto, PORTA, Marina, GRIECO, Giovanni y CAMBINI, Renza: «Towards a Big History Model for Italian schools: the convergence of knowledge from many disciplines», *Journal of Big History*, 3, 1, (2019), 33-49.

COLDING, Johan, GIUSTI, Matteo, HAGA, Andreas, WALLHAGEN, Marita, y BARTHEL, Stephan: «Enabling relationships with nature in cities», *Sustainability*, 12, 11, (2020), 4394.

CORRALIZA, José Antonio y COLLADO, Silvia: «Conciencia ecológica y experiencia ambiental en la infancia», *Papeles del Psicólogo*, 40, 3, (2019), 190-196.

CROSBY, Alfred W.: «Gran historia como historia ambiental», *Relaciones. Estudios de Historia y Sociedad*, 34, 136, (2013), 21-39.

CRUTZEN, Paul J.: «Geology of mankind: the Anthropocene», *Nature* 415, (2002), 23.

CRUZ-GUZMÁN, Marta, GARCÍA-CARMONA, Antonio y CRIADO, Ana: «Aprendiendo sobre los cambios de estado en educación infantil mediante secuencias de pregunta-predicción-comprobación experimental», *Enseñanza de las Ciencias*, 35.3, (2017), 175-193.

CUELLO GIJÓN, Agustín, y GARCÍA-PÉREZ, Francisco F.: «¿Ayudan los libros de texto a comprender la realidad fluvial de la ciudad?», *Revista de Humanidades*, 37, (2019), 209-234.

DAI, Ami: «Learning from children's drawings on nature», Katz P. (ed.), *Drawing for Science Education. An international perspective*: Rotterdam: Sense Publishers, 2017, 73-86.

DE MIGUEL, Ángel, LADO, Julio J., MARTÍNEZ, Virtudes, LEAL, María y GARCÍA, Raquel: «El ciclo hidrológico: experiencias prácticas para su comprensión», *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 17, 1, (2009), 78-85.

DÍEZ, Joserra: *El agua y los ríos. Recursos didácticos para el profesorado. Segundo ciclo de Educación Infantil y primer ciclo de Educación Primaria*. Toledo: Editorial Ledoria, 2017.

FERNÁNDEZ, Joaquín: *Dos siglos de periodismo ambiental*. Caja de Ahorros del Mediterráneo, 2001.

FERNÁNDEZ-ARROYO, Jorge y RODRÍGUEZ-MARÍN, Fátima: «Los procesos de enseñanza-aprendizaje relacionados con el agua en el marco de las hipótesis de transición», *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 14, 1, (2016), 227-243.

GARCÍA MANTECA, Pilar, FERNÁNDEZ GARCÍA, María, SANNA, Mauro, TORRALBA-BURRIAL, Antonio, MARQUÍNEZ, Jorge, VALDERRÁBANO, Jesús, RAMIL, Pablo, FERREIRO, Javier, RODRÍGUEZ-GONZÁLEZ, Patricia, FERNÁNDEZ, Miguel y BLANCO, Jorge: *Cuaderno de campo sobre los corredores fluviales del proyecto LIFE Fluvial*, A Coruña: Equipo LIFE Fluvial, 2020.

GARCÍA MORENO, Olga, y ÁLVAREZ, Walter: «La Gran Historia: Una nueva narrativa para estudiar todo el pasado», *Ciencia Rías Baixas*, 16, (2016), 11-15.

GARCÍA-MORENO, Olga, ÁLVAREZ-LAÓ, Diego, ARBIZU, Miguel, DOPICO, Eduardo, GARCÍA-VÁZQUEZ, Eva, GARCÍA SANSEGUNDO, Joaquín, JIMÉNEZ SÁNCHEZ, Montserrat, MIRALLES, Laura, OBESO, Ícaro, RODRIGUEZ-REY, Ángel, DE LA RASILLA VIVES, Marco, SÁNCHEZ FERNÁNDEZ, Luis Vicente, TERENCE, Luis, TOFFOLATTI, Luigi y TURRERO, Pablo: «The little big history of the Nalón River, Asturias, Spain», C. Benjamin, E. Quaedackers y D. Baker (eds.), *The Routledge Companion to Big History*. Routledge, 2019, 300-319.

GEAREY, Mary: «Tales from the riverside: What community stories can tell us about sustainable water resources management practices», *Sustainable Development*, 26, 2, (2018), 132-140.

——— «The Challenges of Changing Governance: Curating New Civic Identities for Health and Wellbeing», N. Dempsey y J. Dobson (eds.) *Naturally Challenged: Contested Perceptions and Practices in Urban Green Spaces*: Cham: Springer, 2020. 117-142.

GÓMEZ GONÇALVES, Alejandro, CORROCHANO FERNÁNDEZ, Diego, y RUBIO MUÑOZ, Francisco Javier: «La Gran Historia en la formación del profesorado de primaria», *Iber: Didáctica de las Ciencias Sociales, Geografía e Historia*, 100, (2020), 59-64.

HARADA, Masazumi: «Minamata disease: methylmercury poisoning in Japan caused by environmental pollution», *Critical reviews in Toxicology*, 25, 1, (1995), 1-24.

HAURY, J., PELTRE, M. C., TRÉMOLIÈRES, M., BARBE, J., THIEBAUT, G., BERNEZ, I... y LAMBERT-SERVIEN, E.: «A new method to assess water trophy and organic pollution—the Macrophyte Biological Index for Rivers (IBMR): its application to different types of river and pollution», *Hydrobiologia*, 570, (2006), 153-158.

HERNÁNDEZ ARNEDO, María Jesús: «¿Qué debería conocer todo ciudadano sobre el agua? *Alambique Didáctica de las Ciencias Experimentales*, 77, (2014), 9-16.

KLOETZER, Laure, LORKE, Julia, ROCHE, Joseph, GOLUMBIC, Yaela, WINTER, Silvia, y JÖGEVA, Aiki: «Learning in Citizen Science», K. Vohland *et al.* (eds.) *The Science of Citizen Science*: Cham: Springer, 2021, 283-380.

LADRERA, Rubén, ROBREDO, Beatriz, VERKAIK, Irama, y FORNUÑO, Pau: «Teléfonos Inteligentes y Ciencia Ciudadana en la Enseñanza de las Ciencias: estudiando los ríos con la app RiuNet», *Boletín ENCIC*, 3, 2, (2019), 66-68.

LADRERA, Rubén, RODRÍGUEZ-LOZANO, Pablo, VERKAIK, Iraima, PRAT, Narcís, y Díez, José Ramón: «What do students know about rivers and their management? Analysis by educational stages and territories», *Sustainability*, 12, 20, (2020), 8719.

LECOINTE, C., COSTE, M., y PRYGIEL, J.: «“Omnidia”: software for taxonomy, calculation of diatom indices and inventories management», *Hydrobiologia*, 269, 1, (1993), 509-513. (Versión Omnidia 5.3, 2009).

LIFE FLUVIAL: *O Xogo da Gota*, <https://www.oxogodagota.es/>, 2021.

MAGURRAN, Anne E., DORNELAS, Maria, MOYES, Faye, GOTELLI, Nicholas J., y MCGILL, Brian: «Rapid biotic homogenization of marine fish assemblages», *Nature communications*, 6, (2015), 8405.

MARCEN ALBERO, Carmelo y CUADRAT PRATS, José María: «Argumentos educativos para enseñar-aprender el agua en la enseñanza obligatoria», *Serie Geográfica*, 18, (2012), 65-75.

MARGALEF, Ramón: *Limnología*. Barcelona: Ediciones Omega, 1983.

MARTÍNEZ-BORREGUERO, Guadalupe, MAESTRE-JIMÉNEZ, Jesús, MATEOS-NÚÑEZ, Milagros y NARANJO-CORREA, Francisco Luis: «An integrated model approach of education for sustainable development: Exploring the concepts of water, energy and waste in primary education», *Sustainability*, 12, 7, (2020), 2947.

MOSS, Brian. *Ecology of freshwaters. A view for the Twenty-first Century*. 4<sup>th</sup> ed. Wiley-Blackwell, 2010.

MUÑOZ-MAS, Rafael y GARCÍA-BERTHOU, Emili: «Alien animal introductions in Iberian inland waters: An update and analysis», *Science of the Total Environment*, 703, (2020), 134505.

OLIVA-PATERNA F. J., RIBEIRO F., MIRANDA R., ANASTÁCIO P. M., GARCÍA-MURILLO P., COBO F., GALLARDO B., GARCÍA-BERTHOU E., BOIX D., MEDINA L., MORCILLO F., OSCOZ J., GUILLÉN A., AGUIAR F., ALMEIDA D., ARIAS A., AYRES C., BANHA F., BARCA S., BIURRUN I., CABEZAS M. P., CALERO S., CAMPOS J. A., CAPDEVILA-ARGÜELLES L., CAPINHA C., CARAPETO A., CASALS F., CHAINHO P., CIRUJANO S., CLAVERO M., CUESTA J. A., DEL TORO V., ENCARNAÇÃO J. P., FERNÁNDEZ-DELGADO C., FRANCO J., GARCÍA-MESEGUER A. J., GUARESCHI S., GUERRERO A., HERMOSO V., MACHORDOM A., MARTELO J., MELLADO-DÍAZ A., MORENO J. C., OFICIALDEGUI F. J., OLIVO DEL AMO R., OTERO J. C., PERDICES A., POU-ROVIRA Q., RODRÍGUEZ-MERINO A., ROS M., SÁNCHEZ-GULLÓN E., SÁNCHEZ M. I., SÁNCHEZ-FERNÁNDEZ D., SÁNCHEZ-GONZÁLEZ J. R., SORIANO O., TEODÓSIO M. A., TORRALVA M., VIEIRA-LANERO R., ZAMORA-LÓPEZ, A. y

ZAMORA-MARÍN J. M.: *Lista de especies exóticas acuáticas de la península ibérica (2020). Lista actualizada de las especies exóticas acuáticas introducidas y establecidas en las aguas continentales ibéricas*. Informe técnico preparado por LIFE INVASAQUA (LIFE17 GIE/ES/000515), 2021.

PINILLAS FERNÁNDEZ Sara y TORRALBA-BURRIAL, Antonio: «El cuaderno de campo como eje del aprendizaje de naturaleza cercana en Educación Infantil», *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 18, 3, (2021), 3202.

PLINIO II, C. «El Viejo»: *Historia Natural*, (Siglo I) (Revisada edición en español, Madrid:Visor Libros, 1999).

POZO-MUÑOZ, María Paz, VELASCO-MARTÍNEZ, Leticia Concepción, MARTÍN-GÁMEZ, Carolina y TÓJAR-HURTADO, Juan Carlos: «¿Qué sabe el alumnado sobre las problemáticas socio-ambientales del agua y su gestión sostenible? Investigación mixta en Educación Primaria», *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 18, 3, (2021), 3501.

QUEIRUGA-DIOS, Miguel Ángel, LÓPEZ-INESTA, Emilia, DIEZ-OJEDA, María, SÁIZ-MANZANARES, María Consuelo, y VÁZQUEZ DORRÍO, José Benito: «Citizen science for scientific literacy and the attainment of sustainable development goals in formal education», *Sustainability*, 12, 10, (2020), 4283.

RAHEL, Frank J.: «Homogenization of freshwater faunas», *Annual Review of Ecology and Systematics*, 33, 1, (2002), 291-315.

RAMÍREZ-SEGADO, Alejandra, RODRÍGUEZ-SERRANO, María y BENARROCH, Alicia: «El agua en la literatura educativa de las dos últimas décadas. Una revisión sistemática», *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 18, 1, (2021), 1107.

RAMOS PÉREZ, Alberto y TORRALBA-BURRIAL, Antonio: «Uso y potencial del Programa LIFE para la Educación Ambiental en educación formal, no-formal e informal, y especialmente en Educación Primaria», *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 17, 3, (2020), 3501.

REYERO, Carmen, CALVO, Mercedes, VIDAL, María Pilar, GARCÍA, Eugenia y MORCILLO, Juan Gabriel: «Las ilustraciones del ciclo del agua en los textos de Educación Primaria», *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 15, 3, (2007), 287-294.

RIPPLE, William J., WOLF, Christopher, NEWSOME, Thomas M., BARNARD, Phoebe, MOOMAW, William R. y 11,258 scientist signatories form 153 countries.: «World scientists' warning of a climate emergency», *BioScience*, 70, (2020), 8-12.

RUGGIERO, Michael A., GORDON, Dennis P., ORRELL, Thomas M., BAILLY, Nicolas, BOURGOIN, Thierry, BRUSCA, Richard C., CAVALIER-SMITH, Thomas, GUIRY, Michael D. y KIRK Paul M.: «A Higher Level Classification of All Living Organisms», *PLoS ONE*, 10, 4, (2015), e0119248.

SAUVÉ, Lucie: «Educación científica y educación ambiental: un cruce fecundo», *Enseñanza de las ciencias*, 28, 1, (2010), 5-18.

SIMON, Richard B.: «Enseñar la complejidad en el contexto de la Gran Historia», *Enseñanza de las ciencias sociales*, 17, (2018), 51-60.

——— BEHMAND, Mojgan y BURKE, Thomas: (eds.). *Teaching Big History*. Oakland: University of California Press, 2015.

STEFFEN, Will, GRINEVALD, Jacques, CRUTZEN, Paul y McNEILL, John: «The Anthropocene: conceptual and historical perspectives», *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 369, (2011), 842-867.

STEFFEN, Will, BROADGATE, Wendy, DEUTSCH, Lisa, GAFFNEY, Owen y LUDWIG, Cornelia: «The trajectory of the Anthropocene: the great acceleration», *The Anthropocene Review*, 2, 1, (2015), 81-98.

SULLIVAN, Tracy: «The Big History project in Australia», C. Benjamin, E. Quaedackers y D. Baker (eds.), *The Routledge Companion to Big History*: Routledge, 2020, 339-369.

TAUGINIENĖ, Loreta, BUTKEVIČIENĖ, Eglė, VOHLAND, Katrin, HEINISCH, Barbara, DASKOLIA, Maria, SUŠKEVIČS, Monika, POTEĻA, Manuel, BALÁZS, Bálint y PRŪSE, Baiba: «Citizen science in the social sciences and humanities: the power of interdisciplinarity», *Palgrave Communications*, 6, 1, (2020), 1-11.

TORRALBA-BURRIAL, Antonio: *Estado ecológico, comunidades de macroinvertebrados y de odonatos de la red fluvial de Aragón*. Zaragoza: Consejo Económico y Social de Aragón, 2009.

——— «Diseño y aplicación de un juego de memoria como recurso didáctico para el aprendizaje lúdico sobre corredores fluviales», *Conference Proceedings EDUNOVATIC2020*: Madrid: REDINE, 2020, 1214-1219.

——— «La ciencia ciudadana como innovación en la enseñanza de las ciencias», A. Fueyo (Ed.) *Digital Teachers & Digital Learners. Innovar la docencia incorporando las Competencias Digitales (XIIJID2019)*: Mieres: Universidad de Oviedo, 2021, 429-441.

TSIVITANIDOU, Olia y IOANNOU, Andri: «Citizen Science, K-12 science education and use of technology: a synthesis of empirical research», *Journal of Science Communication*, 19, 4, (2020), V01.

VANNOTE, Robin L., MINSHALL, G. Wayne, CUMMINS, Kenneth W., SEDELL, James R. y CUSHING, Colbert E.: «The River Continuum Concept», *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 37, 1, (1980), 130-137.

VILCHES, Amparo, MACÍAS, Óscar y GIL-PÉREZ, Daniel: *Década de la Educación para la Sostenibilidad. Temas de acción clave*. Madrid: Centro de Altos Estudios Universitarios de la OEI, 2009.

VILCHES, Amparo, MACÍAS, Óscar y GIL-PÉREZ, Daniel: *La transición a la sostenibilidad: Un desafío urgente para la ciencia, la educación y la acción ciudadana. Temas clave de reflexión y acción*. Madrid: OEI, 2014.

VILLARROEL, José Domingo, ANTÓN, Álvaro, ZUAZAGOITIA, Daniel, y NUÑO, Teresa: «Young children's understanding of plant life: a study exploring rural-urban differences in their drawings», *Journal of Biological Education*, 52, 3, (2018), 331-341.

WELLS, Nancy M. y LEKIES, Kristi S.: «Nature and the life course: Pathways from childhood nature experiences to adult environmentalism», *Children Youth and Environments*, 16, 1, (2006), 1-24.

## IX. AGUA, DESASTRES Y GÉNERO<sup>1</sup>

**Rosario González Arias**

Universidad de Oviedo

**Ana Gabriel Fernández Saavedra**

FLACSO-Uruguay

### INTRODUCCIÓN

Con independencia de su origen (un manantial natural, una red de suministro o un sistema de riego), el agua es un elemento básico para cubrir muchas de nuestras necesidades primarias. Por eso, contar con agua limpia, suficiente y accesible constituye un derecho humano indispensable para garantizar una vida con dignidad humana.<sup>2</sup> El agua, además, «es la fuerza que impulsa el desarrollo sostenible, incluyendo la integridad ambiental y la erradicación de la pobreza y el hambre».<sup>3</sup> Sin embargo, a nivel mundial, actualmente los problemas de abastecimiento para uso personal, doméstico y productivo se han convertido en una preocupación grave, tanto por su calidad como por su disponibilidad, consecuencia en gran parte de la degradación ambiental. UNICEF calcula que unos 2200 millones de personas –una de cada tres– carecen de agua potable

---

<sup>1</sup> Este trabajo forma parte del proyecto GENDER (Género, Desastres y Riesgos) financiado por la Agencia Española de Investigación (FEM2017-86852-P).

<sup>2</sup> Resolución de la Asamblea General de Naciones Unidas, julio 2010.

<sup>3</sup> Tercer Foro Mundial del Agua, Kyoto, 2003.

y 4200 millones viven sin servicios de saneamiento suficientes y seguros. La sobreexplotación del agua subterránea, el crecimiento no planificado de los asentamientos urbanos –incluso en zonas propensas a las inundaciones–, la deforestación, la desaparición de humedales, el incremento de la agricultura intensiva o el aumento de la densidad demográfica, son solo una parte de los desafíos directamente relacionados con el agua que la actual crisis global del medio ambiente ha generado.

En este escenario, las desigualdades sociales juegan un papel determinante que coloca a ciertos grupos e individuos ante una situación de especial vulnerabilidad en lo relativo a la gestión y protección del líquido elemento, con necesidades e intereses diferenciados. Partiendo de esta premisa, en el presente capítulo abordamos algunas de las problemáticas vinculadas al agua, especialmente las relativas a los desastres, y reflexionamos sobre sus impactos diferenciados en mujeres y hombres. Porque incluso considerando que algunos desastres son eventos naturales, sus efectos nunca lo son. No hay fenómenos (naturales o sociales) neutros en términos de género, y los relacionados con el agua no son una excepción.

Para desarrollar dicho tema, el trabajo comienza con un apartado en el que se explica la incidencia del agua en la gestación de los desastres, para a continuación abordar la estrecha relación existente entre el agua y los roles de género. En tercer lugar, se presenta el desarrollo teórico que ha permitido incorporar la perspectiva de género al estudio de los desastres asociados al agua, y seguidamente se analizan los avances en la agenda internacional a partir de los marcos regulatorios sobre el agua y los desastres desde la perspectiva de género. Por último, se elaboran unas reflexiones finales a modo de conclusión y se recoge la bibliografía de referencia.

## **EL AGUA Y LOS DESASTRES**

El agua juega un papel determinante en los denominados desastres «naturales», que en la mayoría de los casos son socioambientales por su carácter antropogénico, ya que la intervención humana juega un papel crucial en su producción. Cerca del 90 % de los fenómenos ambientales extremos están ligados a este recurso natural. Si pensamos en amenazas relacionadas con el agua, las solemos asociar a inundaciones y riesgos similares como los tsunamis, es decir, con los problemas que genera su exceso incontrolado. Ciclones tropicales, tifones, huracanes, tempestades de granizo, tornados, tormentas de

nieve o avalanchas entrarían dentro de esta clasificación de eventos catastróficos.<sup>4</sup> Pero la carencia del líquido vital también nos pone en aprietos cuando su escasez implica riesgos como las sequías, déficits hídricos, desertización o incendios, entre otros, relacionados con el cambio climático. Y si profundizamos en nuestra reflexión podemos vincular otros impactos ambientales de segundo orden relacionados con el agua de forma indirecta, fundamentalmente a través de la gestión de la tierra, como puede ser el hundimiento o deslizamiento del terreno generado por el *fracking* (fractura hidráulica del terreno para extraer gas o petróleo inyectando agua a alta presión) o la agricultura intensiva (que demanda extracción de agua subterránea en grandes cantidades). Aludes, suelos expansivos, corrimiento de laderas, deslizamientos submarinos, derrumbes y corrientes de barro son algunos de los efectos catastróficos de este tipo de amenazas.<sup>5</sup> Como vemos, sean de naturaleza hidrometeorológica como los primeros, o geohidrológica como estos últimos, de gestación lenta como las sequías o de irrupción repentina como las inundaciones, lo cierto es que los riesgos vinculados al agua son variados e incluso van en aumento en el contexto actual. Los datos muestran que entre 1991 y 2000, más del 90 % de las personas fallecidas a causa de desastres naturales perdieron la vida como consecuencia de circunstancias hidrológicas extremas. A esto hay que sumar el impacto del cambio climático sobre los recursos hídricos del mundo a través del aumento del nivel del mar el deshielo de los glaciares, inundaciones, sequías más frecuentes y severas,<sup>6</sup> por desertificación de grandes zonas, la disminución del agua potable disponible, y huracanes cada vez más destructivos.<sup>7</sup> Solo en el ámbito de los países de la Unión Europea se calcula que las inundaciones se duplicarán para el año 2050, además aumentarán las olas de calor (que en 2015 causaron 3275 muertes solo en Francia), y el riesgo de tsunamis –por el incremento de seísmos– en países del sur como Portugal o Chipre.

La subsidencia, o hundimiento del terreno como consecuencia del agotamiento del agua subterránea por la movilización de fluidos, también conlleva un grave peligro, al reducir la capacidad de almacenamiento del sistema acuífero y aumentar el riesgo de inundaciones. No en vano algunas investigaciones advierten que el 10 % de la superficie terrestre y la cuarta parte de la población

---

<sup>4</sup> UNISDR, 2009.

<sup>5</sup> *Idem*.

<sup>6</sup> Herrera-García, 2021.

<sup>7</sup> Pajares, 2020.

mundial vive bajo esta amenaza.<sup>8</sup> Esta previsión empeorará en las próximas décadas, porque con el aumento de población y de crecimiento económico habrá mayor demanda de agua subterránea, hasta el punto de que se calcula que para el año 2040 la población amenazada aumentará en un 30 %, afectando a 1600 millones de habitantes, de los cuales 635 millones vivirán en áreas propensas a inundaciones.<sup>9</sup>

Sin embargo, «no llueve igual para todas las personas», porque también en este tema las diferencias sociales están presentes. A la hora de abordar esta idea resulta útil diferenciar tres conceptos que a veces pueden llegar a confundirse. La catástrofe es un acontecimiento que puede desencadenar un desastre. Para que esto suceda tiene que concurrir una situación de riesgo. Y entre los factores que incrementan ese riesgo, junto con el peligro y la exposición, se encuentra la vulnerabilidad.<sup>10</sup>

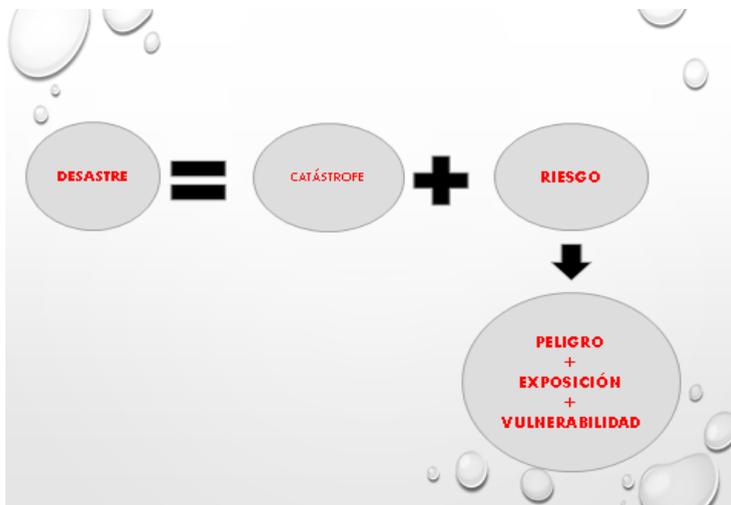


Figura 1. Relación entre desastre, catástrofe y riesgo. Fuente: elaboración propia

Por tanto, el grado de vulnerabilidad de un grupo humano es lo que determina que una catástrofe natural o humana desencadene un desastre.<sup>11</sup> La vulnerabilidad hace alusión a la condición determinada por factores o procesos

<sup>8</sup> Herrera-García, 2021.

<sup>9</sup> *Idem.*

<sup>10</sup> Pérez, 1999.

<sup>11</sup> *Idem.*

físicos, sociales, económicos y ambientales que aumentan la susceptibilidad de una comunidad al impacto de los peligros.<sup>12</sup> Y, en el caso concreto de la vulnerabilidad social, se hace referencia a las diferencias en la capacidad humana para prepararse, responder y recuperarse de los desastres. De ahí la importancia de considerar, más allá de las fuerzas naturales, el peso que tienen en el impacto del desastre las relaciones de poder presentes en los sistemas sociales. El análisis del contexto, determinado por variables de naturaleza económica y política que operan a escala nacional e incluso internacional, permite identificar las diferencias sociales en relación con la salud, los ingresos económicos, la seguridad de los edificios, la ubicación del trabajo y casa, etc. En esta línea, el concepto de vulnerabilidad centrada en el ser humano destaca que esta se construye socialmente y se manifiesta con estratificación y desigualdad entre diferentes grupos de personas y diferentes lugares.

Como veremos más adelante, la transición de un enfoque centrado inicialmente en los peligros hacia uno que pone el énfasis en la vulnerabilidad –y posteriormente en la resiliencia– ha facilitado que los desastres provocados por agentes naturales hayan comenzado a ser percibidos como eventos contruidos socialmente. Y es precisamente como consecuencia de este cambio en la manera de entender los desastres que aumenta su investigación desde una multiplicidad de disciplinas, incluidas las ciencias sociales y su especial interés en la vulnerabilidad. Como consecuencia de ello, hoy sabemos que el impacto de los desastres de origen natural varía según los índices de ingresos y la vulnerabilidad preexistente en los países, por eso los países con ingresos bajos registran mayores pérdidas humanas que los países ricos. Y tanto en unos como en otros, afectan desproporcionadamente a su población más pobre. Puede decirse por tanto que los desastres son socialmente selectivos.<sup>13</sup> De hecho, las evaluaciones de vulnerabilidad han mostrado que los desastres discriminan de acuerdo a las mismas categorías que las sociedades discriminan a las personas,<sup>14</sup> y que uno de los principales factores que determinan esa vulnerabilidad es precisamente el género. Porque como desarrollaremos, ser hombre o mujer influye en el acceso a los recursos, las capacidades o la de toma de decisiones a lo largo del ciclo de vida del desastre, lo que afianza la necesidad de incorporar la perspectiva de género en las cuatro fases del proceso: prevención, mitigación, emergencia y recuperación.

---

<sup>12</sup> UNISDR, 2009.

<sup>13</sup> Pérez, 1999.

<sup>14</sup> UNISDR, 2019.

### EL AGUA Y EL GÉNERO

La perspectiva de género es una herramienta de análisis e intervención social, que considera el impacto diferenciado que tiene en cualquier fenómeno el hecho de ser mujer o varón, haciendo visibles las asimetrías de poder de unas y otros. A lo largo del proceso de socialización se aprende y pone en práctica una serie de comportamientos aceptados como femeninos o masculinos, que van a ser considerados como apropiados o no en función de esas expectativas sociales. Los roles de género hacen referencia a ese conjunto de ideas, creencias, normas de comportamiento y atribuciones sociales construidas en cada cultura y momento histórico, tomando como base una diferencia sexual binaria (que no incluye la diversidad de identidades sexuales).

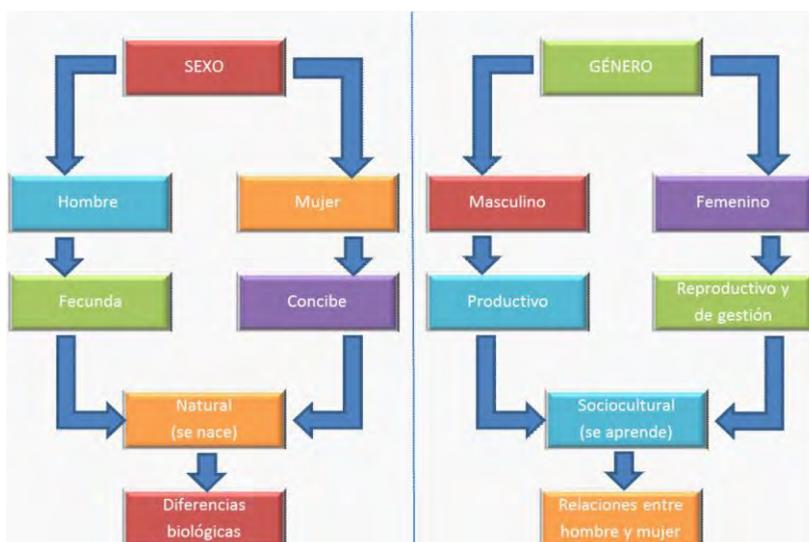


Figura 2. El sistema sexo-género. Fuente: elaboración propia

Estas diferencias, que son la base de la brecha de género, se construyen en torno a la división sexual del trabajo en productivo y reproductivo. El primero, caracterizado por ser remunerado y desarrollarse en el espacio público, ha sido considerado tradicionalmente masculino, lo que les ha permitido a los hombres erigirse en proveedores del grupo familiar, contar con autonomía económica y desarrollar su actividad fuera del ámbito doméstico, proyectando una serie de capacidades y relaciones sociales vinculadas a la toma de decisiones. Por el

contrario, el trabajo reproductivo o de cuidados, típicamente feminizado, se desarrolla en el ámbito privado, invisibilizado y sin proyección pública, por lo que carece de reconocimiento económico, social o político, colocando a las mujeres en una clara posición de desventaja y dependencia en relación con los hombres. Esto sucede a pesar de que sin los aportes del trabajo reproductivo la vida (y con ella también el trabajo productivo) sería insostenible.



Figura 3. El iceberg de los cuidados.

Fuente: <http://decuidados.org/materiales-graficos/>

Una de las consecuencias directas y más graves de este desigual reparto de tareas y de recursos es la denominada feminización de la pobreza,<sup>15</sup> que explica entre otras cosas los siguientes datos:

- ✓ 75 % de las personas pobres y 75 % de las personas analfabetas en el mundo son mujeres
- ✓ 2/3 de los 1500 millones de personas que viven con un dólar o menos al día son mujeres
- ✓ 7 de cada 10 personas que muere de hambre en el mundo son mujeres y niñas
- ✓ Las mujeres solo perciben el 10 % del ingreso mundial total, a pesar de que las 2/3 de las horas del trabajo mundial están a su cargo

<sup>15</sup> PNUD, 1995.

- ✓ Produciendo el 50 % de los alimentos en el mundo solo son propietarias del 1 % de la tierra.
- ✓ Si se pagara el trabajo doméstico que realizan las mujeres tendría un valor aproximado en el mercado de 11 billones de dólares (más de 9.5 billones de euros).

El análisis de género se completa con la perspectiva interseccional que permite identificar otros sistemas de poder y dominación que pueden estar operando a la vez que el de género en la discriminación contra las mujeres. Hay circunstancias de edad, color de piel, clase social, discapacidad, orientación sexual, etc., que aumentan el riesgo potencial de opresión al conjugarse dos o más sistemas de exclusión. El concepto se relaciona también con el de discriminación múltiple en referencia a aquellas mujeres con identidades subordinadas a varios niveles de discriminación, como es el caso de las que viven en situación de pobreza, en zonas rurales, son gitanas, niñas, lesbianas, ancianas, discapacitadas, indígenas, migrantes, madres solteras, entre otras.



Figura 4. Intersección de discriminaciones. Fuente: elaboración propia.

En función de estos estereotipos de género han sido tradicionalmente las mujeres las encargadas del abastecimiento y gestión del agua, tanto al interior de las familias como de las comunidades, por ser responsables de la higiene, salud y alimentación del grupo social, tareas de cuidados para las que el agua resulta un recurso indispensable. Se calcula que en ocho de cada diez hogares la tarea de

recoger agua recae en las mujeres y niñas de la familia, y solo en un país en el mundo, Mongolia, los hombres son los responsables de su recolección. Los estereotipos de género sobre este particular operan de tal manera que incluso, como ha revelado una investigación, en Uganda cuando un hombre realiza esa tarea es ridiculizado por otros hombres e incluso se considera que ha sido «embrujaado».<sup>16</sup>



Figura 5. Distribución de la recolección de agua en los hogares. Fuente: Castañeda et al. 2020 (IUCN).

Además, las mujeres son agentes clave para la seguridad alimentaria, por su dedicación y conocimientos sobre la producción de las cosechas, la biodiversidad local, los suelos y los recursos hídricos locales. La Conferencia Internacional sobre el Agua y el Medio Ambiente celebrada en Dublín en 1992 reconoció este importante papel de las mujeres en el abastecimiento, gestión y protección del agua, lo que permite hablar de la feminización del agua. A pesar de todo ello, a nivel mundial no tienen derechos sobre la tierra y el agua –cuya titularidad recae mayoritariamente en los hombres– y en consecuencia son excluidas de los procesos de toma de decisiones sobre los sistemas de gestión hídrica para usos agrícolas y similares.

<sup>16</sup> Castañeda *et al.*, 2020.

Es variada la casuística mundial sobre la responsabilidad de las mujeres en la recolección de agua cuando las fuentes están ubicadas fuera de las instalaciones comunitarias. En Sierra Leona, por ejemplo, más de una cuarta parte de los hogares dedica más de 30 minutos diarios a recoger agua y en 3 de cada 4 de dichos hogares la tarea recae sobre mujeres y niñas, lo que equivale a más de 175 millones de horas al año solo en dicho país.<sup>17</sup> En Nepal, hay zonas en las que 200 familias de varias aldeas afrontan graves problemas de escasez por contar con una sola fuente de agua apta para beber: un manantial natural. Las mujeres de las familias tienen que esperar durante cuatro horas para recoger un solo balde de agua:

«De noche y de día, el manantial está siempre ocupado por recipientes y gente» —dice Jhuma Shrestha, una lugareña que espera en la fila—. «Dependemos del manantial solo para el agua de beber. Para lavar, bañarnos y darle agua a los animales, vamos al arroyo Khahare, que está lejos».<sup>18</sup>

Algunas investigaciones demuestran que, ante la carencia de agua, las mujeres perciben los inconvenientes que les ocasiona para la subsistencia familiar y personal, mientras que los hombres tienen en cuenta solamente los problemas productivos como si no necesitaran el agua para comer, hidratarse o higienizarse. Pero el uso diferenciado del agua en función del género también se puede identificar en las tareas asignadas al trabajo productivo. Así mientras las mujeres la usan en la cría de animales pequeños y cultivo de la tierra para obtener alimentos, los hombres del medio rural necesitan agua para el riego y la cría de animales más grandes, aunque además sean ellas las encargadas del ganado lechero y de los animales jóvenes.

En la región del Chaco Paraguayo, las mujeres de las comunidades indígenas también son las encargadas de la búsqueda de agua. En épocas de sequía ellas caminan grandes distancias para la obtención de agua y realizan pozos en su búsqueda si se secan los que ya había. Estas mujeres además conocen los peligros y enfermedades que puede ocasionar el mal estado del agua. Todo esto se traduce en el aumento desproporcionado de horas dedicadas a las tareas domésticas, no solo por la gran cantidad de tiempo que les demanda la obtención, sino también el tratamiento del agua para garantizar que esté en condiciones aptas de ser ingerida.

---

<sup>17</sup> Naciones Unidas, 2015.

<sup>18</sup> PNUMA, 2004.

El desequilibrio también se da porque como están en contacto frecuente con agua de mala calidad, las mujeres están más expuestas a las enfermedades transmitidas por el agua y a la contaminación, como sucedió con el agua del pozo contaminado con arsénico en Bangladesh. El 70 % de los ciegos del mundo son mujeres que se han infectado, directamente o a través de sus hijos, por el tracoma, una infección ocular bacteriana que causa ceguera y que afecta a comunidades con acceso limitado al agua. Aun cuando las enfermedades transmitidas por el agua no afecten a las mujeres personalmente, estas ven aumentar su volumen de trabajo al tener que cuidar de los enfermos.<sup>19</sup>

El Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente ha identificado que en algunas zonas montañosas de África oriental las mujeres gastan hasta el 27 % de su ingesta calórica en la recolección de agua. En las zonas urbanas de África mujeres y niñas se ven obligadas a hacer fila durante horas mientras esperan entregas intermitentes de agua, lo que les resta tiempo para otras actividades, como la educación, la generación de ingresos o actividades culturales y políticas.<sup>20</sup>

En las grandes ciudades la obtención de agua también puede representar un problema. El crecimiento urbano desmedido y la reorganización espacial de las ciudades contemporáneas han llevado a una gran concentración de población en grandes urbes en todo el planeta. El 55 % de la población mundial vive en ciudades y se estima que lleguen al 66 % en el 2050. Las ciudades ocupan el 2 % del territorio total sin embargo concentran el 70 % del Producto Bruto Interno del mundo, consumen el 60 % de la energía global, emiten el 70 % de los gases de efecto invernadero y generan el 70 % de los residuos globales.<sup>21</sup> La desigualdad social es una de las características más notorias de las ciudades en todo el planeta y la mayoría de ellas cuentan con cinturones de pobreza en que las condiciones de vida y las necesidades básicas para la subsistencia no están aseguradas. Para las personas que habitan estos barrios tales circunstancias se vuelven significativas en relación al vínculo que establecen con los cursos de agua naturales y las actividades productivas y reproductivas realizadas en torno a ellos, que en numerosas ocasiones generan impactos negativos para la población y el medio ambiente. Las condiciones de vulnerabilidad y riesgo

---

<sup>19</sup> *Idem.*

<sup>20</sup> *Idem.*

<sup>21</sup> Naciones Unidas, 2017.

sanitario asociado al agua se refuerzan especialmente sobre mujeres, niñas y niños. Es habitual además que este tipo de asentamientos urbanos carezca de saneamiento, lo que limita las posibilidades de higiene y cuidado personal, así como la prevención de enfermedades asociadas al uso del agua. Los informes internacionales confirman que la cobertura de saneamiento y agua potable crece más lenta que la población urbana, lo que aumenta la brecha de desigualdad de acceso al agua y su uso eficiente.

Las diferentes particularidades de género asociadas al uso del agua se han ido visibilizando progresivamente, abarcando más dimensiones de estudio cada vez. Hoy sabemos que las tareas de abastecimiento del agua que realizan las mujeres en todo el mundo puede convertirse en una tarea peligrosa por varios motivos. Por una parte, caminar varias horas al día cargando grandes recipientes pesados puede ocasionarles graves problemas físicos con el transcurso de los años. Por otra parte, el peligro acecha al estar expuestas a las agresiones sexuales de hombres o ataques de animales salvajes en el largo trayecto que recorren para buscar agua.

Así mismo, organismos internacionales como la OMS o UNICEF han incluido en sus encuestas sobre el uso del agua en los hogares preguntas sobre el tiempo dedicado a recogerla y el uso de instalaciones de saneamiento comparadas con otros hogares. Como se reconoce en sus informes, ambas situaciones afectan de manera desproporcionada a las mujeres y niñas, por lo que se han añadido preguntas sobre sus necesidades específicas en relación con la gestión de la higiene menstrual por ejemplo.<sup>22</sup> El uso compartido de las instalaciones de saneamiento representa un nivel de servicio inferior ya que además de aumentar la exposición a los riesgos para la salud, tiene efectos negativos en la dignidad, privacidad y seguridad, en especial de las mujeres y las niñas entre 15 y 49 años, ya que sus necesidades menstruales demandan un lugar privado para lavarse y cambiarse. Estas dificultades lógicamente se agravan cuando sucede un desastre por la dificultad de contar con saneamiento adecuado durante la emergencia y postdesastre.

Las mujeres deben recorrer largas distancias a pie y encontrar cierta privacidad, a menudo entre arbustos o en el campo, donde su seguridad personal corre peligro. La deforestación y la pérdida de vegetación han agravado la situación al obligarlas a alejarse más de sus aldeas. También en estos trayectos el riesgo de agresión sexual por parte de hombres o ataques de animales aumenta.

---

<sup>22</sup> UNICEF, 2019.

Se sabe que debido a la falta de baños limpios y privados en las escuelas, el 10 % de las niñas en edad escolar de África no asisten a la escuela durante la menstruación o dejan de ir a la escuela cuando llegan a la pubertad, lo que convierte la existencia de instalaciones sanitarias adecuadas en una prioridad fundamental para ellas.<sup>23</sup>

Además, se tiene constancia de que el acceso limitado a saneamiento tras una inundación obliga a muchas mujeres, especialmente a las mayores, a limitar su consumo de alimentos sólidos y líquidos, para evitar tener que encontrar un lugar seguro para hacer sus necesidades fisiológicas, lo cual aumenta la incidencia de enfermedades relacionadas con infecciones en las vías urinarias.<sup>24</sup>

Esta asimetría de roles y las dificultades en el acceso al agua tienen un impacto negativo para las mujeres al generarles una carga de trabajo extra y colocarlas en una situación de especial vulnerabilidad, especialmente a las más pobres y del ámbito rural. Como desarrollaremos en el siguiente apartado, en el caso de los desastres asociados al agua la brecha de género opera en una doble dimensión. Por una parte, la vulnerabilidad social que enfrentan las mujeres aumenta el impacto negativo de la catástrofe al dificultar sus posibilidades de evacuación y supervivencia durante el desastre y de recuperación en la fase postdesastre; por otra parte, un evento de esta magnitud compromete aún más sus condiciones de vida, incrementando la brecha inicial.

#### **LA PERSPECTIVA DE GÉNERO EN EL ESTUDIO DE LOS DESASTRES ASOCIADOS AL AGUA**

Como ya hemos adelantado, las relaciones de género están muy presentes a lo largo de todas las fases de los desastres, a pesar de lo cual su estudio apenas comenzó a desarrollarse en épocas recientes. Hasta los años noventa del siglo pasado, el abordaje científico sobre los desastres ha estado marcado por un enfoque que los concebía como fenómenos «naturales» y en el que primaba una mirada «técnica», propia de la gestión de emergencias, infraestructuras, y aspectos similares. La inicial invisibilidad de las mujeres en esa producción académica ha estado propiciada por la consideración del fenómeno catastrófico como un evento inevitable, ajeno a la intervención humana, que irrumpe en la cotidianidad y al que hay que enfrentar de forma inmediata. Tanto la inevitabilidad como la urgencia favorecieron la idea de que incorporar el género, o

---

<sup>23</sup> PNUMA, 2004.

<sup>24</sup> PNUD, 2006.

bien no era relevante, o bien era un «lujo» que podía esperar hasta el final de la emergencia. La gestión del desastre es además un área de intervención tradicionalmente militarizada y técnica, en la que los ejércitos y la industria ingenieril, instituciones masculinizadas por excelencia, tienen un rol protagónico, lo que contribuye a que las mujeres no hayan sido tenidas en cuenta. Pero esto no quiere decir que las intervenciones que ignoran a las mujeres sean neutras en términos de género. Por el contrario, suelen favorecer la reproducción de las desigualdades y reforzar los estereotipos que las consideran débiles y pasivas, necesitadas de ayuda y protección por parte de los varones.

A partir de la década de los noventa del siglo xx las investigaciones comienzan una transición hacia la dimensión social del desastre, lo que facilitó incorporar el enfoque de género, inicialmente acotado a la vulnerabilidad de las mujeres. En la última década del presente siglo, esta mirada se ha ampliado incorporando además el análisis de las capacidades de las mujeres, incluida la resiliencia y los procesos de liderazgo y empoderamiento femenino.

#### *El enfoque de la vulnerabilidad*

Este primer enfoque centró su estudio en la mayor precariedad de las mujeres a la hora de afrontar el desastre como consecuencia de la desigualdad estructural de género. En concreto la literatura especializada ha llamado la atención sobre la mayor vulnerabilidad física, económica y social de las mujeres durante el desastre y en el postdesastre que desarrollamos a continuación. En relación con estas tres dimensiones, se han identificado algunos recursos claves para la supervivencia y recuperación tras el desastre en los que las mujeres no tienen garantizado un reparto y acceso equitativo, comprometiendo sus condiciones de vida en la fase posterior a la emergencia.<sup>25</sup>

- Ingresos, ahorros, crédito, seguros.
- Tierra, ganado, herramientas.
- Empleo seguro; experiencia laboral.
- Salud y nutrición; seguridad alimentaria.
- Vivienda apropiada y segura.
- Educación funcional; habilidades burocráticas.
- Fuertes redes familiares.
- Baja tasa de dependencia adulta en el hogar.

---

<sup>25</sup> Bradshaw y Arenas, 2004.

- Acceso a transporte público o privado.
- Tiempo.
- Redes sociales; integración comunitaria.
- Poder político e influencia.
- Poder en el hogar; acceso y control de los recursos del hogar.
- Acceso a los recursos de emergencia (información, refugios).

En lo relativo a la dimensión física de la vulnerabilidad, sabemos que en promedio mueren más mujeres que hombres o lo hacen a una edad más temprana que ellos. Aunque existen excepciones como el caso del huracán Mitch que azotó Centroamérica en 1998 en el que murieron más varones, hay otros en los que la cifra de mujeres víctimas llega a duplicar la de hombres, e incluso organismos internacionales han planteado que el riesgo de muerte ante un desastre es catorce veces mayor en mujeres.<sup>26</sup> De hecho, como consecuencia del tsunami asiático de 2004, en algunas regiones de la India el 80 % de las víctimas mortales fueron mujeres. El género está en el trasfondo de estos datos, porque las mujeres arriesgan su vida tratando de salvar otras, al estar socializadas en «el ser para los otros» tan vinculado a los cuidados; por no saber nadar, ya que su movilidad restringida al ámbito doméstico limita este tipo de destrezas de supervivencia en zonas propensas a las inundaciones; o por no tener un vehículo propio con el que escapar del peligro, muy relacionado con el proceso de socialización del ejemplo anterior y además con su empobrecimiento económico. De acuerdo con Naciones Unidas las mujeres y las niñas en todo el mundo tienen una tarea abrumadora, personal y profesional, con el cuidado de los niños, las tareas domésticas, las personas mayores y las personas con discapacidad, y por eso a menudo son las últimas en salir. Entonces, las decisiones simples que salvan vidas, como decidir cuándo y si evacuar un área de desastre, se convierten en una elección difícil.<sup>27</sup>

Las investigaciones han señalado así mismo que cuanto más fuerte es el desastre –por el número de personas muertas en relación con el tamaño de la población–, más fuerte es este efecto en la brecha de género en la esperanza de vida. Es decir, las grandes calamidades provocan impactos más severos en la esperanza de vida femenina, en relación con la de los hombres, que los desastres más pequeños. Además, cuanto más alto es el nivel socioeconómico de las mujeres, más débil es este efecto sobre la brecha de género en la esperanza de

---

<sup>26</sup> PNUD, 2010.

<sup>27</sup> UNISDR, 2019.

vida. Estos impactos diferenciados sobre la salud e integridad física y mental de las mujeres vienen a reforzar los llamados sobre la necesidad de incorporar la igualdad de género también en la agenda global de salud.<sup>28</sup>

Vinculado con esta dimensión física de la vulnerabilidad, el aumento de la violencia hacia las mujeres después de inundaciones, huracanes o tsunamis es uno de los temas que más aportaciones ha recibido desde los estudios de género y desastre. Por ejemplo, algunos trabajos sobre los impactos del huracán Mitch a su paso por Centroamérica en 1998 plantean que si bien la violencia de género ya existía en los hogares con anterioridad al evento, las condiciones en que queda la población tras la catástrofe conllevan que ese tipo de maltrato en la pareja sea más visibles al quedar expuesta al ámbito público en los albergues o campamentos provisionales.<sup>29</sup> En otros casos, se han estudiado los efectos tras el tsunami de Asia de 2004 y se ha constatado un aumento de la violencia hacia las mujeres relacionada con la manifestación masculina de la frustración.<sup>30</sup> Otras autoras muestran que la destrucción y condiciones materiales en las que quedó la mayoría de la población en los países asiáticos tras el paso del tsunami promovió prácticas y arreglos de pareja peligrosos. Algunas mujeres se apresuraron a casarse para garantizar un sustento económico y otras familias vendieron a sus hijas a hombres mayores con el mismo propósito, fenómeno denominado *bodas del tsunami* por el aumento notorio de casamientos tras la catástrofe.<sup>31</sup> Estas relaciones asimétricas expusieron a las mujeres a la amenaza de sufrir violencia de diversa índole. La violencia sexual en los campamentos transitorios también ha quedado evidenciada a través de un estudio realizado tras la tormenta tropical Washi en Filipinas a raíz del *babyboom* que se registró en uno de los albergues y que fue denunciado por las agencias internacionales.<sup>32</sup> Otro ámbito de violencia contra las mujeres vinculado a los desastres es el aumento de la trata y explotación sexual, como por ejemplo ha sucedido tras las inundaciones en Bangladesh. En este país se identificó un aumento del comercio sexual de mujeres y niñas desde el sur afectado por los ciclones Sidr y Aila hacia el norte en la ciudad de Dhaka. La falta de oportunidades y el empobrecimiento de las familias tras las catástrofes, unido al crecimiento de la denominada *industria del turismo sexual* contribuyeron al aumento de estas

---

<sup>28</sup> Davies *et al.*, 2019.

<sup>29</sup> Clemens, 1999.

<sup>30</sup> Fisher, 2010.

<sup>31</sup> Hyndman, 2008.

<sup>32</sup> Albuero Cañete, 2014.

situaciones de violencia extrema.<sup>33</sup> Además, dado que la catástrofe dificulta el acceso al agua potable, su recolección a cargo de mujeres y niñas incrementa el riesgo de agresión sexual. Incluso el tiempo de espera en la cola para el suministro aumenta la probabilidad de sufrir acoso por parte de los hombres, como se ha evidenciado en la India. En Etiopía se tiene constancia de violaciones durante el trayecto de recogida, pero también de agresiones por las disputas sobre el agua en las colas de avituallamiento. El estrés generado por conseguir agua aparece como un factor que incrementa la violencia doméstica sobre las mujeres, como se ha evidenciado en Pakistán y México.<sup>34</sup>

En cuanto a la dimensión material de la vulnerabilidad, el análisis de género ha revelado que los perjuicios económicos y demás secuelas derivadas de las inundaciones, la construcción de represas y la contaminación del agua afectan en forma desproporcionada a las mujeres. En concreto, el impacto económico se relaciona con el hecho de dedicar mayor cantidad de tiempo a trabajos no remunerados, la pérdida de ingresos o empleo o contar con menores oportunidades para desarrollar actividades productivas. Este aspecto del problema está directamente relacionado con la feminización de la pobreza, lo que explica que sean las mujeres las primeras en perder sus ingresos tras la catástrofe, como por ejemplo sucedió con el ciclón Nargis a su paso por Myanmar en 2008, el cual provocó que el 87 % de las mujeres solteras y el 100 % de las casadas perdieran su fuente de ingresos.<sup>35</sup> Este resultado a su vez retroalimenta las tasas de pobreza femenina, incrementando la brecha de género.

El mayor empobrecimiento de las mujeres se explica también por el aumento de las tareas vinculadas al trabajo reproductivo no remunerado. Los momentos de crisis que acompañan los desastres visibilizan la importancia de los cuidados en la emergencia, al aumentar el número de personas que necesitan atención por lesiones físicas, psíquicas o agravamiento de padecimientos anteriores. El hogar, ámbito feminizado por excelencia, se convierte así en espacio central durante las catástrofes. Estas tareas de cuidados recaen tradicionalmente en las mujeres, lo que les impide reincorporarse al trabajo productivo. Además, las mujeres son las principales responsables de la alimentación familiar durante los desastres (por ejemplo hambrunas provocadas por sequías u otros fenómenos similares). También son ellas quienes suelen estar al frente de la gestión de la comida en los albergues transitorios tras un desastre. En nuestra investigación

---

<sup>33</sup> Van der Gragg, 2013.

<sup>34</sup> Castañeda *et al.*, 2020.

<sup>35</sup> Ayales *et al.*, 2019.

realizada en el marco del proyecto GENDER, tras el tsunami de Chile en 2010, las mujeres de una comunidad costera de la provincia de Concepción relataron que el momento inmediatamente posterior al desastre, su primera preocupación fue la de encontrar agua para cocinar e higienizarse. En una situación crítica como el momento inmediato a la catástrofe, la sostenibilidad de la vida se pone en el centro y por eso la obtención de agua resulta prioritaria.

Esta dimensión material y económica de la brecha de género que padecen las mujeres se prolonga en la fase de reconstrucción, pues se tiene evidencia de que los hogares con jefatura femenina enfrentan mayores obstáculos para acceder a los sistemas institucionales de ayuda para el socorro y la rehabilitación, como se constató en el plan de acción de Bangladesh contra las inundaciones de 1991.<sup>36</sup> De igual manera tienen más dificultades que los hombres a la hora de obtener préstamos gubernamentales para recuperar sus empresas, ya que su reciente incorporación al ámbito crediticio y empresarial no ofrece garantías suficientes.

Algunos ejemplos tomados de Naciones Unidas ilustran estas particulares dificultades que afrontan las mujeres:<sup>37</sup>

- En zonas propensas a la sequía, las mujeres invierten más tiempo y energía en recolectar agua, lo cual afecta el tiempo que pueden dedicar a actividades productivas
- Tras una inundación aumenta la carga de trabajo para las mujeres, ya que junto con las tareas rutinarias tienen que realizar las labores extra de reparación, limpieza y mantenimiento de las viviendas, tradicionalmente feminizadas.
- Las mujeres del medio rural sufren una pérdida de ingresos cuando las inundaciones destruyen sus tierras, semillas almacenadas y animales.
- Las familias pueden verse obligadas a vender activos familiares o empeñar las joyas de las mujeres.

A lo anterior cabe añadir otro aspecto de la vulnerabilidad material que acompaña tanto a la desertización como a las inundaciones, dos tipos de desastres relacionados con el agua que se han incrementado como consecuencia del cambio climático. Nos referimos a las expulsiones del territorio y desplazamientos forzados de la población en búsqueda de nuevos medios de vida, los cuales han recibido el nombre de *migraciones climáticas*, una subcategoría de la migración

---

<sup>36</sup> PNUMA, 2004.

<sup>37</sup> PNUD, 2006.

medioambiental. Algunos datos apuntan a que cada segundo una persona abandona su hogar y solo en 2015, a nivel mundial, 19 millones fueron desplazadas como consecuencia de desastres climáticos, sin incluir la sequía, la elevación del nivel del mar o la degradación ambiental de inicio lento. En 2016 el 98 % de los nuevos desplazamientos asociados a desastres han tenido relación con tormentas, inundaciones y similares riesgos relacionados con el clima.<sup>38</sup> Y si hablamos de migraciones internas (no internacionales), las cifras apuntan a que más de 143 millones de personas se verán forzadas a ellas hasta el año 2050. En América Latina y el Caribe, comunidades de Costa Rica, Honduras, Guatemala, El Salvador y México identificaron como las principales amenazas que fuerzan sus procesos migratorios las sequías (20 %), los deslizamientos (16 %) y las inundaciones (13 %), fenómenos todos ellos en los que el agua desarrolla un papel central.<sup>39</sup>

En la mayoría de los casos quienes emigran son los hombres –maridos o hijos mayores– con el compromiso de enviar dinero para el sustento familiar. En estos casos, el número de hogares con jefatura femenina aumenta considerablemente, debiendo gestionar la miseria y hambruna en la que queda el resto de la familia. En el nordeste de Brasil se ha acuñado la expresión *viudas de la sequía* para denominar a las mujeres que quedan en esta situación.<sup>40</sup> A menudo se observa que estas mujeres suelen sacrificar su propia salud, postergando ingestas para alimentar al resto de integrantes de la familia. A esto se agrega una sobrecarga de trabajo por las tareas reproductivas y domésticas, así como las pocas actividades productivas que les puedan generar ingresos. A menudo se tienen que hacer cargo del manejo de las parcelas, con la inseguridad que implica no ostentar la titularidad de la tenencia o carecer de acceso a recursos esenciales para su gestión. En ocasiones terminan trabajando para el gobierno en labores de socorro relacionadas con la sequía, que se caracterizan por ser especialmente duras e impactar sobre su salud.<sup>41</sup>

Pero cada vez con más frecuencia son las mujeres quienes se ven forzadas a iniciar procesos migratorios en busca de empleo en el sector agrícola cuando la incertidumbre por las lluvias o las sequías amenaza las cosechas. Una campesina guatemalteca lo resume así: «Las siembras levantan el ánimo. Aquí hay sequía y no hay agua o cae mucha agua». La misma idea es desarrollada por una agricultora salvadoreña:

---

<sup>38</sup> Ayales *et al.*, 2019.

<sup>39</sup> *Idem.*

<sup>40</sup> De Souza, 1995

<sup>41</sup> PNUD, 2006

El cambio climático afecta al agua: antes encontrábamos nacimientos de agua, pero ahora es mucho más complicado, hay que buscarla muy profundo o caminar más lejos para encontrarla. También afecta a los cultivos y al ganado. Hay escasez de alimentos y perdemos el trabajo. Sembramos y no cultivamos nada.<sup>42</sup>

La feminización de las migraciones se está incrementando además porque las mujeres tienen mayores opciones laborales para encontrar un empleo en el sector doméstico, insertándose en la denominada cadena global de cuidados (o en el peor de los casos en las redes internacionales de explotación sexual cuando su última opción es la prostitución). A la par, con este fenómeno se abren otros mercados por el género como son las maternidades transnacionales, en referencia al sostenimiento por parte de las migrantes del rol materno desde la distancia –con la ayuda de otras mujeres de su familia– mientras se encargan de las tareas de cuidados en otros hogares para los que trabajan:

Cuando las mujeres son las que migran, los hombres no son los que cuidan el núcleo familiar sino las mamás de las mujeres. Entonces causa una doble carga: mujeres adultas con su propia familia y trabajo, y además cuidando a los hijos de la hija.<sup>43</sup>

Otras veces el proceso migratorio como consecuencia de las sequías recae sobre las hijas mayores de la familia, quienes buscan garantizar un puesto de trabajo en el servicio doméstico en la ciudad más cercana. Las experiencias de las jóvenes que deben emigrar en estas condiciones, muchas veces las expone a nuevos riesgos vinculados a la vida en la ciudad. El trabajo doméstico en régimen de dependencia en casas particulares a menudo está fuera del control de las leyes sociales y la regulación laboral, y por tanto expuesto a posibles abusos sexuales por parte de los patrones, si se tiene en cuenta que en la mayoría de los casos son mujeres jóvenes, rurales o indígenas.

Por último, la vulnerabilidad social de las mujeres se relaciona con el hecho de estar excluidas en la toma de decisiones y por tanto tener menor capacidad de incidencia en la dimensión organizativa tras el desastre, a pesar de que sus conocimientos y aportes resulten fundamentales a nivel comunitario en esa fase. Aunque ha sido la dimensión de la vulnerabilidad menos estudiada, existen

---

<sup>42</sup> *Idem.*

<sup>43</sup> *Idem.*

ejemplos que muestran que esta ausencia de las mujeres en los espacios representativos refuerza su discriminación y aumenta las desigualdades de género. Además, en lo relativo al agua, algunos trabajos apuntan a problemas relacionados con la educación o conflictos por su abastecimiento, como por ejemplo:<sup>44</sup>

- Las sequías que se prolongan durante varios años pueden impactar en las tasas de abandono escolar temprano, incrementando más si cabe la brecha educativa que sufren las niñas en países empobrecidos.
- En las áreas afectadas por inundaciones, las escuelas permanecen cerradas hasta que las aguas vuelven a su cauce, mientras que las situadas en zonas altas son utilizadas como albergues temporales, lo que implica una interrupción del ciclo escolar en el que de nuevo las niñas están en desventaja.
- En zonas propensas a sequías está documentado el aumento de los conflictos entre las mujeres durante las colas para recolectar agua, lo que tiene un impacto negativo en las relaciones sociales de sus comunidades.

Siguiendo con esta dimensión social de la vulnerabilidad de las mujeres antes del desastre, se han identificado como principales factores los siguientes: la falta de educación sobre desastres, medidas insuficientes de protección contra desastres y problemas culturales. A lo anterior habría que añadir otros factores que contribuyeron a aumentar dicha vulnerabilidad, tales como la falta de coordinación entre las agencias de reducción del riesgo de desastres. Entre los factores de vulnerabilidad social postdesastre estarían la gestión inadecuada del riesgo, el deficiente acceso a agua potable, el acceso interrumpido al transporte y la inaccesibilidad a las instalaciones de salud.<sup>45</sup>

Para concluir este apartado, es necesario identificar la naturaleza multidimensional de los componentes de la vulnerabilidad y su estrecha relación con la interseccionalidad comentada más arriba. En este sentido la literatura especializada ha llamado la atención sobre la necesidad de completar el enfoque de género con el interseccional, ya que se ha constatado que cuando el hecho de ser mujer se cruza con otros factores, como la edad, la pobreza, el origen étnico, la discapacidad o la residencia rural, entre otros, aumenta el riesgo ante la catástrofe.<sup>46</sup>

---

<sup>44</sup> *Idem.*

<sup>45</sup> Hamidazada *et al.*, 2019.

<sup>46</sup> Van der Gragg, 2013; Faiz y Michaud, 2000.

*El enfoque de las capacidades*

Un enfoque centrado únicamente en la vulnerabilidad de las mujeres propicia su victimización, por lo que resulta limitado y escasamente transformador. De ahí la necesidad de evolucionar hacia el enfoque de las capacidades, permitiendo poner el acento en la agencia femenina y su condición de sujetos activos a la hora de afrontar la catástrofe. Aunque no ha alcanzado el nivel de producción científica del primero —más presente en las investigaciones sobre el tema— esta idea permitió completar los análisis sobre el importante papel que juegan las mujeres durante la emergencia y en los cambios que pueden generar en las futuras condiciones de vida, tanto personales como colectivas, tras la catástrofe. En este contexto, las capacidades no son necesariamente la otra cara de la vulnerabilidad, sino que se refieren a las aptitudes y habilidades de cada persona para protegerse a sí misma y a su entorno, aunque se mantengan sus condiciones de vulnerabilidad. Por ejemplo, ante una catástrofe ambiental una mujer puede desarrollar la capacidad de liderazgo en su comunidad, pero seguir viviendo en condiciones de vulnerabilidad material por las características de su vivienda.

Cabe mencionar, sin embargo, que, aunque este enfoque está ampliamente aceptado entre los organismos internacionales y las instituciones tomadoras de decisiones, tampoco está exento de cuestionamientos. Porque centrarse en la agencia de las mujeres y en sus capacidades como «agentes de cambio» de su comunidad puede conllevar una feminización de la responsabilidad. Además, los posibles procesos de empoderamiento no siempre garantizan alcanzar el objetivo de transformar las relaciones de poder entre hombres y mujeres, especialmente cuando son iniciados «desde fuera» y no por las propias mujeres.

Sea como fuere, sus aportes contribuyen a visibilizar aspectos todavía poco explorados en relación con los conocimientos y experiencia de las mujeres en lo relativo al uso y la gestión de los recursos hídricos, que deberían ser tenidos en cuenta. En esos momentos de escasez de alimento y agua, las mujeres demuestran capacidades desarrolladas a través de la construcción social de los roles de género, que resultan determinantes en la etapa del postdesastre. En este sentido algunos trabajos muestran, por ejemplo, la labor de las mujeres del movimiento *Chipko* en la India para conservar la capacidad de ahorro de agua de sus bosques, enfrentándose a los contratistas para impedir la tala de árboles. En ese mismo país, el movimiento *Narmada Bachao Andolan* (Salvemos el Narmada), encabezado por mujeres, ha luchado durante años para impedir la construcción de una represa que pondría en peligro el río Narmada. Similares

experiencias se encuentran en el corredor seco centroamericano, donde campesinas salvadoreñas han llevado a cabo otros procesos de gestión sostenible en relación con el entorno acuífero:

El río estaba en un chorrito. Nos organizamos en la comunidad para iniciar un proceso de limpia y avivamos el nacimiento. Volvió el río como estaba antes. También se recuperaron los peces y el camarón.<sup>47</sup>

La dimensión social de estas capacidades también está presente, a pesar de que como vimos las mujeres no suelen estar en los lugares de toma de decisión, de representación política o ejecución de políticas vinculadas a la gestión del agua o gestión del riesgo de desastres o asistencia. Por ejemplo, en la mayoría de las comunidades pequeñas, las redes de sostén que tienen las mujeres entre familias y vecindario suelen ser un factor determinante tanto para ponerse a salvo de una emergencia como para sobrevivir en la etapa posterior a la catástrofe. A ese respecto, las redes comunitarias de latinas migrantes fueron de vital importancia para recopilar información, tomar decisiones y acceder a recursos tras el huracán Katrina en Estados Unidos. Las mujeres son quienes las mantienen con mayor periodicidad y a lo largo del tiempo, que suele ser un factor que contribuye a mejorar las capacidades comunitarias para enfrentar las inundaciones y demás daños generados por el huracán.<sup>48</sup>

Además, cuando los riesgos climáticos provocan la migración masculina comentada más arriba, son las mujeres quienes se quedan al frente de las familias lo que en ocasiones puede propiciar procesos de empoderamiento y liderazgo femenino positivos en términos de igualdad de género. Un ejemplo de esta transformación de los roles de género por parte de las mujeres se ha dado en el nordeste de Brasil, donde la feminización rural como consecuencia de la sequía dio pie a movimientos de ocupación de tierras para asegurarse un sitio en el que cosechar y asegurar el alimento.<sup>49</sup>

Una de las capacidades que más atención ha acaparado recientemente ha sido la de resiliencia, entendida como «las habilidades y capacidades de los actores para amortiguar el impacto de un daño o perjuicio».<sup>50</sup> Aunque tiene una dimensión técnica, vinculada a las capacidades tecnológicas con las que cuenta

---

<sup>47</sup> Ayales *et al.*, 2019.

<sup>48</sup> Messias *et al.*, 2012.

<sup>49</sup> De Souza, 1995.

<sup>50</sup> Fernández *et al.*, 2020: 12.

una comunidad para hacer frente a un desastre y recuperarse con mayor o menor rapidez de sus impactos, habitualmente hace referencia a una dimensión humana, de carácter psicológico, tanto en un plano individual como colectivo. En este sentido es entendida como capacidad para tomar decisiones, actuar y organizar y emprender procesos de ayuda efectivos. Pero a pesar de su enorme potencial para trabajar los impactos de los desastres desde un paradigma más constructivo y positivo, abriendo nuevas posibilidades poco exploradas hasta la fecha, lo cierto es que sería un error considerar la resiliencia como la tabla de salvación que soluciona todos los problemas. Porque podría ser que el término prometa más desde el plano discursivo que desde el práctico. De hecho algunos trabajos ya advierten de su limitado poder transformador a nivel de estructuras sociales y sistemas de opresión.<sup>51</sup> Sin negar los aportes que representa, es necesario entender la resiliencia como un proceso problemático en constante tensión, adaptación y transformación a las nuevas condiciones que se generan tanto a nivel individual como colectivo, y en el que las relaciones de poder no están ausentes.

#### **LA AGENDA INTERNACIONAL SOBRE EL AGUA Y LOS DESASTRES DESDE LA PERSPECTIVA DE GÉNERO**

Además de conocer cómo se ha venido investigando el vínculo entre agua, desastres y género, es interesante saber cómo esos aportes han trascendido a los marcos regulatorios sobre el tema, elaborados desde las instancias internacionales a través de los acuerdos mundiales entre los Estados. Como hemos visto nos encontramos ante un problema de dimensiones planetarias que compromete seriamente la supervivencia y condiciones de vida de muchos millones de personas. Si a eso le sumamos que las perspectivas de mejora son poco halagüeñas a medio y largo plazo, resulta pertinente preguntarse por la respuesta institucional que los gobiernos de los países han previsto para tratar de mitigar sus impactos.

La conservación, uso y acceso al agua forman parte de la agenda internacional que promueve Naciones Unidas desde 1977, cuando se celebra en la ciudad de Mar del Plata, Argentina, la I Conferencia de las Naciones Unidas sobre Agua. De manera paralela, la agenda de igualdad de género promovida a escala mundial surge en la misma década en la Conferencia

---

<sup>51</sup> Fernández *et al.*, 2020.

Mundial de la Mujer celebrada en Ciudad de México en 1975. En el ámbito de los desastres, sin embargo, la I Conferencia Mundial para la Reducción del Riesgo de Desastres se realiza dos décadas después, en 1994 en la ciudad de Yokohama, Japón.

En anteriores estudios hemos analizado la interrelación entre los acuerdos multilaterales en materia de igualdad de género y desastres<sup>52</sup> y los avances conceptuales, así como las dificultades para integrar la perspectiva de género en la gestión del riesgo de desastres. Algo similar se podría afirmar cuando nos acercamos a la agenda mundial del agua. Por ejemplo, en diciembre de 2003 Naciones Unidas aprueba el «Decenio Internacional para la Acción: el agua, fuente de vida 2005-2015», pero la palabra *género* no se menciona en la Resolución que origina esta década y la palabra *mujer* aparece una sola vez al realizar un llamamiento a garantizar la participación de las mujeres en las iniciativas en materia de agua. No obstante, «Género y agua» se constituye en un área temática de interés en el desarrollo de esta agenda mundial a través de la cual se produce gran parte de la evidencia científica necesaria para promover cambios en las acciones políticas que reduzcan las brechas entre hombres y mujeres respecto al uso y acceso al agua.

A medida que se extiende y acepta la idea de desarrollo sostenible, la interrelación de los temas de agua, desastres y género tiene cada vez más relevancia y debería ser tomado en cuenta tanto en las agendas mundiales como en las nacionales, regionales, y locales. Estas ideas se transmiten en gran medida en los Objetivos de Desarrollo Sostenible y la Agenda 2030 adoptada en 2015, en los que se proponen 17 objetivos y 169 metas asociadas para alcanzar el desarrollo actual sin comprometer el desarrollo de las generaciones futuras. La Agenda 2030 parte de la idea que ningún país en el mundo ha alcanzado el desarrollo sostenible y por eso se deben realizar los mayores esfuerzos desde todos los lugares y en todos los niveles. Un breve análisis de esta agenda muestra las dificultades que aún existen para la articulación e integración de las temáticas que nos ocupan de agua, género y desastres.

El objetivo 6 se propone «garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos». Este objetivo tiene seis metas asociadas de las cuales en una sola (meta 2) se menciona de manera explícita a las mujeres y las niñas sobre las que se debe prestar especial atención para el acceso a servicios de saneamiento e higiene. En otro sentido, la meta 1 de

---

<sup>52</sup> Dema y Fernández, 2018.

acceso universal y equitativo al agua potable podría también entenderse que promueve la igualdad de género. Sin embargo, en marzo de 2021 el informe publicado sobre el progreso del ODS 6 no muestra datos desagregados por sexo respecto de esta meta de acceso universal del agua y saneamiento. Este mismo documento introduce una vez la palabra *género*, al asegurar que la participación de las comunidades locales en la gestión del agua ayuda a reducir las inequidades de género sin establecer la manera de lograrlo.<sup>53</sup>

Si observamos el ámbito del género y los desastres, el estudio «La integración de la perspectiva de género en la gestión del riesgo de desastres: de los ODM a los ODS»,<sup>54</sup> que realizamos con anterioridad, encuentra que algunas de las metas asociadas a cuatro objetivos, mencionan los desastres: el objetivo 1 (fin de la pobreza), el objetivo 2 (hambre 0), el objetivo 11 (ciudades y comunidades sostenibles) y el objetivo 13 (acción por el clima).

Este estudio concluye que la agenda de los Objetivos de Desarrollo Sostenible no incorpora de manera exhaustiva las recomendaciones de la literatura especializada en materia de género y desastres. En el presente caso esos cuatro objetivos se pueden analizar respecto de lo que sucede para el caso de los desastres de origen hídrico o hidrometeorológico y la oportunidad de incorporar la dimensión de la igualdad de género. Por ejemplo, la cuarta meta del objetivo 2 (2.4) se propone asegurar la sostenibilidad de los medios de producción de alimentos y la mejora de la calidad del suelo y la tierra frente a las inundaciones y sequías. Tomando en cuenta las explicaciones anteriores respecto de la división sexual del trabajo y el sistema sexo-género respecto de las tareas domésticas de alimentación, higiene y aprovisionamiento que cumplen mayoritariamente las mujeres, estaríamos ante una clara ausencia del género en la vinculación de los desastres asociados al agua.

## REFLEXIONES FINALES

Sea cual sea la causa del desastre relacionado con el agua, y con independencia del tipo de catástrofe que lo genera (natural o humana, de gestación lenta o repentina), la literatura especializada en los estudios de género ha puesto de relieve que en estas situaciones las mujeres corren mayores riesgos que los hombres, al dificultarse sus posibilidades de evacuación y supervivencia como consecuencia de las desigualdades sociales. Además, en el postdesastre

---

<sup>53</sup> UN-Water, 2021.

<sup>54</sup> Fernández y Dema, 2018.

el agua y la brecha de género vuelven a estar presentes por los problemas de abastecimiento que se generan, al ser ellas las responsables de la higiene, salud y alimentación del grupo social y por tanto las principales encargadas del abastecimiento del líquido vital a nivel familiar y comunitario.

Estos impactos diferenciados han ido siendo explorados de forma paulatina por las investigaciones sobre el tema, a través de una transición en el enfoque, que, partiendo de una inicial ceguera de género, ha ido discurriendo desde la vulnerabilidad de las mujeres hacia las capacidades y resiliencia. Hoy una propuesta congruente con los hallazgos identificados a nivel científico hace recomendable incorporar ambas visiones para una completa comprensión de un fenómeno tan complejo como el que nos ocupa.

Sin embargo, a pesar de los importantes avances que desde las ciencias sociales se han hecho para identificar los múltiples aspectos que engloba el problema, su tratamiento desde las instancias políticas y gubernamentales encargadas de su gestión a nivel mundial aún adolece de serios déficits que dificultan una adecuada respuesta desde la perspectiva de género y que con vendría atender a corto plazo en busca de soluciones más equitativas y más sostenibles.

Como vimos, a pesar de que en el imaginario colectivo el desastre parece reducirse al momento justo de la emergencia, lo cierto es que la labor preventiva resulta en este caso de gran importancia, especialmente para la vida de las mujeres. Sin olvidar la fase posterior de reconstrucción y recuperación, en la que ellas vuelven a resultar damnificadas. De ahí la importancia de promover acciones transformadoras en relación a la igualdad de género, concibiendo el desastre como una oportunidad para reducir las brechas entre hombres y mujeres. Dado que a lo largo de todo el ciclo vinculado al desastre el agua juega un papel estratégico, sea como causa de su origen o por los problemas asociados que se derivan en torno a su uso, incorporar la perspectiva de género optimiza la gestión del agua, a la vez que se mejora la condición de vida de las mujeres con el consiguiente efecto positivo para el conjunto de la sociedad.

## REFERENCIAS

ALBURO CAÑETE, Kaira Zoe: «Bodies at risk: “Managing” sexuality and reproduction in the aftermath of disaster in the Philippines», *Gender, Technology and Development*, 18, 1, (2014), 33-51.

AYALES, Ivannia, BLOMSTROM, Eleanor, SOLÍS RIVERA, Vivienne, PEDRAZA, Daniela y PÉREZ BRICEÑO, Paula: *Migraciones climáticas en el Corredor Seco Centroamericano: integrando la visión de género*, Londres: InspirAction/Christian Aid, 2019.

BRADSHAW, Sarah y ARENAS, Ángeles: *Análisis de género en la evaluación de los efectos socioeconómicos de los desastres naturales*, Santiago de Chile: Naciones Unidas-CEPAL, 2004.

CASTAÑEDA CAMEY, Itzá, SABATER, Laura, OWREN, Cate y BOYER, A. Emmett: *Gender-based violence and environment linkages: The violence of inequality*, Gland: IUCN, 2020.

CLEMENS, Petra, HIETALA, Jennifer, RYTTER, Mamie, SCHMIDT, Robin y REESE, Dona: «Risk of domestic violence after flood impact: effects of social support, age, and history of domestic violence», *Applied Behavioral Science Review*, 7, 2, (1999), 199-206.

CUPPLES, Julie: «Gender and hurricane Mitch: reconstructing subjectivities after disaster», *Disasters*, 31, 2, (2007), 155 – 175.

DAVIES, Sara E., HARMAN, Sophie, MANJOO, Rashida, TANYAG, Maria y WENHAM, Clare: «Why it must be a feminist global health agenda», *Lancet*, 393, (2019), 601-03.

DE SOUZA, Deolinda: «Sequía, migración y vivienda. ¿Dónde queda la mujer invisible?», *Desastres y Sociedad*, 5, (1995), 125-137.

DEMA MORENO, Sandra y FERNÁNDEZ SAAVEDRA, Ana Gabriela: «La inclusión de la perspectiva de género en la gestión del riesgo ante desastres naturales. Marco institucional internacional y regional para América Latina y Caribe», C. Lázaro Guillamón (ed.): *Género y Desarrollo*: Castellón: Universitat Jaume I, 2018, 131-156.

——— «La integración de la perspectiva de género en la gestión del riesgo de desastres: de los ODM a los ODS», *Revista Internacional de Cooperación y Desarrollo*, 5, 1, (2018), 31-43.

FAIZ RASHID, Sabina y MICHAUD, Stephanie: «Female adolescents and their sexuality», *Disasters*, 24, 1, (2000), 54-70.

FERNÁNDEZ, Ana Gabriela, WALDMÜLLER, Johannes y VEGA, Cristina: «Comunidad, vulnerabilidad y reproducción en condiciones de desastre. Abordajes desde América Latina y el Caribe. Presentación del dossier», **Íconos**, 66, (2020), 7-29.

FISHER, Sarah: «Violence against women and natural disasters: Findings from post-tsunami Sri Lanka», *Violence Against Women*, 16, 8, (2010), 902-918.

HAMIDAZADA, Marina, CRUZ, Ana María y YOKOMATSU, Muneta: «Vulnerability factors of Afghan rural women to disasters», *International Journal Disaster Risk Science*, 10, (2019), 573–590.

HERRERA-GARCÍA, Gerardo, EZQUERRO, Pablo, TOMÁS, Roberto, BÉJAR-PIZARRO, Marta, LÓPEZ-VINIELLES, Juan, ROSSI, Mauro, MATEOS, Rosa M., CARREÓN-FREYRE, Dora, LAMBERT, John, TEATINI, Pietro, CABRAL-CANO, Enrique, ERKENS, Gilles, GALLOWAY, Devin, HUNG, Wei-Chia, KAKAR, Najeebullah, SNEED, Michelle, TOSI, Luigi, WANG, Hanmei y YE, Shujun: «Mapping the global threat of land subsidence», *Science*, 371, 6524, (2021), 34–36.

HYNDMAN, Jennifer: «Feminism, conflict and disasters in post-tsunami Sri Lanka», *Gender, Technology and Development*, 12, 1, (2008), 101–121.

MESSIAS, Deanne, HILFINGER K., BARRINGTON, Clare y LACY, Elaine: «Latino social network dynamics and the hurricane Katrina disaster», *Disasters*, 36, 1, (2012), 101–121.

NACIONES UNIDAS: *The World's Women 2015: Trends and Statistics*, Nueva York: United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Statistics Division, 2015.

——— *Nueva agenda urbana*, Quito: Secretaría de Hábitat III, 2017.

PAJARES, Miguel: *Refugiados climáticos. Un gran reto del siglo XXI*, Barcelona: Rayo Verde Editorial, 2020.

PÉREZ DE ARMIÑO, Karlos: *Vulnerabilidad y desastres. Causas estructurales y procesos de la crisis de África*, Bilbao: Hegoa, 1999.

PNUD: *Informe sobre Desarrollo Humano*, Nueva York: Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo, 1995.

——— *Guía de recursos para la transversalización del enfoque de género en la gestión del agua*, Nueva York: Gender and Water Alliance y Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo, 2006.

——— *Género y desastres. Buró de Prevención de Crisis y Recuperación*, Nueva York: Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo, 2010.

PNUMA: *La mujer y el medio ambiente*, Nairobi: Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2004.

UNICEF: *Progress on Household Drinking Water, Sanitation and Hygiene 2000-2017. Special focus on inequalities*, Nueva York: United Nations Children's Fund y World Health Organization, 2019.

UNISDR: *Terminología sobre reducción del riesgo de desastres*, Ginebra: United Nations Office for Disaster Risk Reduction, 2009.

——— *Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction*, Ginebra: United Nations Office for Disaster Risk Reduction, 2019.

UN-WATER: *Summary Progress Update 2021 – SDG6 – Water and Sanitation for All*, Ginebra: United Nations-Water, 2021.

VAN DER GRAGG, Nikki: *Por ser niña: Estado Mundial de las Niñas 2013. En doble riesgo: las adolescentes y los desastres*, Roma: Plan Internacional, 2013.

## X. LA PEQUEÑA GRAN HISTORIA DE OVIEDO Y EL AGUA

**Alejandro García Álvarez-Busto (\*)**, **Luis Valdeón Menéndez (\*\*)**  
y **Cristina García-Hernández (\*)**

(\*) Universidad de Oviedo; (\*\*) GEA Asesoría Geológica

En la historia de los asentamientos humanos, la preocupación por asegurarse un buen suministro de agua potable siempre ha estado presente. En este sentido, Oviedo no iba a ser menos, más si cabe cuando se trata de una población que no se asienta en la ribera de un río, sino que por el contrario ocupa la cumbre de un promontorio de roca caliza. En las próximas páginas nos ocuparemos de identificar y caracterizar los principales episodios de este sempiterno diálogo entre el medio físico y las comunidades humanas que ocuparon y reocuparon la colina de *Ovetao* siglo tras siglo, prestando nuestra principal atención a las pequeñas historias relacionadas con el aprovechamiento del agua de las fuentes, con la excavación de pozos en el manto rocoso para alcanzar los niveles freáticos o con las complejas obras de construcción de kilométricas acometidas de tuberías, primero en barro cocido y más recientemente en hierro fundido, que alimentaban las arcas y los depósitos estratégicamente distribuidos en las cotas más altas de la ciudad. A lo largo de esta pequeña gran historia de Oviedo y el agua, trataremos de establecer un acercamiento de carácter holístico, atendiendo tanto al contexto geológico y geográfico en el que se inserta la ciudad como a la propia evolución histórica de la gestión hidráulica a la que tuvieron que enfrentarse las diferentes comunidades humanas que

habitaron este enclave, las cuales siempre tuvieron problemas para abastecerse de agua. Se comienza así por abordar una visión general del origen del subsuelo rocoso de la ciudad y de la formación de los relieves que la rodean, para pasar a explicar las aportaciones y consecuencias de un clima tan particularmente ligado a la influencia atlántica que ha condicionado el desarrollo y recorrido de arroyos y ríos, lo que en definitiva tuvo repercusiones directas en el tipo y densidad de los asentamientos humanos donde, a pesar de la abundancia del agua de procedencia meteórica, se irán desarrollando todas aquellas «pequeñas grandes historias» que responden a la continua necesidad de sus moradores de procurarse la cantidad de agua necesaria para su supervivencia.



Figura 1. Localización de la ciudad de Oviedo y del concejo del mismo nombre, en el área central de Asturias. Elaboración propia.

## OVIEDO, UNA CIUDAD SIN RÍO. EL CONTEXTO GEOLÓGICO Y GEOGRÁFICO

### *De agua a roca*

El subsuelo de Oviedo y sus alrededores, así como las rocas que conforman todas las elevaciones y sierras que lo circundan, se han originado partícula a partícula acumuladas en medios acuosos. Se formaron paquetes de sedimentos y en su compleja pero conocida evolución, han llegado a formar las potentes rocas sedimentarias que, mucho más recientemente, fueron progresivamente modeladas y suavizadas también por la acción del agua, hasta conformar el terreno actual, el entorno físico que nos rodea.

Resulta llamativo darse cuenta de que muchas de las rocas y materiales del subsuelo que conforman el relieve y el paisaje de Oviedo o Asturias, pero

también de cualquier zona donde afloran rocas sedimentarias, fueron originados casi exclusivamente por la acumulación de minúsculas partículas —otras no tanto— que, con la ayuda del agua, iban desplazándose por laderas y ríos para acabar sumergiéndose a su vez en entornos acuosos. Es decir, que no son sino los restos erosionados de materiales pétreos anteriores, luego procesados y reprocesados en el agua, acumulados y petrificados, procesos que además se han repetido una y otra vez. En definitiva, de forma muy simplificada se puede decir que la formación de rocas sedimentarias empezó con la acumulación de partículas en el agua.

Para transitar entre ideas tan extremas pero reales, hay que comprender la esencia de algunos procesos geológicos. Antes que nada, todo lo que hizo falta para pasar de partículas y fragmentos transitando entre agua a montañas o suelos, una y otra vez, fue tiempo, y la incomprensible magnitud de tiempo disponible desde la formación del sistema solar y la agrupación material de sus planetas, hasta que pudo generarse agua, ya se analiza en otro capítulo de este libro. Ese fue el tiempo disponible que se cuenta en unos pocos miles de millones de años.

Yendo a nuestro entorno ovetense, incluso lo que se puede observar a simple vista desde la propia ciudad, los materiales rocosos más antiguos se formaron hace unos cientos, apenas 400 millones de años, en los retales de rocas devónicas del Naranco. Casi 500 si ampliamos la zona a los afloramientos del municipio, ordovícico al sur de Trubia, y apenas unos 600 si ampliamos al entorno regional, en los terrenos precámbricos de Cangas del Narcea. Ordovícico, Devónico o más adelante Carbonífero no son más que periodos de la era paleozoica, también conocida como *primaria*, precedidos por el Precámbrico. Por tanto, ya podemos hablar de magnitudes de tiempo concretas, unos cientos de millones de años, el tiempo que se necesitó para obtener todos los elementos del relieve cercano con la ayuda del agua. Claro que en este camino de cientos de millones de años han ido actuando y repitiéndose complejos y conocidos procesos geológicos capaces de explicar los relieves actuales y los materiales que los conforman.

En cada gran ciclo geológico se van sucediendo los fenómenos de erosión y arrastre de partículas con la ayuda del agua, actuando en todas sus formas e intensidades hasta que se va logrando el depósito de las partículas en cualquier medio acuoso. Otras veces la síntesis química se genera en el propio medio acuoso de acumulación ayudando, por ejemplo, a cementar partículas preexistentes. Son los procesos de *sedimentación*. Luego se va produciendo el lento y

progresivo endurecimiento de los sedimentos por la pérdida del agua que aún permanece entre sus partículas debido a la acción de la creciente presión y el aumento del calor que resulta de las enormes acumulaciones de materiales. Son los fenómenos formadores de rocas conocidos como *diagénesis*. A partir de aquí, durante estas lentas transformaciones o al final de algunas de ellas, ya con rocas consolidadas, fueron entrando en acción intensísimos y recurrentes fenómenos de compresión mecánica, los originados por las *orogénesis* (literalmente formación de montañas), que son propiciados por la gran inestabilidad de la corteza terrestre, en la que juega un papel primordial la conocida tectónica de placas que se aborda en otro capítulo. Estas inestabilidades no son cosa del pasado, aún continúan en el presente, comparativamente amortiguadas, pero plenamente perceptibles con la irrupción de sismos y erupciones volcánicas que continúan afectando a todas las formas de vida en la Tierra. En el entorno regional y particularmente ovetense, dos grandes ciclos de *orogénesis* han marcado la deformación y disposición final de las rocas a las que afectaron y explican la topografía actual del área. En primer lugar, está la *orogenia hercínica* o *varisca*, que aconteció al final del periodo Carbonífero (300 millones de años) afectando a todos los paquetes de rocas que se habían formado hasta ese momento, como todas las que forman el macizo asturiano de la cordillera Cantábrica. Materiales rocosos que fueron quedando deformados, quebrados, fallados y muchos levantados formando ya entonces un vigoroso relieve, que en el caso del entorno de Oviedo permanece bien visible en las sierras de Naranco y del Aramo.

Mucho después la *orogenia alpina*, que en Europa levantó, por ejemplo, los Alpes y los Cárpatos, pero que se extiende hasta el Himalaya, llegó a afectar al Macizo Asturiano, y constituyó una prolongada serie de cataclismos mucho más recientes, actuando en estas zonas hasta hace 24 millones de años desde unos 65 millones de años atrás. Es decir, se dan dos procesos independientes de intensos pulsos tectónicos, formando montañas y desplazando bloques, pero separados entre sí por más de 200 millones de años.

#### *La formación del relieve*

Una manera sencilla de adentrarse en el origen del relieve, pero también de comprender la evolución histórica de la ciudad de Oviedo, es observar a nuestro alrededor desde alguna de las zonas elevadas de la ciudad. Situados, por ejemplo, en las zonas más elevadas del campus universitario de Llamaquique, ya se perciben algunos rasgos que definen la fisonomía geomorfológica de la

ciudad. Por un lado, la combinación de sobresalientes montañas y sierras que la rodean, y, en el lado contrario, una amplia apertura del paisaje hacia el noreste, a la derecha del Naranco, una característica topografía combinación de montañas y depresiones que en esta zona comienza su evolución cuatrocientos millones de años atrás. Como se ha visto a través de la historia geológica que explica estas dos grandes unidades geomorfológicas, estas se separan en varios millones de años y, aunque son independientes, al final una ha tenido consecuencias sobre la otra. En el medio ha habido importantes acontecimientos ligados a la violenta actividad de la inestable corteza terrestre, y al final la suave modulación del «reciente» periodo cuaternario ha ido suavizando los perfiles y las formas hasta el momento actual y lentamente lo seguirá haciendo.

Hacia el norte, llama la atención sobremanera el perfil elevado del familiar monte Naranco. Nos volvemos hacia el sur y destaca el cogollo del monte Monsacro o la Magdalena, iniciación al montañismo de tantos ovetenses, y pegado a él un poco más hacia el oeste se aleja la imponente silueta de la sierra del Aramo.

Por el contrario, esta parte más moderna (sesentera) de la ciudad se va hundiendo por las calles García Lorca y Santa Cruz, o bien por Pérez de la Sala hasta visualizar allá abajo la torre de la catedral y su entorno urbano, el núcleo primigenio del Oviedo histórico. Más allá, a lo lejos, se van diluyendo las referencias topográficas, ya que se abre una amplia zona despejada, hundida, que, no obstante, aún permite distinguir a lo lejos la sierra del Sueve, la silueta de la sierra de Peña Mayor creciendo desde Nava o incluso, en días claros, las crestas de los Picos de Europa. Todas estas elevaciones referidas comparten un nexo común, y las deprimidas adyacentes a ellas, otro, empezando por los alrededores de Oviedo.

La práctica totalidad de materiales rocosos que ahora forman el Naranco, el Monsacro y el Aramo, así como el resto de las sierras regionales (pero no las del resto de la cordillera Cantábrica) se empezaron a acumular en medios sedimentarios acuosos entre 300 y 550 millones de años atrás, dentro de la era paleozoica y la larga historia de intensos y violentos episodios que los deformó, los de la orogenia hercínica, fue actuando hasta hace unos 300 millones de años sobre la amplia variedad de rocas ya formadas. La serie de cataclismos muy posterior durante los episodios de la orogenia alpina actuó principalmente hasta casi 30 millones de años atrás, reavivando los relieves existentes, regeneración que facilitó en gran medida la existencia de los planos de debilidad (planos de falla o de cabalgamiento) entonces originados.<sup>55</sup>

---

<sup>55</sup> Aramburu *et al.*, 1995.

Los millones de años transcurridos hasta el momento han servido para que los agentes de modelado, muy especialmente los asociados al agua y al hielo, los fueran suavizando, arrasando la topografía de montañas como el Aramo o el Naranco y arrastrando materiales, pendiente abajo, hacia valles y depresiones, pero después de todo forman en este sector parte de la topografía más intrincada de la cordillera Cantábrica.<sup>56</sup>

Menos llamativo, pero de gran influencia en la historia moderna de la ciudad, el abierto paisaje hacia el noreste tiene su propia, independiente y mucho más moderna historia geológica; la de los materiales rocosos incluidos en el llamado *surco de Oviedo*, una estrecha franja de rocas que forma la parte más meridional de otra banda de materiales rocosos de formación mucho más reciente, los de la *depresión mesoterciaria* asturiana. Son 80 km de largo, desde Grado y Oviedo hasta Cangas de Onís, con anchura hasta la costa, desde Gijón hasta Ribadesella. Aun formando relieves más modestos, el paisaje asociado al *surco de Oviedo* incluye suaves elevaciones debidas a los diferentes grupos de rocas cretácicas, principalmente calizas, los de las lomas de Faro, La Rebollada, Rocés o Fozana y Tiñana algo más al este. El recorrido del Nora es el eje fluvial que surca alojado entre los depósitos cretácicos y terciarios que ocupan el subsuelo del *surco de Oviedo* y ha ido dejando en su propia evolución aportes de materiales más sueltos y finos que fueron rellenando su cauce, disponiendo amplias llanuras aluviales que facilitaron la instalación de poblamientos humanos y su aprovechamiento agrícola a lo largo de la historia.

La relación entre los fenómenos más antiguos de formación de montañas y sierras paleozoicas y la apertura deprimida del surco de Oviedo es cuando menos impactante. Es una repetición de acontecimientos geológicos totalmente separados en el tiempo y también de diferente intensidad, pero con repercusiones comunes. Ya se parte de las rocas formadas, levantadas y deformadas que configuran los montes y sierras de viejos estratos paleozoicos. Después, para que se pudiesen constituir las rocas mesozoicas, principalmente las cretácicas (86-100 millones de años) y terciarias, las del periodo paleógeno del surco de Oviedo (30-40 millones de años), fue necesaria la apertura y hundimiento relativo del terreno hasta que fue posible la entrada de los mares de la época en esta zona. Con los mares mesozoicos actuando y la continuada acción de los agentes erosivos sobre el terreno circundante, sobrevino una

---

<sup>56</sup> Muñoz Jiménez, 1982

nueva acumulación de sedimentos en el agua, otra lenta transformación a rocas y nuevas deformaciones tectónicas ocasionadas por la orogenia alpina. Debido a la suficiente distancia del surco al oeste de los principales empujes alpinos, las deformaciones inducidas a las rocas fueron mucho más suaves que las de las paleozoicas precedentes y también lo son los relieves derivados. Sin embargo, los viejos roquedos paleozoicos también se vieron afectados y la existencia de fallas asociadas a ellos fue uno de los principales vehículos que vigorizaron aún más los relieves de las montañas paleozoicas, similares a los que se pueden contemplar hoy, pero aún más acusados y elevados. Finalmente, tras estos episodios de tensión y deformación, se fue produciendo la suavización de los relieves entonces formados hasta los niveles topográficos actuales con el desgaste debido a la meteorización de montañas y cordilleras. Estos nuevos arrastres de materiales erosionados fueron ocasionando el relleno de los valles donde van surcando regatos y ríos, cursos de agua que en su propia evolución van depositando en sus riberas los materiales por ellos arrastrados, en esta zona, cursos como el del Nora o el Noreña, dirigiéndose hacia el contorno de Oviedo, siempre con el agua como vehículo formador y conductor. Tiempo hubo para todo ello hasta hoy.

Esta nueva historia acontecida dentro de las eras mesozoica y cenozoica ha marcado aspectos tan diversos que van desde la apertura paisajística de toda la zona al noreste del Naranco y tras él (Llanera) o la sinuosa conducción del río Nora viniendo desde Sariego, pero también otros más actuales como la misma localización de Oviedo y los acaecimientos de sus habitantes en relación no solo al suministro de agua, sino también al trazado de las infraestructuras viarias modernas que discurren cómodamente por la laxa topografía asociada precisamente a la génesis de la depresión mesoterciaria.

En resumen, a lo largo de apenas unos pocos cientos de millones de años se ha pasado, en dos grandes episodios de historia geológica, de acumulaciones pseudohorizontales de sedimentos inducidos por el agua y depositados en ella, a grandes espesores de rocas sedimentarias, levantadas, rotas y deformadas con diferente intensidad, que en un lento proceso de suavización identifican el paisaje del entorno ovetense y asturiano. Si se amplía la observación directa de la topografía del terreno a la extensión del municipio y zonas circundantes, se aprecia la resaltada topografía que es responsabilidad de las vicisitudes sufridas por las rocas paleozoicas enmarcando la ciudad por el suroeste, el sureste y el norte, casi como un triángulo pétreo con Oviedo en el centro, hundido sobre sus sustratos mesozoicos y terciarios (Figura 2).

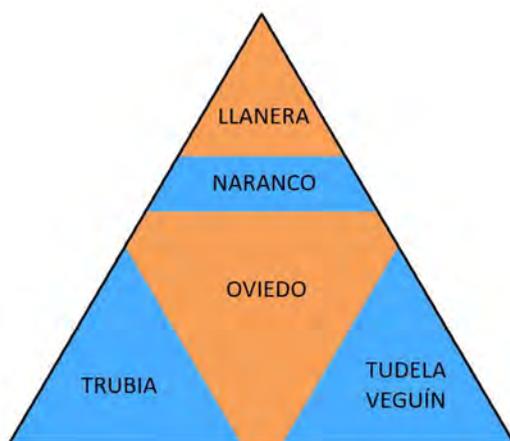


Figura 2. Esquema simplificado que ubica los más recientes materiales mesoterciarios del subsuelo rocoso más deprimido de Oviedo y Llanera, en amarillo, rodeados de las elevaciones de montañas paleozoicas, en azul. Elaboración propia.

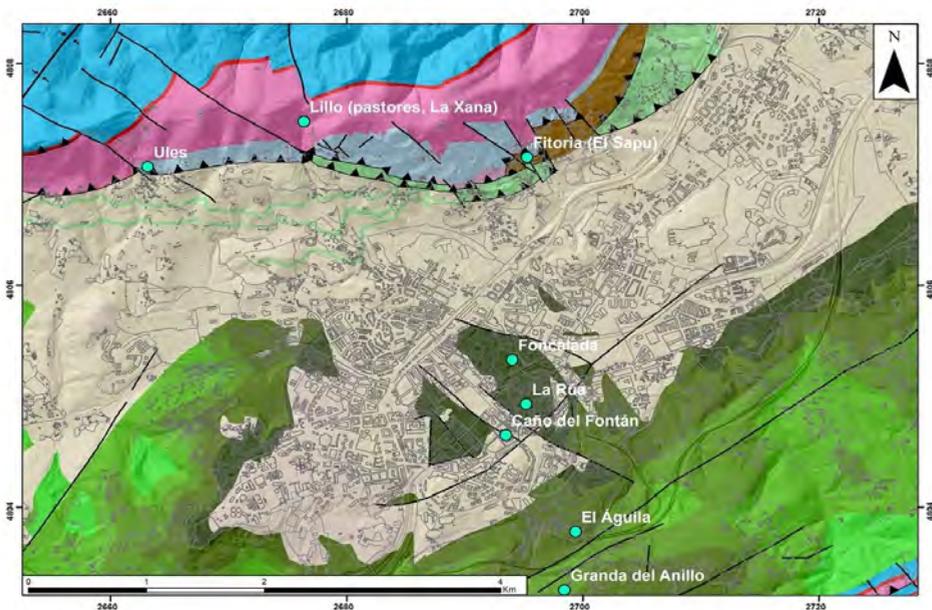
Destaca la topografía más abrupta del vértice suroeste, por ejemplo, desde Fusó de la Reina hasta Trubia, donde afloran formaciones rocosas paleozoicas que vienen con una dirección muy marcada suroeste-nordeste desde la cordillera. Llama la atención precisamente la escasa cota de localidades como Las Caldas o Trubia en este entorno de elevaciones rocosas. Esto es debido directamente al encajamiento que ha ido ocasionado el potente curso del río Nalón, que viene desde el sureste buscando su salida al mar. La resistencia de las rocas al avance del curso fluvial que las aborda perpendicularmente ha ido forzando la cerrada silueta de los meandros de Fusó, Las Caldas o Caces. Por esa razón, el Nalón, viniendo desde Bueño, donde sí ha podido dejar extensas vegas, se topa de frente con el potente paquete de calizas carboníferas que tuvo que ir horadando para dejar al aire el imponente paredón vertical de la Peña Avis tocando la senda peatonal a la altura de Fusó.

En el vértice norte se eleva la silueta del Naranco. De nuevo viejas rocas paleozoicas levantadas sobre el terreno circundante. En su parte más alta se encajan las rocas más antiguas que son visibles desde la ciudad, unas calizas duras y oscuras paleozoicas de la *formación Moniello*, del periodo devónico inferior y medio, unos 400 millones de años edad.

Justo en esa zona, topográficamente por debajo de las calizas devónicas del Naranco, sucede una gran interrupción geológica que tiene un trazado lineal

y une a estos antiguos materiales con los mucho más recientes asociados al ya conocido *surco de Oviedo*. Como se verá más adelante, esta serie de cicatrices de recorrido este-oeste tienen un notable papel en las posibilidades de suministro de agua a Oviedo durante varios siglos, hasta que hubo que recurrir a otras opciones ya a principio de siglo xx. Son los materiales que se van acomodando ladera abajo y con los sustratos rocosos más hundidos donde se aloja la ciudad de Oviedo. La levantada sierra del Naranco deja detrás el área deprimida de Llanera, y es que, en realidad, la evolución del surco mesoterciario se tuvo que adaptar a su abrupta topografía y quedó dividido en dos: Oviedo al sur, Llanera al norte.

Este sustrato rocoso del centro de Oviedo, principalmente unos contundentes bancos casi horizontales de calizas cretácicas amarillas sobre cuya modesta elevación surgió el Oviedo primitivo, y otras blancas más blandas del Eoceno, son precisamente los materiales calizos utilizados para las edificaciones de la ciudad a lo largo de su historia,<sup>57</sup> las más modestas y las más relevantes, y ahí siguen en los muros de iglesias, capillas y palacios, desde el prerrománico hasta el barroco, cuando fueron dejando de utilizarse paulatinamente.



<sup>57</sup> Gutiérrez Claverol *et al.*, 2012.



Figura 3. Principales fuentes históricas de Oviedo en relación a la estructura y materiales geológicos. (entorno geológico y topográfico recopilado a partir de la información geoespacial de: Instituto Geológico y Minero de España IGME-CSIC, instituto Geográfico y Nacional IGN y Sistema de Información Territorial del Principado de Asturias SITPA/IDEAS) (elaboración propia).

Por último, en el vértice sureste del municipio, la entrada y prominencia de rocas paleozoicas puede parecer topográficamente más modesta, pero quedan asociadas al recuerdo de quien hace no tantas décadas haya tenido que salir hacia Castilla cuesta arriba por San Lázaro y San Esteban de las Cruces hasta El Cruce para bajar zigzagueando hasta Tudela de Veguín y las vegas planas que ha ido dejando la actividad del Nalón en el cuaternario hasta Fuso de la Reina. Precisamente las peñas calizas, explotadas todavía como árido para la producción

de cemento de Tudela de Veguín, son consecuencia del alineamiento de calizas paleozoicas carboníferas como las del Naranco (también hiperexplotadas) y a partir de ahí hacia el sur ya empiezan a aparecer las sucesiones rocosas que caracterizan el Carbonífero productivo de las cuencas mineras, otra historia.

En resumen, estas dos grandes unidades morfológicas, muy diferentes y reconocibles, visibles desde Oviedo y comunes a toda el área central asturiana, se fueron creando dentro de esas extensas y bien separadas eras geológicas. La era *paleozoica* o *primaria* y la era *mesozoica* o *secundaria*, a la que se superponen en Oviedo y parte de la depresión mesozoica los materiales rocosos de la era *terciaria*. Dos mundos, literalmente, que han conformado la topografía y el paisaje del entorno ovetense, a la vista de todos.

#### *De la atmósfera a la hidrosfera*

La ubicación de Oviedo (Figura 1) en la franja zonal de latitudes medias ha permanecido invariable desde la era terciaria, hace, al menos, 60 millones de años. Esta posición expone al concejo a la influencia indirecta de dos corrientes de aire que circulan de oeste a este, sobrevolando a gran velocidad y altitud áreas continentales y oceánicas del hemisferio norte: las corrientes en chorro o *jet stream*. El *jet* polar, especialmente potente (puede superar los 350 km/h), se desplaza a unos 8-12 km de altura en las latitudes medias y altas (30-60° N), mientras el subtropical, más débil, lo hace en latitudes medias y bajas (20-30°), a unos 11-17 km del suelo. Oviedo, situado a 43° 21' 70 N, 5° 51' 02 W (Campo San Francisco, centro urbano), se encuentra expuesta a la influencia de ambas corrientes (especialmente a la polar), viéndose afectada por las corrientes ciclónicas que de ellas se desprenden.

Dado que estos fenómenos se producen en el contexto de la dinámica global atmosférica, y que esta se ve directamente afectada por la combinación de factores astronómicos, como el calentamiento inducido por la radiación solar y el llamado *efecto Coriolis*, causado por el movimiento de rotación, junto con otros puramente terrestres como la naturaleza y densidad de los gases que permanecen en la Tierra, podemos decir que dichas corrientes existen tal como las conocemos desde tiempos que se remontan a la actual configuración geológica y biogeográfica (e indirectamente climática), a grandes rasgos, de nuestro planeta. De este modo, el área ovetense está sometida al dominio de la circulación general del oeste, con fuertes vientos en altura que resultan clave para la precipitación, al propiciar la invasión constante de las masas de aire húmedas. En

este sentido, las fluctuaciones del potente chorro polar, que discurre trazando grandes ondas que a veces lo acercan más a nuestra latitud y a veces lo alejan, serán determinantes en la temperatura de esas masas de aire, alternativamente de procedencia polar (por tanto, frías) y subtropical (más cálidas). En cualquier caso, y esto es lo más importante, casi siempre llegarán cargadas de humedad, ya que es frecuente que previamente hayan entrado en contacto con el océano Atlántico, relativamente cercano por el oeste, o bien con el mar Cantábrico, tan solo a 22 km de la ciudad en dirección norte.

Esas masas de aire húmedas afrontarán una serie de vicisitudes antes de descargar el agua que transportan en forma gaseosa, ya que previamente deben formarse nubes mediante el aumento de la humedad hasta alcanzar el «punto de saturación» (100 % de humedad relativa). Posteriormente, se producirá la condensación del vapor de agua en gotas, que se acumularán en torno a núcleos higroscópicos, siendo necesario que existan partículas de polvo en suspensión, y también que la masa de aire se enfríe lo suficiente. Cuando esas gotas ganan el tamaño suficiente uniéndose entre sí, caen por gravedad, es decir, precipitan. Sin embargo, el enfriamiento de la masa de aire es clave en este proceso: sin él, no habrá precipitación. Este enfriamiento se logra de forma muy efectiva con el ascenso de la masa de aire, ya que, con él, se produce una pérdida de presión atmosférica a la que acompaña una pérdida de temperatura. Existe un gradiente térmico altitudinal terrestre que establece que, por término medio, se pierden 0,65 °C por cada 100 metros de ascenso. En el caso del área geográfica en la que se encuentra Oviedo, el gradiente altitudinal calculado es de -0,56 °C por cada 100 metros.<sup>58</sup> Por tanto, el aire tiene que ascender lo suficiente, y para eso se necesitan las montañas. Precisamente por eso, la altitud a la que se encuentra Oviedo, unos 230 m s. n. m. por término medio, resulta relevante, y aún mucho más relevantes son las elevaciones montañosas que se encuentran en su entorno.

La trayectoria ondulada de la corriente en chorro en algunas ocasiones conforma vaguadas que permiten la llegada desde el oeste de borrascas procedentes del frente polar (*situaciones del oeste*), mientras en otras permite que el aire de origen polar se desplace a gran velocidad en dirección sur desde el norte, dándose las llamadas *situaciones norte*. El efecto cruzado entre este tipo de situaciones (norte y oeste, a veces noroeste o suroeste) y la existencia de una serie de relieves montañosos que fuerzan el ascenso de estas masas de aire

---

<sup>58</sup> Muñoz Jiménez, 1982.

cargadas de humedad es el origen de la mayor parte de las precipitaciones que se producen en el área, especialmente en otoño e invierno. Por tanto, la configuración topográfica del ámbito en el que se encuentra la ciudad de Oviedo, ya comentada, condicionará claramente las precipitaciones que allí se producen. Cuando las masas de aire proceden del sur, generalmente la humedad de las mismas es menor, a lo que se añade el *efecto föehn* producido por barreras importantes al sur de Oviedo, como las montañas de la divisoria que en el área central superan a menudo los 2000 m, o la cercana sierra del Aramo. En el extremo opuesto, cuando las masas de aire húmedo proceden del norte, el relieve del Macizo Asturiano, que va ganando altitud desde la costa a modo de rampa, fuerza el ascenso progresivo de las masas de aire y, con ello, facilita especialmente la descarga de lluvias sobre el área en la que se encuentra Oviedo, y mucho más conforme nos acercamos a las montañas de la divisoria, que se encuentran al sur. También debemos tener en cuenta, aunque su efecto sea menor, la influencia que supone la sierra del Naranco (637 m s. n. m. en el Picu Paisanu), que protege a modo de escudo el flanco norte de la ciudad y puede dar lugar a fenómenos localizados de precipitación orográfica de modo que el sector norte de esta sierra sea, con toda probabilidad, uno de los que reciba más agua atmosférica directa del concejo, junto con la sierra de Fayéu al sur.

Así, en Oviedo, las precipitaciones están aseguradas a lo largo de todo el año, superándose por lo general los 1000 mm de precipitación anual. O, al menos, así ha sido desde que existen registros documentales en el observatorio de Oviedo, actualmente situado en el barrio del Cristo y, desde mediados del siglo XIX, en el patio de la antigua universidad. Tanto las cantidades totales de precipitación, que son abundantes, como su reparto equilibrado mes a mes repercuten necesariamente en el régimen hídrico del entorno ovetense. Y ambos factores no parecen haber experimentado cambios importantes en la historia reciente. Si observamos el climograma para el quinquenio 1980-1984 (Figura 4), y lo comparamos con el último quinquenio para el que existen registros (2016-2020) (Figura 5), comprobamos que en el segundo las precipitaciones totales fueron superiores a las registradas 40 años antes (1558 mm frente a 958 mm). Si bien se trata de ciclos cortos de registro, que de ningún modo permiten obtener conclusiones sobre cambios en el régimen climático, llama la atención que, a diferencia del primer periodo, en los últimos cinco años no exista rastro de aridez (por término medio) en ninguno de los meses estivales, a pesar de haberse producido un ligero aumento en las temperaturas medias.

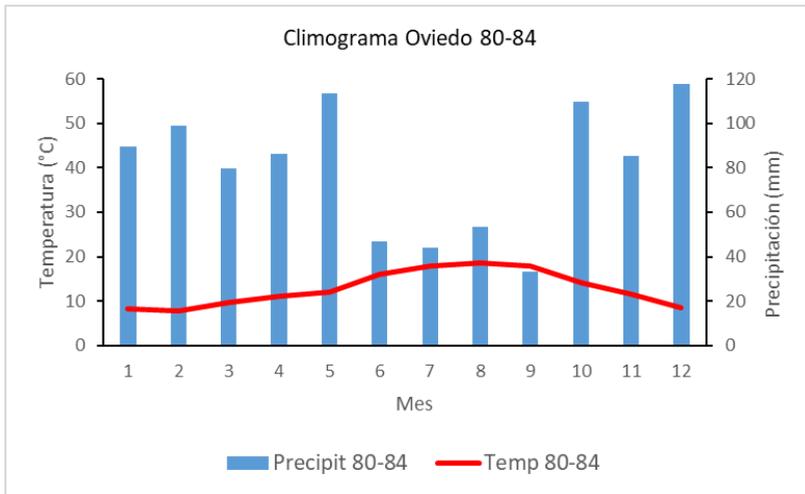


Figura 4. Climograma que muestra las temperaturas medias y precipitaciones totales en los meses de enero a diciembre en el periodo 1980-1984.

Fuente: elaboración propia a partir de datos de AEMET.

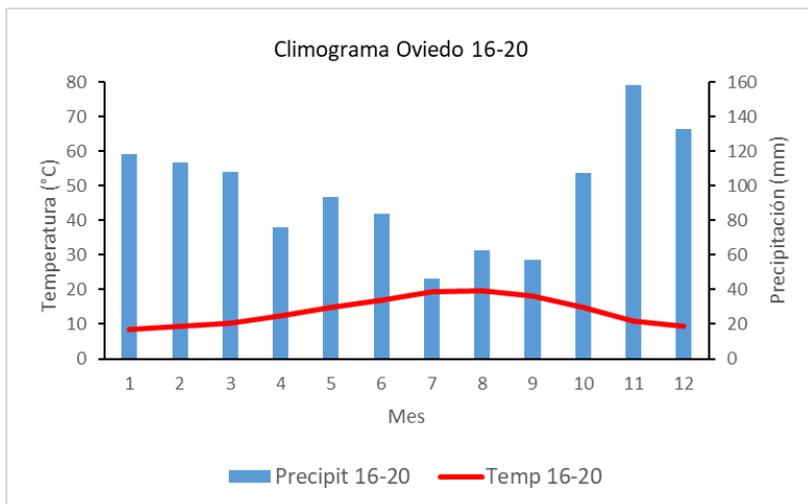


Figura 5. Climograma que muestra las temperaturas medias y precipitaciones totales en los meses de enero a diciembre en el periodo 2016-2020.

Fuente: elaboración propia a partir de datos de AEMET.

Sin embargo, a lo largo de la gran historia de Oviedo es muy probable que se hayan dado cambios en esta circunstancia, existiendo registros paleoambientales a partir de análisis sedimentarios y dendrocronológicos realizados en áreas relativamente cercanas, que evidencian la alternancia continua entre periodos húmedos y secos a lo largo del último milenio.<sup>59</sup>

### *El agua en circulación*

¿Y qué ocurre con toda esa agua que cae sobre la ciudad y su entorno? En primer lugar, debemos tener en cuenta que no toda el agua que circula por Oviedo ha sido precipitada allí. Algunos de los ríos que atraviesan la periferia ovetense han sido alimentados por el agua precipitada en áreas muy extensas y relativamente distantes. Por eso, no solamente debemos considerar el agua atmosférica que toma contacto con el territorio ovetense, sino toda la que se capta en la vertiente norte de las montañas de la divisoria (orla montañosa que nos separa de León), especialmente en su sector central. En este aspecto, las borrascas y penetraciones de aire húmedo procedentes del oeste y del norte siguen siendo protagonistas al dar lugar a precipitaciones que, en la alta montaña del Macizo Asturiano (entre las más elevadas de la península ibérica), se producen en forma de nieve durante el invierno. Una parte importante del agua allí precipitada se canaliza en cursos menores, que van convergiendo hasta tributar en los ríos que, más adelante, desembocarán en el mar Cantábrico. El trazado de los ríos que drenan el territorio del macizo asturiano se configuró con anterioridad al comienzo de las glaciaciones cuaternarias, hace, al menos, unos 2,6 millones de años.

Cuando el río Nalón, que constituye la mayor cuenca hidrográfica de Asturias, atraviesa el sur de Oviedo, ya ha drenado la mayor parte de la escorrentía del área central de la región, beneficiándose de la combinación de factores topoclimáticos ya comentados, que derivan de su particular gran historia geográfica. Otros ríos de entidad que surcan los márgenes del concejo se alimentan de la escorrentía de las sierras que cierran el surco prelitoral hacia el oriente. Es el caso del Nora, un río escasamente competente que se adapta completamente a la estructura, cerrando Oviedo por el noreste, norte y noroeste, razón por la que, históricamente, se ha considerado que su alfoz iba «de Nora a Nora». El río Trubia, por su parte, llega a Oviedo tras desaguar un amplio sector montañoso en torno al cordal de la Mesa, la sierra de Sobia y Peña Rueda. Pero existen en

---

<sup>59</sup> Saz, 2003; Moreno *et al.*, 2011; Pontevedra-Pombal *et al.*, 2019; Castro *et al.*, 2020.

Oviedo otros cursos fluviales de entidad menor, ríos ovetenses que nacen en los contornos de la ciudad y entregan sus aguas, como todos los citados, al Nalón. Entre ellos, destaca el río Maxuca o Llápices de San Cloyo, que canaliza la escorrentía de la vertiente suroccidental del Naranco, y de cuya cuenca forman parte regatos como el de Matarrumia-Ules, Xuste, Llano, la Güerta, Utriellu y la Nora. La otra cuenca ovetense por excelencia es la del río Gafu, que drena el sector septentrional del área de la Grandota (elevación que cierra, al sur, la depresión en la que se encuentra la ciudad). El Gafu se alimenta de las aguas del arroyo Morente, que a su vez recibe las del Aramín y la Ceprosa, de los regatos de la Ensierta y Quintes, y del río de la Cueva, que se une al Gafu ya muy cerca de su desembocadura en el Nalón.

También los grandes ríos que pasan por Oviedo, ya citados, se benefician de la escorrentía local. La vertiente norte de las sierras de Fresnosa y Fayéu, que ponen límite al concejo por el sur y en las que se encuentra el techo altitudinal de Oviedo (Picu Escobín, 714 m), conforman el área de captación ovetense del río Nalón a través de arroyos como el de Fontes Calientes, Forniegos, Tudela, Coruxeo, Frehoso y Fayeu-Loza. También desde La Grandota, pero esta vez en dirección sur, descienden unos cuantos regatos hacia el Nalón, por ejemplo, los de Bendones, Fontesanta y el Castro. En cuanto al Nora, en Oviedo este se nutre especialmente de las aguas que descienden por la ladera norte del Naranco, a través de los arroyos de Quintana, Ruxidorio, Fonsagrada y los Corrales.

### *De la hidrosfera a la biosfera*

Sin embargo, debemos tener en cuenta que no toda la lluvia precipitada en Oviedo va a pasar a formar parte de su escorrentía, es decir, del agua que nutre las corrientes que circulan por su subsuelo y superficie. Esto se debe a que una parte del agua se pierde por evaporación en función de la intensidad de la radiación solar, otra parte se pierde por la transpiración de la vegetación y otra será retenida por el suelo. Por tanto, el agua que llega a circular en los cursos que hasta ahora hemos mencionado es variable en función de los cambios climáticos a nivel local y, como hemos visto, en gran medida también regional. Pero, con toda probabilidad, ha ido variando a lo largo de la historia del concejo debido a los cambios inducidos en la vegetación y, especialmente, en los suelos. Pensemos que una parte importante de los suelos naturales ha sido progresivamente modificada. Primero levemente, abriendo espacios para el cultivo y el pasto en los bosques que cubrían la mayor parte del concejo. Posteriormente, de forma

más drástica e irreversible, arrancando los suelos naturales y sustituyéndolos por superficies artificiales como parte del proceso de urbanización.

Lo mismo ha sucedido con gran parte de la vegetación, natural y cultivada, que antaño cubría Oviedo. Para las plantas, el agua es fundamental. En los contornos de los cauces fluviales aparecen especies vegetales riparias o de ribera, cuya cercanía al agua depende de su tolerancia a ambientes más o menos húmedos, e incluso encharcados. Esta vegetación de ribera forma los llamados *bosques galería* que, antes de la ocupación humana, acompañaban el recorrido de todos los ríos que hemos citado. Hoy solamente quedan de estos bosques ribereños algunos retazos aislados, conformados por especies como el sauce blanco (*Salix alba*), aliso o *humeru* (*Alnus glutinosa*), álamo negro (*Populus nigra*), arce blanco o *pláganu* (*Acer pseudoplatanus*) y avellano (*Corylus avellana*), que podemos encontrar en algunos tramos del Nora, el Llápices y el Gafú (Figura 6), así como en numerosos arroyos menores. Incluso, en algunos casos, se conservan estas especies tras la canalización, conformando hileras de árboles que atestiguan el lugar por el que discurrían los antiguos regueros (Figura7).



Figura 6. Un bosque de ribera, conformado principalmente por avellanos, acompaña al río Llápices a su paso por el barrio de La Florida.

Fuente: elaboración propia.



Figura 7. El arroyo se ha canalizado, pero los olmos que crecían junto a él continúan en su lugar, atestigüando el recorrido de uno de los muchos regatos que se dirigen hacia la margen izquierda del Nora tras atravesar el barrio de La Corredoria. Fuente: elaboración propia.

Como excepción al mal estado de conservación de los bosques de ribera ovetenses, destacan las alisedas que aún acompañan al Nora en su trayecto por el noreste de la ciudad (Figura 8), y la sauceda de Priañes junto al río Nora, que es Monumento Natural desde 2003. La presa de Priañes, inaugurada en 1953 y recrecida en 1967, dio lugar a un proceso de sedimentación que es frecuente en todos los embalses, permitiendo que, sobre el sustrato calizo en el que se formaron previamente los meandros encajados del río, se formasen depósitos aluviales en los que pudo proliferar la vegetación. Por tanto, la existencia de estos bosquetes, en los que predominan diferentes subespecies de sauce como *Salix alba*, *Salix atrocinerea* y *Salix caprea*,<sup>60</sup> es muy reciente en el tiempo.

---

<sup>60</sup> Díaz-González, 2015.

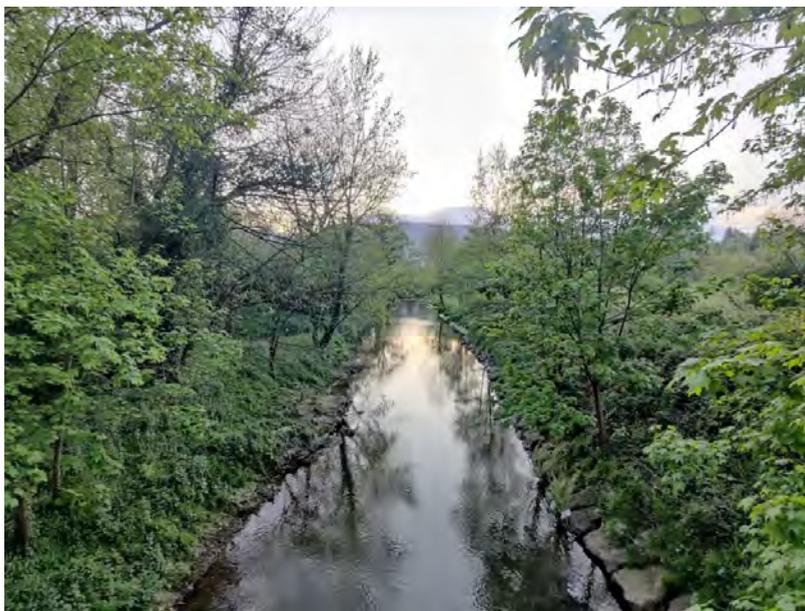


Figura 8. Alisos, plátanos y olmos conforman el bosque de galería en torno al Nora, en el límite entre Oviedo y Siero. Fuente: elaboración propia.

Al margen del bosque de ribera, la vegetación autóctona que ocupaba el concejo estaba conformada por bosque mixto caducifolio con presencia de carbayedas y probablemente también de hayedos, a juzgar por la toponimia, con lugares como Fayedo, Fayéu y La Faya; y se veía favorecida por las condiciones climáticas ya comentadas, derivadas de la localización latitudinal, la altitud moderada y la relativa cercanía al mar de Oviedo. Las precipitaciones abundantes y bien repartidas aseguraban el mantenimiento de estos bosques, y posteriormente de los pastos y cultivos. Para estos últimos, precisamente, lo que ocurre cerca de los ríos es fundamental, ya que las áreas de vega, cercanas a los cauces de cierta relevancia, han sido lugares preferentes para el cultivo en el concejo de Oviedo.

Los cursos de agua fluyen por gravedad desde las áreas topográficamente más elevadas, donde tienen gran capacidad de erosionar y arrancar partículas, que transportan en muchos casos hasta los océanos en los que desembocan. Sin embargo, una parte de estos sedimentos no llegan al mar y se depositan en los cursos bajos de los ríos, y la cantidad de sedimentos que no llegan al

mar es variable en el tiempo. Esto ocurre porque los cursos fluviales buscan su perfil de equilibrio a través de continuos reajustes entre los procesos de erosión y sedimentación, los cuales se producen en sentido contrario a la corriente. Así, cualquier cambio en el nivel de base de un río, que es su punto más bajo, desencadenará un proceso de modelado regresivo hacia el punto más alto. Por ejemplo, si el nivel del mar bajase, la erosión actuaría desde la desembocadura hasta la cabecera, rebajando el cauce para reajustarlo a las nuevas condiciones. Si en cambio el nivel del mar subiese, el proceso sería exactamente el inverso y se daría a través de la acumulación de sedimentos.

A lo largo de la historia geológica de nuestra región, muchos han sido los cambios que, en relación con procesos tectónicos o cambios climáticos, han afectado a los cauces fluviales. Por ejemplo, la deglaciación tras el último ciclo glacial, evento que en nuestras montañas comenzó hace entre 30 000 y 40 000 años,<sup>61</sup> desencadenó el necesario reajuste en los perfiles fluviales. La fusión de los hielos causó entonces incrementos en los volúmenes desaguados, y también un aumento del nivel del mar (el cual se produjo debido al deshielo no simultáneo de grandes áreas glaciadas a nivel global). Ese proceso, además, no ha sido lineal, ya que hubo sucesivas pulsaciones de avance glacial, dándose la última durante la Pequeña Edad de Hielo (PEH) entre los siglos XIV y finales del XIX. Por tanto, los cambios en los cauces fluviales, por diferentes causas entre las que destacan las señaladas, han sido continuos, y las fases de acumulación han dado lugar a la formación de recubrimientos aluviales que se encuentran en los contornos de los cursos de agua, apareciendo a veces superficies aterrazadas que atestiguan los niveles anteriormente alcanzados por el río, y la alternancia de fases de incisión y acumulación sedimentaria. Además, esas superficies aluviales se ven puntualmente afectadas por las crecidas, un fenómeno que afecta puntualmente a los cauces en su curso bajo y medio.

Así, en las áreas topográficamente favorables, los dos grandes ríos mencionados, Nalón y Nora, generaron en sus márgenes depósitos de sedimentos con gran acumulación de partículas finas (limos y arcillas), dando lugar a suelos profundos, llanos y enormemente fértiles. Si a esto añadimos que se trata de terrenos llanos en un territorio en que no abundan, comprenderemos por qué las amplias vegas que el Nalón generó en la periferia de Oviedo, especialmente en el eje Veguín-Tudela-Santianes-Olloniego, fueron espacios de uso intensivo hasta bien entrado el siglo XX. A estas grandes vegas se añaden las

---

<sup>61</sup> Ruiz-Fernández y García-Hernández, 2018.

del Nora en el sector de La Corredoria, y las márgenes del Maxuca (o Llápices) entre Las Mazas y San Cloyo. Sin las vegas ovetenses, que constituyeron durante siglos el área de productividad agrícola intensiva de la ciudad, el crecimiento urbano sostenido por Oviedo hasta la etapa contemporánea habría sido impensable.

Pero estos ríos no solamente han generado oportunidades, también grandes retos y, puntualmente, peligros. Los ríos Nalón y Nora, que rodean de forma estratégica el concejo, han hecho necesario el establecimiento de numerosos puentes y pasos de barquería que permitían conectar Oviedo con los principales itinerarios geográficos de la región: el de occidente, después Camino de Santiago, y el camino a la Meseta desde los puertos de mar. Estos puentes, cuya construcción y mantenimiento eran costosos, han sufrido numerosos arruinamientos a lo largo de su historia y han generado problemas importantes de incomunicación.<sup>62</sup>

Además, la fuerza del agua es imparable en ciertos momentos que, generalmente, coinciden con episodios de precipitación extrema. Estas precipitaciones, en ocasiones, afectan especialmente a las áreas de captación, situadas en ámbitos altimontanos. Tanto las lluvias intensas como las grandes nevadas, cuando se produce una subida súbita de las temperaturas, producen alteraciones importantes aguas abajo, y, en algunos casos, el agua ha provocado inundaciones en el concejo de Oviedo, protagonizadas por el Nora y el Nalón.<sup>63</sup> Tal vez el suceso más célebre de cuantos han afectado a estos ríos es el conocido como la «Llena de San Miguel», acontecida en octubre de 1676. Las fuertes precipitaciones dieron lugar a una crecida que ocasionó grandes pérdidas materiales y personales en el curso medio y bajo del Nalón, y que dio lugar a un evento singular: se produjo un desbordamiento total a la altura de Olloniego, donde un puente sin río atestigua hoy el trazado que antes de este suceso seguía el río, pues este nunca volvió a su cauce. De esta anécdota tenemos noticia gracias a las Actas de la Junta del Principado, que las registró a través de las peticiones de alivio de contribuciones y ayudas para el pueblo. A ella se suman las inundaciones periódicas que afectan a las instalaciones que hoy ocupan las áreas de vega en el concejo, si bien debemos recordar que las mismas forman parte del cauce máximo del río y tal vez no sean los lugares más oportunos para construir, pues el fenómeno de las inundaciones se encuentra en su propia génesis.

---

<sup>62</sup> Fernández-Hevia y Argüello Menéndez, 1993.

<sup>63</sup> García-Hernández, 2019.

Inevitablemente, la larga aventura urbana de Oviedo, que supera ya los mil años, ha dejado su huella en estos cursos fluviales. La mayor parte de las vegas de Oviedo han sido invadidas por usos urbanos e industriales en los últimos 50 años, una vez que la actividad agrícola local perdió el interés que tenía. Es importante tener en cuenta que los cambios en ellas son irreversibles, pues se arrancaron sus suelos para edificar, lo que significa que si dichos espacios volvieran a ser necesarios para el cultivo, ya nunca podríamos contar con la riqueza edáfica que antes ofrecían: la que nos dejó el agua de los ríos al inundar durante miles de años, periódicamente, sus cauces. Además, debemos considerar la artificialización de la mayor parte de los cauces que atraviesan la ciudad mediante reconducciones y canalizaciones, a lo que se unen los vertidos de residuos, que han sido crecientes. Este proceso ha llevado a los principales ríos que la atraviesan, Llápices y Gafu, a una situación de alteración y contaminación extrema. En el caso de los ríos Nora y Nalón, cuando atraviesan Oviedo ambos han sumado a los residuos urbanos, los industriales. Por esta razón, la red hidrográfica ovetense se encuentra actualmente entre las peor conservadas de Asturias desde el punto de vista ecológico y químico.<sup>64</sup> Especialmente en el caso de los más caudalosos Nalón y Nora, el tortuoso recorrido que forzó la disposición del sustrato rocoso bajo ellos, ahora discurriendo entre elevados roquedos o sinuosas vegas, conforma paisajes y entornos de singular belleza. Se trata de peculiaridades paisajísticas escasamente puestas en valor y apenas disfrutadas por quienes habitan o visitan el concejo. Constituye casi un deber dejar aquí dicho que la restauración integral de dichos cauces y sus entornos, implicaría un hito de gran valor ambiental y social para el municipio de Oviedo, en el que las áreas para el puro esparcimiento y disfrute de la naturaleza son escasas.

#### **OVIEDO, UNA CIUDAD SIN RÍO. LA HISTORIA HIDRÁULICA URBANA**

Situada, como se ha visto, en un altozano rocoso, la primitiva ciudad de Oviedo no contaba con río, pero sí con un clima de abundantes precipitaciones, como ya hemos analizado. El agua de lluvia se infiltra entre una nutrida red de fisuras abiertas entre contundentes capas de roca caliza que afloran casi a ras de superficie y reaparece, no sin cierta dificultad, a niveles inferiores entre los estratos aprovechando desniveles naturales del terreno, o bien al excavar taludes o pozos. Un secular inconveniente en el aprovechamiento de estos exiguos re-

---

<sup>64</sup> Demarcación Hidrográfica del Cantábrico Occidental, 2020.

cursos hídricos lo constituían los modestos desniveles alrededor del altozano del burgo histórico que no facilitaban el suficiente espesor de roca para el acúmulo de agua entre sus estratos, lo que forzó a excavar pozos en la dura caliza o bien a plantearse encauzarla desde los manantiales de los altos circundantes hasta la ciudad, y así se hizo desde el Medievo hasta la actualidad.

### *El agua en la ciudad medieval*

Como embrionario núcleo urbano, Oviedo se constituye en la época del reino de Asturias, entre los siglos VIII y X d. C., pero ya antes, desde época antigua, el lugar había sido ocupado, y la arqueología ha aportado en los últimos años cuantiosas novedades con respecto a la historia hidráulica del sitio. Nos estamos refiriendo concretamente a diferentes hallazgos de infraestructuras de época tardorromana, entre las que sobresalen la fuente de la Rúa,<sup>65</sup> el posible depósito de agua en el subsuelo del monasterio de San Vicente<sup>66</sup> o el pozo con revestimiento interior de bloques pétreos localizado bajo el actual palacio episcopal.<sup>67</sup> Estos recientes descubrimientos han llevado a plantear como teoría la existencia de un *locum sacrum* o lugar de culto a las aguas en la colina de *Ovetao* en época romana.<sup>68</sup> La mejor conocida de estas estructuras antiguas es sin duda la «fuente» de la Rúa, situada en los aledaños de la calle homónima, tratándose de los vestigios de un edículo de grandes sillares asentados en un cajeado de la roca caliza del subsuelo. La sillería fue expoliada en el Altomedievo pero se conserva la losa central con el pocillo y el canal de desagüe, habiendo sido datada la construcción entre los siglos III-V d. C. a partir de carbones recuperados en el mortero.<sup>69</sup> Precisamente en los vestigios de la Rúa se podría destacar la escasa probabilidad que tendría su precisa situación para generar una surgencia espontánea de agua. Las posibilidades de que se infiltre suficiente agua de lluvia entre la nutrida red de fisuras que se abren en las calizas cretácicas de su subsuelo y salga espontáneamente en algún punto más abajo aumentan con el volumen de roca disponible desde las cotas más altas y precisamente el edículo de la Rúa está demasiado cerca del culmen de la colina de Cimadevilla (en la plaza homónima) y apenas un par de metros por debajo de ella.

---

<sup>65</sup> Estrada, 2014.

<sup>66</sup> Requejo, 2020.

<sup>67</sup> García de Castros y Ríos, 2016.

<sup>68</sup> Gutiérrez González, 2018.

<sup>69</sup> Estrada, 2014.

Posteriormente, con la instalación de la corte del reino en Oviedo a finales de la octava centuria, el poder garantizar un suministro de agua mínimamente estable era fundamental para el adecuado mantenimiento del conjunto áulico-eclesiástico. En este sentido, se ha propuesto que la mención a un *aquae ductum* en la donación de Alfonso II de 812 esté relacionada con el origen de la traída de la Granda del Anillo, hipótesis defendida por Herminia Rodríguez Balbín en 1977, y suscrita por la mayoría de los autores posteriores, aunque aún esté por demostrar arqueológicamente. Como se describirá más adelante, un análisis de la topografía del terreno desde las alturas de la Granda del Anillo hasta La Rúa puede ayudar a interpretar esta hipótesis.

En este periodo el abastecimiento de agua se complementaba con la presencia de una serie de estratégicos pozos de captación distribuidos por la zona de la catedral, del palacio episcopal y de los monasterios de San Pelayo y San Vicente, así como con los manantiales que surgían en el contorno de la colina. Al contrario que en la Rúa, todos estos pozos ya disponen por encima de un mayor espesor de las mismas rocas calizas y una mayor distancia desde la altura culminante de Cimadevilla para que se infiltre suficiente volumen de agua y discurra más abajo entre los estratos. Luego, durante las temporadas de mayor incremento de pluviosidad, el nivel freático suele aumentar lo suficiente para que incluso surja agua de manera natural, sin abrir un pozo, como aún sucede en el jardín de Pachu de la catedral, o incluso llegue a rebosar en el cercano pozo del palacio episcopal.

Fuera del recinto amurallado, se localiza Foncalada, una fuente monumental que recibe el agua a través de una conducción cubierta con losas, vertiéndola frontalmente a un gran estanque rectangular. Tradicionalmente atribuida al patrocinio de Alfonso III (866-910), estudios más recientes abogan por llevar su construcción al periodo anterior de Alfonso II,<sup>70</sup> aunque otras hipótesis proponen su adscripción tipológica a época romana, si bien no cuentan por el momento con dataciones absolutas al respecto (Figura 9).<sup>71</sup> A diferencia de la Rúa, el manantial que surge a unos metros de la trasera del propio edículo de Foncalada dispone de un notable espesor de calizas cretácicas que alcanza hasta las alturas de la calle Uría, por lo que una rotura natural de los estratos más abajo propició la presencia de este manantial. Además, la notable pérdida de cota desde la parte más elevada de la ciudad también haría posible el encauzamiento de regatos superficiales hacia esa zona más deprimida, antes de ser urbanizada.

---

<sup>70</sup> García de Castro 1995; Ríos 1997.

<sup>71</sup> González Montes, Estrada García y Gutiérrez González, 2021.



Figura 9. Fuente de Foncalada, compuesta por un edículo y un estanque frontal, datada en el siglo IX. Fuente: elaboración propia.

Entre los siglos X y XII, tras el traslado de la corte a León, la contenida población ovetense se abastecía fundamentalmente de los manantiales enclavados en el contorno exterior del recinto amurallado, entre estos los del Fontán, Santo Domingo, Regla, Foncalada, Dueñas o Fozaneldi. En el caso concreto de Santo Domingo y Regla, se cuenta con una situación muy deprimida que facilita los afloramientos de agua meteórica desde los terrenos situados por encima del Campillín, incluso más arriba, entre el actual seminario y González Besada. A ello hay que sumar el nada desdeñable complemento que desde siglos antes proporcionaban los pozos y aljibes localizados intramuros. Las excavaciones arqueológicas realizadas en los solares de la calle de La Rúa han permitido identificar uno de estos aljibes, el cual se encuentra excavado en la roca y está formado por dos cubetas comunicadas entre sí de 3 m de profundidad, y estaría en uso en época medieval hasta que se reconvierte en letrina en la primera mitad del siglo XVI.<sup>72</sup>

A partir de los siglos XII y XIII, la ciudad conoció un considerable crecimiento demográfico,<sup>73</sup> que provocó que el antiguo sistema de abastecimiento

<sup>72</sup> Estrada, 2014.

<sup>73</sup> Álvarez, 2009.

hidráulico, sustentado en manantiales, pozos y aljibes, resultara notoriamente insuficiente para abastecer a una población aumentada. Fue esta la principal causa por la que se tuvo que incrementar la capacidad de suministro de agua mediante el empleo de acometidas a distancia. Así, la primera mención a la existencia de un encañado en el subsuelo del solar ovetense se retrotrae a 1274, al mencionarse que ningún «malato» ni «tripera» «sea osado de abrir el canno porque bien el agua para Sansón»;<sup>74</sup> mientras que en la centuria siguiente contamos ya con referencias inequívocas a la existencia de la traída desde «La Granda de Danille». En 1332, el *duçero* Johan Díaz se encargaba de «aducir la dicha agua a los dichos kannos en tal manera que por auondancia o mengua de la dicha agua o por mengua de rrefaçimiento de los kannos»<sup>75</sup>; y en 1354 el cabildo otorgaba la ración de agua a dos vecinos, Martín González y Pedro Martínez, quienes se comprometían a cambio a mantener en buen estado las conducciones que llevaban el agua a los caños del claustro de San Salvador y de Sansón. Desde los manantiales de La Granda («el agua que naz en el monte de Danilli en las tres fontes que se acostumó traer antiguamente e acostuma oy día») hasta la puerta nueva las conducciones debían de ser de piedra, mientras que por el interior de la ciudad el agua tenía que discurrir por «caños de plomo puestos dentro a los dichos caños de piedra fasta los dichos caños de la claustra de San Salvador e de Sanson e de Puerta Rodil...».<sup>76</sup>

Este tipo de conducciones, con caños de plomo en el interior de canalizaciones de piedra, fueron las que se encontraron en las excavaciones realizadas en la postguerra civil en el claustro de la catedral.<sup>77</sup> La acometida de La Granda consistía en una cañería con arcaduces de barro cocido de unos 1500 m de longitud que alcanzaba un desnivel total del 5,6 %. El concejo se preocupará de consolidar su propiedad sobre los terrenos de la Granda de Danilli, donde se encontraban los manantiales, y la traída alimentaba principalmente el arca de La Capitana, situado junto a la Puerta Nueva, distribuyéndose desde ahí por el interior del recinto urbano.<sup>78</sup>

La formación de la fuente de la Granda del Anillo, en la cercanía de Los Arenales, fue posible por el subsuelo rocoso del entorno. En efecto, a diferencia del sustrato calizo de Oviedo, justo por encima de esta fuente se cuenta con otro tipo de rocas de edad cretácica cuya textura porosa propicia la acumula-

---

<sup>74</sup> Miguel Vigil, 1889.

<sup>75</sup> Fernández Conde, Torrente y De la Noval, 1978.

<sup>76</sup> Cuesta y Díaz, 1958; Sanz Fuentes, 2012.

<sup>77</sup> Fernández Buelta, 1948; Argüello, 2008.

<sup>78</sup> Gutiérrez Claverol, 2017.

ción del agua meteórica, que en conjunto y en áreas más amplias llega a formar uno de los acuíferos más beneficiables del municipio.<sup>79</sup> Con la fuente de la Granda del Anillo y más abajo la del Águila, se puede pensar en la llegada de agua a la Rúa de forma natural, pero la topografía del terreno lo hace poco probable. Partiendo de Los Arenales, en primer lugar, los regatos y arroyos formados antes de las alturas de Otero y de las cuestas de San Lázaro, caerían hacia Villafría por el este o poco después hacia el Parque de Invierno, donde ya surca el río Gafo desde el este. Algo más abajo, las aguas de escorrentía que hubiesen llegado a la altura del Campillín se irían antes hacia Santa Domingo y el Campo de los Patos, pero más difícilmente hacia la Puerta Nueva. Y es que, si todavía llegase agua hasta la misma calle Cimadevilla, apenas podría discurrir sin encauzar hasta la Rúa, ya que se pierde cota hacia los lados y también en la misma plaza, hacia Altamirano por el oeste o hacia San Antonio por el este. Otra posibilidad sería que las aguas infiltradas bajo el terreno desde Los Arenales accediesen por el subsuelo a la Rúa, pero a la altura del vértice de Campomanes con Magdalena se toparía bruscamente con decenas de metros de espesor de los bancos de caliza cretácica que, en todo caso, podrían alimentar los bancos más hundidos, pero no los superficiales, en cota con la fuente. Todo ello justifica tantos esfuerzos para acometer la fabricación de encauzamientos y conducciones desde la Granda hasta el corazón de la ciudad durante los siglos medievales y modernos.

Asegurar un aprovisionamiento de agua suficiente era básico en la urbe medieval, necesaria para el consumo humano obviamente, pero imprescindible también en la lucha contra los incendios que asolaban el maderamen de las viviendas, o para su empleo en tenerías, batanes y molinos. Todo ello obligaba a la ejecución de continuados y onerosos trabajos de reparación y limpieza de fuentes y conducciones. En todo caso, la existencia de esta acometida de agua desde la Granda no fue óbice para que se mantuviesen los usos anteriores, de carácter complementario, tanto en los monasterios urbanos como en los palacios laicos y espacios públicos. En 1243 se conoce la construcción de una fuente privada para servicio del recién fundado convento de San Francisco extramuros; y en el siglo xv está constatado un pozo de agua en una casa de la Rúa, a la par que se repiten las menciones a la *fonte del Fontán*.<sup>80</sup>

A finales de esta centuria, en 1498 concretamente, daban comienzo unas importantes obras de renovación y mejora de la antigua traída de La Granda,

---

<sup>79</sup> Claverol y Torres, 1995.

<sup>80</sup> Argüello, 1997; Álvarez, 2009.

cuyo mantenimiento suponía considerables desembolsos para las arcas municipales.<sup>81</sup> Las obras mejoraron la captación del manantial, y se emplearon conducciones pétreas selladas con betún desde Los Arenales hasta la puerta nueva, y desde ahí y por Cimadevilla tubería de plomo encastrada en piedra. Entre 1500 y 1501 el maestro de obra de la catedral Bartolomé de Solórzano se comprometía a acabar las obras, ya que mientras estas durasen el agua se traía a través de «*cannos de madera*». Se aprovecha también para reparar las fuentes de Cimadevilla, El Fontán, Las Dueñas y La Foncalada, protegiéndose con rejas algunas de ellas.<sup>82</sup> Estas considerables inversiones en mejoras urbanas beneficiaban directamente a las familias de la nobleza y a la sede catedralicia, ya que eran quienes proporcionaban los materiales empleados en las diferentes construcciones.<sup>83</sup>

El acuerdo para las obras hubo de reiterarse en 1502 y 1505, cuando se encargaba al carpintero Juan de Fitoria «*echar los kannos de madera que fueren menester en la fuente*», además de limpiar las arcas de las fuentes y abrevaderos, mencionándose en concreto el «*alberque de las bestias*» junto a la puerta de Cimadevilla.<sup>84</sup> En general, el primer tercio del siglo XVI conocerá el problema del costosísimo mantenimiento de todas estas infraestructuras hidráulicas medievales, ajadas por el inexorable paso de los años. Así, en 1521 se reparaba la fuente de Cimadevilla, la cual se vuelve a intervenir cuatro años más tarde juntamente con las del Rosal y las Dueñas, al encontrarse en mal estado y sufrir pérdidas. En 1522 se pregonaba la prohibición de romper fuentes y alberques, y al año siguiente se disponía que ninguna persona lavase tripas en ellas. Finalmente, de 1529 se conserva una valoración general de los desperfectos que presentaba el conjunto de fuentes urbanas.<sup>85</sup>

### *El agua en la ciudad moderna*

En los años treinta del siglo XVI el regimiento ovetense decide afrontar el desafío de renovar el vetusto suministro hidráulico de la ciudad, aquejado como se encontraba de continuadas pérdidas y gravosas reparaciones. En 1536 se otorgaba licencia para echar por sisa 2000 ducados para arreglar los

---

<sup>81</sup> Álvarez, 2009.

<sup>82</sup> Cuartas Rivero, 1983; Argüello, 2008; Fernández San Felices, 2008.

<sup>83</sup> Álvarez, 2009.

<sup>84</sup> Argüello, 2008; Álvarez, 2009.

<sup>85</sup> Álvarez Fernández, 2009.

problemas en el suministro, y al año siguiente se contrataban los servicios de Rodrigo de Carrandi, «buen maestro de sacar agua», para tratar de encontrar las surgencias más propicias en la falda del Naranco: «En vista de la necesidad de aguas potables para servicio de la Ciudad, se acordó conducir a ella las de las fuentes de Ules, del Boo y Naranco, a cuyo efecto se convinieron la Justicia y Regidores con los señores de la Iglesia, pudiendo ejecutarse las obras con poco daño de particulares, y escaso gasto».<sup>86</sup>

Se pretendía de esta manera complementar la traída medieval de La Granda con una nueva acometida que se beneficiase de los manantiales de la vertiente meridional del Naranco. En todo caso, este primer impulso quedaría en agua de borrajas, y habría que esperar treinta años para que la idea prosperase. Así, en 1566, se requiere la presencia de Juan de Carrandi para trazar la traída de la fuente de Fitoria, pidiéndose dos años más tarde nuevas trazas a otros maestros dada la complejidad y trascendencia del asunto (Figura 10). En una entrada de 1570 del *Libro Viejo de Fitoria* conservado en el Ayuntamiento se relata como sigue: «dicha ciudad era muy falta de agua y fuentes de beber y en tanta manera que dos fuentes que avia en ella la una en la plaza y la otra dentro de la ciudad lo mas tiempo del anno estavan casi sin agua y ansi las mas noches no zesava de aver mucho numero de jente para tomar el agua y que otra fuente pequenna que estaba junto a santa clara de esa dicha ciudad aun no vastaba para aquel varrio».<sup>87</sup>



Figura 10. Urbanización actual de la Fuente de Fitoria y detalle de la inscripción de 1778 del reinado de Carlos III. Fuente: elaboración propia.

Una Real Provisión de 2 de septiembre de 1570 establecía licencia para echar sisa al respecto, y en diciembre se contaba ya con Gonzalo de la Bárcena,

<sup>86</sup> Miguel Vigil, 1889; Cuartas Rivero, 1983; Pastor, 1987.

<sup>87</sup> Gutiérrez Claverol, 2017.

fontanero de la ciudad de León, para dar las trazas definitivas de la acometida; mientras que Juan de Cerecedo era el encargado de diseñar los arcos del acueducto, y a quien se le adjudicaron los trabajos en 1572. La obra sufrió un sinnúmero de vicisitudes humanas y contratiempos técnicos que hicieron que se paralizase algunos años y que sufriera varias interrupciones y reanudaciones. Por este motivo todavía entre 1599 y 1601 se estaban comprando piedra y tubos para la conducción.

Las traídas de los manantiales de Fitoria y Boo se juntaban en la arqueta de la Cabaña, alcanzado la conducción un total de unos 6 km hasta el depósito de La Capitana, en la Puerta Nueva. De esta distancia, 390 m correspondían el renombrado acueducto de Los Pilares, de 41 arcos sobre pilares que soportaban una canalización entre paredones que albergaba el encañado, cubierto con losas y provisto de arquetas de limpieza y mantenimiento.<sup>88</sup> Completada la conducción, se instalan fuentes en los tres puntos estratégicos acordados: en la plaza pública, en la plazuela de la catedral y en la Corrada del Obispo. Estas respondían a dos diseños diferentes dibujados por Gonzalo de la Bárcena, uno exento y otro parietal, provistos con la Cruz de los Ángeles como emblema de la ciudad.<sup>89</sup>

La situación a media ladera del Naranco de las fuentes de Fitoria y Boo, en común con las citadas de Ules o Lillo, tiene similar explicación. Todas son alimentadas por el agua que se acumula en los tramos rocosos más arenosos y porosos del devónico medio, que quedan justo por encima de ellas y que son las que conforman la mitad superior del monte Naranco hasta sus cumbres. Además, en todas ellas el agua surge muy cerca de una de las cicatrices geológicas de recorrido lineal, que a mitad de ladera y con recorrido de este a oeste pone en contacto los afloramientos de esas rocas de edad paleozoica por su parte superior con las del mesozoico, por debajo,<sup>90</sup> donde ya no se dan manantiales tan caudalosos. Son viejas discontinuidades de debilidad mecánica (cabalgamientos y fallas) que parecen asociarse a estas surgencias del Naranco. La presencia de este tipo de discontinuidades y series de fallas asociadas a ellas no se suele distinguir fácilmente, pero en este caso, a media ladera del Naranco sí que es claramente perceptible una clara disminución de las pendientes tan abruptas del terreno que llegan desde la cima que al volverse mucho más suaves, incluso formando terraplenes casi horizontales, han ido facilitando la implantación de los núcleos de población o también, hace solo un siglo,

---

<sup>88</sup> Canella, 1889; Pastor, 1987; Abril San Juan, 2005; Gutiérrez Claverol, 2017.

<sup>89</sup> Heredia, 2019.

<sup>90</sup> Claverol y Torres, 1995; Aramburu *et al.*, 1995.

emprender la construcción del sanatorio del Centro Asturiano de La Habana y su llana zona de esparcimiento y descanso (Figura 3).

Retomando la historia hidráulica de la ciudad, en 1602 se daba por finalizada la obra de la nueva traída de Fitoria, con la cual Oviedo estrenaba suministro. No cabe duda de que durante el último cuarto del siglo XVI se produce un gran esfuerzo de los gobiernos locales asturianos por dotar a las poblaciones de agua corriente, mejorando las canalizaciones y la instalación de las fuentes públicas. Se trataba fundamentalmente de evitar enfermedades epidémicas, con unas políticas municipales de higiene y salubridad que se desarrollan también en Avilés, a partir de 1583, y en Gijón, desde 1590.<sup>91</sup> En 1597, y al respecto de las obligaciones de los corregidores, se escribía que estos debían: «*cuidar mucho que en su ciudad aya copia de aguas, haziendo para ellas lustrosas y hermosas fuentes, y en diversas partes albercas para los ganados, y lavaderos de paños, porque no solo sirven para la bebida dellos y para el uso y limpieza cotidiana y familiar, pero también para extinguir los incendios que suceden en los pueblos, por cuya falta, y de pozos, la ciudad de Oviedo se ha quemado diversas vezes*».<sup>92</sup>

Durante esta época se producirán asimismo los primeros intentos medianamente serios de desecación del Fontán, en relación con esta nueva política higienista urbana. Desde el Medievo, el lugar se había convertido en una insalubre charca a la que se arrojaban todo tipo de basuras y se vertían las fecales. Su desecamiento se inicia en 1523, cuando por orden del regimiento «*todos los vecinos debían de enviar de cada casa una persona con una ferrada y echarlo fuera a la calle de abajo*» en domingo después de comer. A pesar de los esfuerzos, aún en 1559 se estaba tratando de vaciar la laguna, la cual no será completamente drenada hasta 1658.<sup>93</sup> La formación de la laguna tiene su origen en una depresión de origen kárstico, es decir, por ahuecamiento de las calizas subyacentes por disolución en agua, laguna que se fue obturando por desechos provenientes de la ladera que baja desde el sur, e impidiendo la salida natural de las aguas que le llegaban desde varios manantiales situados unos metros tras el emplazamiento del actual *cañu* del Fontán. El suministro de agua infiltrada a los manantiales y seguramente de los regatos que les precedían por la superficie era facilitado por la existencia de las pendientes que se inician alrededor del antiguo cementerio (actual seminario), pero que, al llegar ya a la cota de la laguna, no contaban con una pérdida de pendiente suficiente para desaguar.

---

<sup>91</sup> Pastor, 1987; Heredia, 2019.

<sup>92</sup> Cantero, 2015.

<sup>93</sup> Álvarez, 2009; Conde, 2013.

Por ello, ya desde el siglo xvi hubo que construir canalizaciones hacia el Rosal que, con desigual fortuna y contando con la mínima inclinación que otorgaba la topografía de esta área, tenían como destino llevar las aguas sobrantes a las pendientes de Foncalada.<sup>94</sup>

Avanzando en nuestro particular periplo, cabe reseñar cómo durante el siglo xvii tuvo lugar una suerte de competición entre las instituciones religiosas de la ciudad, conventos y monasterios principalmente, por asegurarse el abastecimiento hidráulico de sus edificios enganchándolos a la acometida, que ya disfrutaba la catedral desde al menos el siglo xiii. Ya en 1600 el cabildo catedralicio se quejaba de que la ciudad trataba de surtir con aguas de la fuente de Fitoria al colegio de la Compañía de Jesús, antes de establecer la fuente que tenía obligación de colocar delante de su santa iglesia; una reprobación que fue atendida con premura, manteniendo el compromiso del concejo de abastecer de agua corriente la fuente situada en la plaza frente a la catedral. Al año siguiente era la abadesa San Pelayo quien suplicaba a la ciudad la concesión del agua sobrante de dicha fuente para regar las huertas del convento.<sup>95</sup> En 1603 se disponía un nuevo ramal trazado por Gonzalo de Güemes Bracamonte, maestro de cantería, para llevar agua al colegio jesuita de San Matías, colocando una fuente en el centro del claustro. Y dos décadas después, en 1624, se construía una nueva conducción para llevar el agua al convento de San Pelayo, trazado también por Bracamonte. Por su parte, en 1647 el abad de San Vicente requería a la ciudad la concesión de agua «por tener solamente un pozo en la que solía faltar» y por ello «se acordó reconocer desde su nacimiento las aguas de la fuente de la Granda para ver si se podía acceder a la pretensión, averiguando si los demás Conventos tienen las que les fueron concedidas por contrata».<sup>96</sup> Este proceso de mejora de las instalaciones hidráulicas conventuales se cerrará entre 1657, con la nueva conducción al monasterio de Santa María de la Vega desde la fuente de la Posadiella,<sup>97</sup> y 1658, cuando se concede al convento de Santo Domingo «una paja de agua de la fuente de la Granda de Anillo, obligandose á que en ningún tiempo pretenderá derecho de propiedad ni obligazion forzosa á dicha agua». Finalmente, en 1668 se concedía otra paja de agua a la casa del deanato.<sup>98</sup>

---

<sup>94</sup> Conde, 2013.

<sup>95</sup> Gutiérrez Claverol, 2017.

<sup>96</sup> Miguel Vigil, 1889.

<sup>97</sup> Kawamura, 2006.

<sup>98</sup> Gutiérrez Claverol, 2017.

Como no podía ser de otra manera, este y otros sobreesfuerzos a los que se veía sometida la traída de aguas urbana acabarían por sacar a relucir todos sus problemas. De esta manera, en 1604 se tuvo que recurrir de nuevo a las aguas de Los Arenales, a propósito de un asunto que involucraba a la Compañía de Jesús, al quejarse esta del «insuficiente suministro y recomendando asimismo la reparación de la fuente de “la Granda de anyllo”, para lo cual se contrató la cesión de la tercera parte del agua que venía de la Granda porque la de Fitoria se enturbiaba con frecuencia».<sup>99</sup> He aquí reseñado uno de los graves problemas del abastecimiento urbano en época moderna, ya que, si bien el agua de la Granda proporcionaba menos caudal que la de Fitoria, esta última llegaba turbia a la ciudad en época de lluvias.

En 1612 se documentan unas obras de reforma de la antigua acometida, autorizando Felipe III a imponer un tributo sobre determinadas mercancías «a efectos de volver a traer la fuente de la Granda de Anillo y mantener así esta, como la de Fitoria». En 1627 se contrataba a Gonzalo de Güemes Bracamonte para que ejecutase la tarea de recuperar tal conducción de La Granda hasta el centro de la ciudad, reto que lograría satisfacer con suficiente celeridad. Y en 1627 *«tratose de la fuente de Fitoria y de la Granda de Anillo, y sus reparos y conservación repartimiento de las aguas en los ocho caños y fuentes en que estan repartidas, que son; la primera en el Campo de San Francisco, la segunda en el Colegio de la Compañía de Jesus, la tercera en la Plaza mayor, la cuarta en la plazuela de la botica de Santos de Monterrey, la quinta dentro de la Fortaleza y carcel real de este Principado, la sesta en la plazuela de las casas y palacios Episcopales, la sétima en la plazuela de la Iglesia mayor, la otava en el Convento de San Pelayo el Real»*.<sup>100</sup>

Asimismo, durante este periodo, se institucionaliza la figura del maestro fontanero de la ciudad, encargado de realizar inspecciones periódicas de encañados y acueductos. Entre 1613 y 1638 ostentará el puesto el ya mencionado Bracamonte; mientras que en 1649 encontramos en el cargo al trasmerano Bartolomé de Velasco, y, a partir de 1655, a su hijo Melchor como sucesor en el cargo. Por su parte, las ordenanzas municipales insistirán en el cuidado de las maltrechas infraestructuras, y en 1634 el corregidor dispondrá que «los carros no transiten por las calles por donde van los encañados de las fuentes de Fitoria y Anillo»; mientras que en 1649 se suplicaba dejar «sin efecto la prohibición de lavar en las fuentes y albercas públicas» y se exigía construir un lavadero

---

<sup>99</sup> Miguel Vigil, 1889; Gutiérrez Claverol, 2017.

<sup>100</sup> Miguel Vigil, 1889; Ríos González, 1997; Gutiérrez Claverol, 2017.

«en la Puerta Nueva, del que podría servirse toda la ciudad».<sup>101</sup> Junto a ello, el completo drenaje en 1658 de la laguna del Fontán permitirá la apertura de una plaza para mercado y feria de ganado en el sitio; mientras que en la propia fuente se hace una reforma con la intención de darle más altura al caño, para lo cual se excava un túnel de unos 12 m de longitud y 2 de altura siguiendo la falla de la roca buscando el manantial (Figura 11).<sup>102</sup>

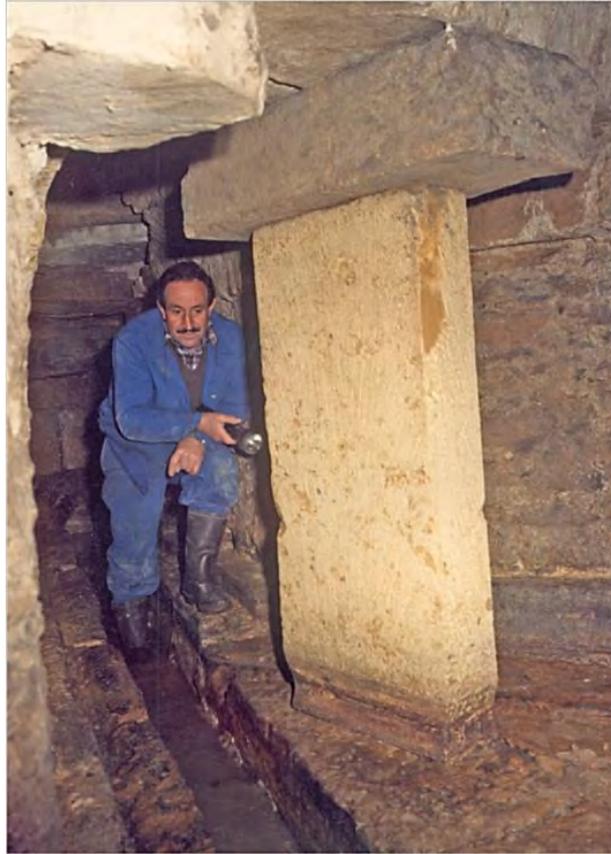


Figura 11. Vista de la canalización subterránea del manantial hasta el caño del Fontán, y en primer término del pilar que soporta la esquina del palacio del Duque del Parque. Fuente: Conde 2013.

---

<sup>101</sup> Abril San Juan, 2005; Gutiérrez Claverol, 2017.

<sup>102</sup> Conde, 2013.

Entrado ya el Siglo de las Luces, los problemas en el mantenimiento de la red hidráulica urbana no solo no desaparecen, sino que se agravan, debido básicamente al propio envejecimiento del entramado de cañerías. Sobre pasada por los costes inherentes, la corporación municipal tratará sin demasiado éxito de compartir los gastos de mantenimiento con algunas de las instituciones religiosas urbanas. Sabemos así que en 1732 se proponía que «las comunidades de religiosos de Santo Domingo y de San Vicente tengan a su cargo el arreglo y enlosado de la cubierta del conducto de la calle del Matadero y otras por donde corrían las aguas sobrantes de la fuente de la Capitana, con las cuales regaban sus prados ambos monasterios», y una década después estallará el conflicto entre el ayuntamiento y el convento de San Pelayo, por el que se acordó «quitar para lo sucesivo el agua que fuera concedida a las religiosas de San Pelayo, siempre que lo poseyeran de gracia, a motivo de no haber querido concurrir con los dos mil doblones ofrecidos».<sup>103</sup>

Como hemos ido comprobando, el abastecimiento de agua a la ciudad ha sido siempre una de las principales preocupaciones de las autoridades municipales, suponiendo grandes inversiones a lo largo de los siglos. A partir del XVIII parece entreverse una manera más integral y planificada de tratar la problemática del agua,<sup>104</sup> datando de 1744 el *Plan de Condiciones para reparar la cañería principal de la ciudad y demás ramales*. En ciertos tramos de las tuberías se disponían codillos, cuya función era la de poder limpiar los tubos mediante el zarceo, introduciendo ramajes para eliminar el sedimento. Se dispone también la reparación de la canalización de Cimadevilla con tubos del avilesino alfar de Miranda y se prohíbe la circulación de los carros para no romper las tuberías.<sup>105</sup> Cuatro años más tarde se publica un bando para que «los dueños de caballerías las lleven a beber al caño del Campo; y para que tenga agua limpia a todas horas se encomendó su cuidado al oficial de justicia para que no se lave ni ensucie por cualesquiera persona, bajo la multa de dos reales».<sup>106</sup> Esta precariedad en el suministro de agua se veía a su vez agravada durante los estiajes estivales. En 1766 el comisario de fuentes de la ciudad, Felipe González Valdés, escribía al respecto: «observando el encañado que va para el colegio de San Vicente, al pie de dicha fuente de Cimadevilla, se ve con experiencia que esta casi siempre está sin agua y aquella en todos tiempos corrientes». Ese mismo año Manuel

---

<sup>103</sup> Miguel Vigil, 1889.

<sup>104</sup> Ríos, 1997.

<sup>105</sup> Abril San Juan, 2005.

<sup>106</sup> Miguel Vigil, 1889.

Reguera, fontanero de la ciudad, pondría de manifiesto los problemas de abastecimiento que tenían las fuentes de la ciudad, sobre todo en «los veranos, especialmente en los de mucha seca».<sup>107</sup> En 1779 se denunciaba la «grande escasez de agua y faltar a algunas fuentes y particulares, y es una de ellas la de la Fortaleza (...) jamás se experimentó igual escasez de aguas en las matrices y fuentes de esta Ciudad como la que sufre de un año a esta parte. Sin embargo seguramente en ningún tiempo se ha gastado tanto para reparo de los cañados, de modo que se han puesto convenientes y remediado todas sus quebras». A la sazón el Consistorio contrató un maestro en fontanería, responsable tanto del «cuidado y repartimiento de aguas como el reparo de encañado».<sup>108</sup>

Son años estos de continuadas inversiones en las infraestructuras hidráulicas. Así, en 1777 se acuerda construir un caño y pilón, conduciendo al mismo una paja de agua para el servicio de la cárcel pública. Al año siguiente se rehace la fuente de Fitoria, en 1783 se aprueba la reforma del caño de Cimadevilla, y un año después se estaba trabajando en el mantenimiento de los encañados.<sup>109</sup> Ya en 1803 el ingeniero José Fornels examinaba el acueducto de Fitoria, e informa que presentaba graves pérdidas de caudal con lo que se inician al poco las obras de mejora.<sup>110</sup> En 1804 se acuerda «aumentar el caudal de las fuentes públicas de la ciudad y arrabales con 64 reales fontaneros, y que en las fuentes privadas de la Fortaleza, Cárcel, Rúa, Galera y Cuartel subsistan sus caños con el calibre que tienen».<sup>111</sup> De 1803 a 1808 conocemos también el expediente de reparación del acueducto y recepción de obras, «introduciendo el acueducto de Fitoria con el de la Granda», y rematando Francisco de Pruneda la cañería de Fitoria en el tramo entre la Puerta Nueva y la Plaza Mayor.<sup>112</sup> Asimismo se dispondrán sanciones contra los malos usos en las fuentes, como la que se establece en 1782 para la de la Regla en El Postigo, la cual tenía cuatro caños y era la más copiosa de la ciudad, cuya agua, muy fresca en el verano, «tenía la virtud de ser medicinal contra las obstrucciones; que en su estanque de piedra labrada lavaba la ropa blanca la mayor parte del vecindario, y se limpiaban las tripas, bandullos y caídas de los ganados de los mataderos del Cabildo y de la Ciudad, y todo lo de los cerdos».<sup>113</sup>

---

<sup>107</sup> Ríos González, 1997.

<sup>108</sup> Coronas, 2003; Gutiérrez Claverol, 2017.

<sup>109</sup> Ríos González, 1997.

<sup>110</sup> Abril San Juan, 2005.

<sup>111</sup> Gutiérrez Claverol, 2017.

<sup>112</sup> Ríos González, 1997.

<sup>113</sup> Gutiérrez Claverol, 2017.

Finalizando ya la centuria, y al igual que había ocurrido en el siglo anterior con los edificios eclesiásticos, la nobleza laica se afanará ahora por dotar de agua corriente a sus monumentales palacios urbanos, consiguiendo ventajosas concesiones de *pajas de agua*, como obtendrán el marqués de Camposagrado en 1752 y 1813, o el marqués de Vista Alegre y el conde de Agüera en 1795.<sup>114</sup>



Figura 12. Distribución de conducciones de agua en el Oviedo de época moderna.  
Fuente (Abril San Juan, 2005).

<sup>114</sup> *Ibidem.*

*El agua en la ciudad contemporánea*

A mediados del siglo XIX la ciudad arrastraba los mismos problemas que había caracterizado el secular suministro de agua, tal y como describiría magistralmente Pascual Madoz en su célebre *Diccionario Geográfico-Estadístico-Histórico* (1861): «Los caños de que se componen los encañados son de barro poco cocido, y tan mal unidos están entre sí, que se filtra el agua y se pierde en gran cantidad, y por hallarse colocados sobre terreno barroso, arenisco y flojo, se adultera en tal disposición, que apenas se puede hacer uso de ella en tiempo de grandes lluvias. De aquí se sigue el experimentar la población grande escasez de aguas, y se sigue no menos el consumirse todos los años en reparos del encañado mucho dinero, sin que pueda conseguirse el fin que se propone su ayuntamiento hubiera remediado radicalmente un mal tan grave, pero la escasez de recursos con que para ello cuenta, paraliza sus constantes esfuerzos. Si se le concediesen arbitrios, emprendería una nueva cañería de hierro colado, aprovechando la oportunidad del establecimiento de las grandiosas fundiciones de Trubia y Mieres, que están a punto de empezar a dar productos de aquella clase».

Por entonces, buena parte de los manantiales del perímetro urbano estaban contaminados debido a la inadecuada gestión de las aguas residuales. En 1853 un primer ensayo analítico de sus propiedades determinaba su contaminación, salvo en el caso de la de las Dueñas y el Prado.<sup>115</sup> Asimismo, los tradicionales abastecimientos de época moderna presentaban un deficiente estado de conservación, viéndose muy afectados por los estiajes del verano y no alcanzado el suministro para cubrir las necesidades de la población. Ante este acuciente problema el ingeniero Pérez de la Sala redactaba en 1864 un nuevo proyecto de abastecimiento hidráulico, manteniendo la traída de Fitoria y Boo pero ampliándola con los manantiales de Ules y Lillo, y empleando sifones y tubería de presión de hierro con válvulas y grifos en la renovación de la red de distribución, lo que hará innecesario el acueducto de los pilares.<sup>116</sup> Se construye además un gran depósito en lo alto de la calle del Rosal, manteniéndose en todo caso el sistema de fuentes de vecindad al no plantearse todavía la generalización del suministro a domicilio. Las obras se prolongarían entre 1866 y 1875, año en el que se inaugura, un 21 de septiembre, la nueva traída, instalándose como monumento conmemorativo «La Fuentona» en el paseo del Bombé.<sup>117</sup>

---

<sup>115</sup> Abril San Juan, 2005.

<sup>116</sup> Villa González-Río, 1987.

<sup>117</sup> Abril San Juan, 2005.

En todo caso, con la nueva acometida se despilfarraba mucha agua en las viviendas, al no controlarse su consumo, circunstancia que llevó al Ayuntamiento a desarrollar un primer reglamento en 1876 para las concesiones de agua a particulares, y mediante el cual se regulaban unas tarifas que hacían pagar más a los vecinos de mayor renta y que ocupaban las mejores viviendas. En él se establecía también que la Guardia Municipal vigilase las fuentes, así antiguas como modernas, no permitiendo «fregar las ferradas ni detenerse en su inmediación a las personas que se presenten a tomar agua más que el tiempo puramente preciso».<sup>118</sup>

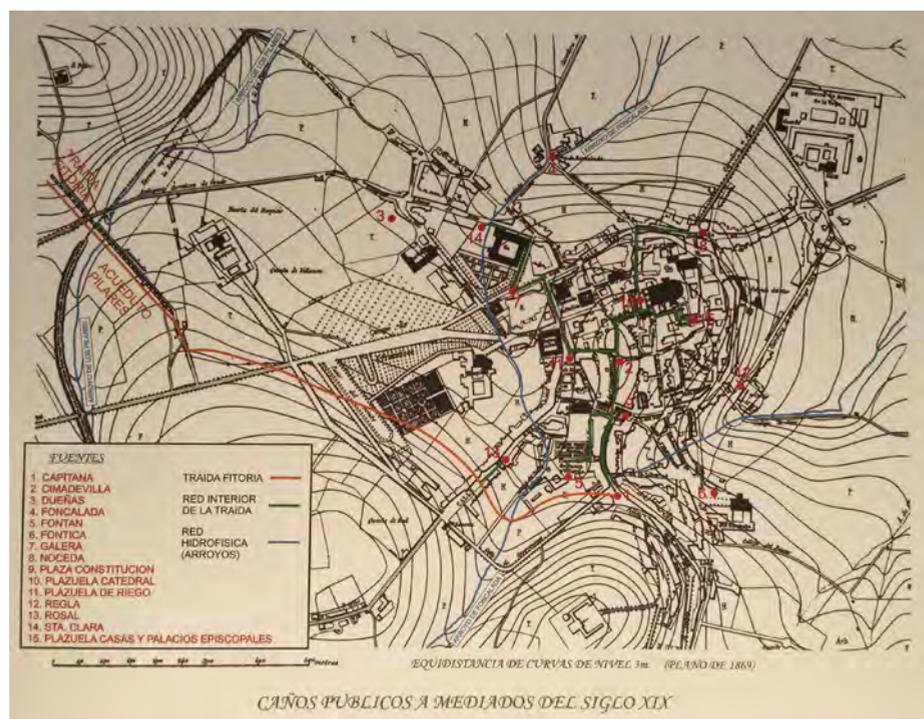


Figura 13. Distribución de conducciones de agua en el Oviedo del siglo XIX.

Fuente (Abril San Juan, 2005).

Dos años después funcionaba ya una comisión de aguas que gestionaba el servicio a domicilio, el cual se convertía en un signo de distinción social; y en

<sup>118</sup> Cantero, 2015.

1880 se empiezan a instalar los primeros contadores de consumo por vivienda, aunque con muy mal funcionamiento, por lo que se mantendrán los métodos anteriores: el «caño libre» y la «llave de aforo». Asimismo, ante el gran derroche en las fuentes públicas se imponen restricciones en 1882, cerrándose su alimentación entre las 23 y las 5 horas.<sup>119</sup> En este Oviedo finisecular, el tener un buen abastecimiento de agua a domicilio era un signo de estatus socioeconómico en las viviendas de la burguesía, como lo había sido antes para la catedral en el siglo XIII, las comunidades conventuales en el XVII o los palacios de la nobleza a finales del siglo XVIII. Asimismo, esta nueva gestión del agua se hizo imprescindible para tratar de contener las epidemias de cólera o tífus, tan frecuentes a lo largo de estas décadas entre las poblaciones asturianas.<sup>120</sup>

Hasta principios del siglo XX, Oviedo se abastecía del agua captada en el entorno de la ciudad, con un radio de 3 km delimitado por las cotas del Naranco y San Esteban de las Cruces;<sup>121</sup> pero ya desde los años finales de la centuria anterior se preveía la imperiosa necesidad de buscar agua más allá de este contorno inmediato. Así, en la *Memoria* redactada en 1895 por José Suárez se analizaba la viabilidad de una ambiciosa traída prevista desde los manantiales del Aramo, de gran caudal y calidad, considerando este ingeniero que no era viable ni aconsejable aprovechar los manantiales del Naranco por su escasez, ni tampoco una captación del río Nora por su insalubridad.<sup>122</sup> Al año siguiente, Enrique Galán elabora un anteproyecto de captación sobre los manantiales que dan origen a los ríos de Riosa y Morcín, y se estudia la traza desde el manantial de Arruxines, diseñando además un nuevo depósito en la zona de Buenavista. Un año después se redactaba el proyecto de construcción, con tubería de fundición, pero el Ayuntamiento, incapaz de asumir el coste, recurrirá al Ministerio de Fomento, que aprueba y adjudica las obras entre 1899 y 1900. En 1903 llegan las primeras aguas de Morcín, de Arruxines concretamente, inaugurándose en 1905 el depósito de Buenavista y en 1911 la traída desde el manantial del Code en Riosa. Mientras tanto, desposeído ya de su primigenio uso y sin la necesaria valoración y protección patrimonial, en 1910 se aprueba la demolición del acueducto de Los Pilares, la cual se ejecutará entre 1915 y 1918, salvándose cinco arcos únicamente.<sup>123</sup>

---

<sup>119</sup> Abril San Juan, 2005.

<sup>120</sup> Sánchez Fernández, 2011.

<sup>121</sup> Abril San Juan, 2005.

<sup>122</sup> Suárez, 1896.

<sup>123</sup> Pastor, 1987.

Tan solo una década después de su puesta en funcionamiento el canal del Aramo resultaba ya insuficiente ante el vigoroso crecimiento poblacional de la ciudad, y a principios de los años veinte no llegaba el agua necesaria para cubrir toda la demanda, por lo que había que recurrir de nuevo a los cortes nocturnos. En 1925 se sustituyen algunos tramos críticos de la tubería de hierro por una nueva de acero fundido, ampliándose la captación de los manantiales del Aramo con el tramo Llamo-Code. Al año siguiente Idelfonso Sánchez del Río redactaba el proyecto de un nuevo depósito en El Picayón (El Cristo), rematándose su construcción en 1931 e iniciándose a partir de entonces un periodo de superávit hidráulico.<sup>124</sup> Durante la guerra y el sitio de Oviedo, el canal del Aramo será volado, y la población de Oviedo, como antaño, tendrá que recurrir a los manantiales inmediatos a la ciudad, lo que obligará a racionar el consumo de agua.

Entre 1942 y 1951 se realizan varios proyectos de ampliación del abastecimiento y de aprovechamiento de nuevos manantiales en Morcín, en la falda oriental del Aramo,<sup>125</sup> pero hasta 1965 no se finalizarán las captaciones de Cortes y Fuentes Calientes en Quirós, para cuyo trasvase al canal principal hubo que horadar 15 km de túnel a través de la Cobertoria, tras el Aramo (Figura 14). La solución de abastecimiento de agua, primero desde la vertiente oriental del Aramo y después desde Quirós, atravesando la divisoria de aguas entre ambos concejos, tiene su origen en las grandes diferencias de pendientes que causan la abrupta elevación de la sierra caliza del Aramo y Peña Rueda, diferencias de cota que pueden superar los 1000 m en apenas 3 o 4 km desde la cima hasta los valles inferiores, por ejemplo en las cercanías de La Vega de Riosa. En estos casos, el agua meteórica se precipita pendiente abajo formando numerosos regatos y arroyos que han ido excavando modestos valles y cuyas aguas son artificialmente captadas en su parte inferior hasta unir las a la conducción general del canal. La insuficiencia de suministro ya comentada hizo necesario saltar de Lena a Quirós atravesando La Cobertoria con un costoso túnel de 15 km al que llegan los ríos de Cortes, Lindes o Fuentes Calientes que captan aguas de numerosos arroyos preferentemente desde la abrupta vertiente occidental del río Lindes. Y la formación y abrupta topografía de estas dos moles de roca es debida a la estructura geológica de la zona ya parcialmente descrita hace dos siglos.<sup>126</sup> La totalidad de la sierra del Aramo, desde la Mostayal

---

<sup>124</sup> Abril San Juan 2005; Villa García 2005.

<sup>125</sup> Abril San Juan 2005.

<sup>126</sup> Truyols y Martínez-García, 1982.

hasta casi La Cobertoria y por otro lado la Peña Rueda, no es más que relieves generados por la acumulación de estratos calizos a mediados del periodo Carbonífero (unos 300 millones de años), los de la conocida como *caliza de montaña*, plegados, fragmentados y verticalizados por los tremendos empujes de la orogenia hercínica pocos millones de años después.



Figura 14. Captación de Cortes (Quirós). Fuente: elaboración propia.

Finalizando ya nuestra particular pequeña gran historia, el crecimiento de la ciudad durante la etapa del desarrollismo en los años sesenta hace que estas mejoras en la traída del Aramo se queden cortas, y un informe de la Confederación Hidrográfica del Norte advertía de estas debilidades en el sistema de abastecimiento hidráulico ovetense. Entre 1970 y 1971 resultan evidentes los problemas de falta de caudal en el suministro de la ciudad, provocando escasez por el verano y cortes nocturnos. En 1973 se publica el *Proyecto de ampliación del abastecimiento de agua de Oviedo. Presa de los Alfilorios*, en el que se establecía la necesidad de construir el embalse ante el crecimiento poblacional; las obras se ejecutan entre 1976 y 1978.<sup>127</sup> Acercándonos ya a nuestros días, y como hitos

---

<sup>127</sup> Abril San Juan, 2005.

más recientes, cabe destacar cómo en 1982 se incorpora la aportación hidráulica proveniente del Alto Nalón, una segunda vía de suministro para la ciudad; mientras que en 1995 entrará en funcionamiento el túnel del Aramo, que incrementa notablemente la capacidad de transporte de agua. Este ciclo se cierra en la etapa más actual con la construcción de los sextos depósitos del Cristo, cuyas obras se prolongaron entre 2004 y 2021 con algunas paralizaciones intermedias. Representan todas ellas las últimas respuestas de la ciudad en la mejora de su abastecimiento hidráulico, constatándose nuevamente esa relación directamente proporcional existente entre el crecimiento de la población y la necesidad de ampliar el rendimiento del sistema de suministro de agua, como hemos visto que sucedía también en el Oviedo del siglo XIII, del XVI o del XIX, cuando se advierte cómo las principales obras de mejora de la red coinciden o son inmediatamente posteriores a periodos de incremento demográfico de la población ovetense.

## REFERENCIAS

ABRIL SAN JUAN, Gregorio: *Historia del abastecimiento de agua a Oviedo*, Oviedo: Ed. Corondel, 2005.

ÁLVAREZ FERNÁNDEZ, María: *Oviedo a fines de la Edad Media. Morfología urbana y política concejil*, Oviedo: KRK Ediciones, 2009.

ARAMBURU, Carlos y BASTIDA, Fernando (eds.): *Geología de Asturias*, Gijón: Trea Ediciones, 1995.

ARAMBURU, Carlos y BASTIDA, Fernando: *Geología de Asturias. Visor cartográfico. 1:50.000*, Madrid: Instituto Geológico y Minero de España IGME-CSIC, 1995.

ARGÜELLO MENÉNDEZ, José Jorge: «El abastecimiento de agua en la villa de Uviéu durante la Edad Media», *Memorana*, 1, (1997), 35-44.

——— (2008): *La industria de la ciudad de Uviéu en la época medieval*, Areia Branca: Ed. Vessants, 2008.

CANELLA Y SECADES, Fermín: *El libro de Oviedo*, Oviedo: 1888.

CANTERO FERNÁNDEZ, Cristina: *El agua en la vida cotidiana. Fuentes, lavaderos y abrevaderos de Asturias*, Gijón: Red de Museos Etnográficos de Asturias, 2015.

CASTRO, Daniel, SOUTO, Martín, FRAGA, María Isabel, GARCÍA-RODEJA, Eduardo, PÉREZ-DÍAZ, Sebastián, LÓPEZ-SÁEZ, José Antonio y PONTEVEDRA-POMBAL, Xabier: «High-resolution patterns of palaeoenvironmental changes during the Little Ice Age and the Medieval Climate Anomaly in the northwestern Iberian Peninsula», *Geoscience Frontiers*, 11(5), (2020), 1461-1475.

CONDE, Ernesto: «El Fontán: laguna, fuente y túnel», *X-XI Ciclos de Conferencias de la SOF, 2.ª época 2012-2013*, Oviedo: 2013, 59-115.

CORONAS GONZÁLEZ, Santos M. (dir.): *Ordenanzas del Ayuntamiento de Oviedo* de 1 de enero de 1784, capítulo xx, en *Fueros y Ordenanzas de Oviedo*, Colección «Fuentes e instituciones tradicionales del Principado de Asturias», vol. II, Oviedo: 2003.

CUARTAS RIVERO, Margarita: *Oviedo y el Principado de Asturias a fines de la Edad Media*, Oviedo: IDEA, 1983.

CUESTA FERNÁNDEZ, José y DÍAZ CANEJA, Moisés: «La venida de Alfonso XI a San Salvador», *Boletín del Real Instituto de Estudios Asturianos*, 33, (1958), 57-60.

DÍAZ GONZÁLEZ, Tomás Emilio: «Guía para la identificación de los bosques, matorrales y series de vegetación (vegetación potencial) de Asturias (España) mediante bioindicadores fitocenológicos», *Boletín de Ciencias Naturales del RIDEA*, 53(9), (2015), 5-94.

DIRECCIÓN GENERAL DEL AGUA DEL MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y EL RETO DEMOGRÁFICO: Información correspondiente a la Demarcación Hidrográfica del Cantábrico Occidental año 2019. *Informe de seguimiento de Planes Hidrológicos y Recursos Hídricos*, Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2020.

ESTRADA GARCÍA, Rogelio: «Excavaciones arqueológicas en la ampliación del Museo de Bellas Artes de Asturias. Oviedo», *Intervenciones en el Patrimonio Cultural Asturiano*, Oviedo: Gobierno del Principado de Asturias, 2014, 192-216.

FERNÁNDEZ ÁLVAREZ, José Manuel: *La fuente de Fitoria. El problema del abastecimiento de agua a la ciudad de Oviedo (1568-1613)*, Oviedo: Universidad de Oviedo, 1996.

FERNÁNDEZ BUELTA, José María: *Ruinas del Oviedo primitivo*, Oviedo: IDEA, 1948.

FERNÁNDEZ CONDE, Francisco Javier, TORRENTE FERNÁNDEZ, Isabel y DE LA NOVAL, Guadalupe: *El monasterio de San Pelayo de Oviedo. Historia y Fuentes*, vol. II., Oviedo: IDEA, 1978.

FERNÁNDEZ HEVIA, José María y ARGÜELLO MENÉNDEZ, José Jorge: «Dos puentes antiguos al suroccidente de Oviedo: los puentes de Gubín y Godos», *Asturiensia medievalia*, 7, (1993), 207-223.

FERNÁNDEZ LLANEZA, Carlos: *Los Pilares de Oviedo*, Oviedo: Septem Ediciones, 2007.

FERNÁNDEZ SAN FELICES, Jaime: *Libro de Acuerdos del concejo de Oviedo (1499). Edición y estudio diplomático*, Fuentes y Estudios de Historia de Asturias, Oviedo: RIDEA, 2008.

GARCÍA DE CASTRO VALDÉS, César: *Arqueología Cristiana de la Alta Edad Media en Asturias*, Oviedo: RIDEA, 1995.

——— y RÍOS GONZÁLEZ, Sergio: «El origen de Oviedo», J. A. Fernández de Córdoba Pérez (coord.): *Estudios sobre la Edad Media en el norte de la península ibérica. Anejos de Nallos*, 3, (2016), 31-119.

GARCÍA-HERNÁNDEZ, Cristina: «Los temporales de nieve de 1888 en Asturias: respuesta social e institucional», *Investigaciones Geográficas*, 71, (2019), 97-117.

GONZÁLEZ MONTES, Beatriz, ESTRADA GARCÍA, Rogelio y GUTIÉRREZ GONZÁLEZ, José Avelino: «Los cultos a las aguas y sus santuarios asociados. Oviedo y las fuentes-ninfeo del noroeste», P. J. Cruz, B. Sánchez, J. Torres y O. Santana (coords.): *Los paisajes sagrados a escena. Visiones plurales*, Valladolid: Junta de Castilla y León, (2021), 73-84.

GUTIÉRREZ CLAVEROL, Manuel: «Acerca del encañado de la Granda de Anillo», *Anuario de la Sociedad Protectora de la Balesquida*, 2, LXXXVII, (2017), 223-258.

——— y TORRES ALONSO, Miguel: *Geología de Oviedo*, Oviedo: Ed. Paraíso, 1995.

GUTIÉRREZ CLAVEROL, Manuel, LUQUE CABAL, Carlos y PANDO GONZÁLEZ, Luis Alberto: *Canteras históricas de Oviedo «Aportación al Patrimonio Arquitectónico»*, Oviedo: Editado por Hércules Astur, 2012.

GUTIÉRREZ GONZÁLEZ, José Avelino: «Arqueología de la temprana Edad Media en Asturias: sobre los orígenes antiguos de Oviedo», M. A. Blas Cortina (coord.), *Arqueología de época histórica en Asturias*, Oviedo: RIDEA, (2018), 13-46.

HEREDIA ALONSO, Cristina: «Nuevas aportaciones al estudio de la traída de aguas de Fitoria (Oviedo). Los proyectos de Gonzalo de La Bárcena, Fontanero del Reino», y Domingo de Mortera para las fuentes ovetenses», E., Almarcha, P. Martínez-Burgos y E. Sainz (eds.): *El Greco en su IV Centenario: patrimonio hispánico y diálogo intercultural*, Toledo: Universidad de Castilla La Mancha, (2016), 723-737.

——— «Agua y ciudad: la evolución de los modelos arquitectónicos de fuentes en la Asturias barroca», M.<sup>a</sup> A. Fernández Valle, C. López Calderón y I. Rodríguez Moya (eds.), *Espacios y muros del barroco iberoamericano*, vol. 6, Santiago de Compostela-Sevilla: 2019, 445-461.

KAWAMURA, Yayoi: «Traída de agua para el monasterio de Santa María de la Vega de Oviedo, proyecto del arquitecto Melchor de Velasco», *Liño*, 12, (2006), 89-97.

——— *Arquitectura y poderes civiles. Oviedo 1600-1680*, Oviedo: RIDEA, 2006.

MADOZ, Pascual: *Diccionario Geográfico-Estadístico-Histórico. Asturias*, Madrid: 1861.

MIGUEL VIGIL, Ciriaco: *Colección Histórico Diplomática del Ayuntamiento de Oviedo*, Oviedo: 1889.

MORENO, Ana, LÓPEZ-MERINO, Lourdes, LEIRA, Manel, MARCO-BARBA, Javier, GONZÁLEZ-SAMPÉRIZ, Penélope, VALERO-GARCÉS, Blas y ITO, Emi.: «Revealing the last 13,500 years of environmental history from the multiproxy record of a mountain lake (Lago Enol, northern Iberian Peninsula)», *Journal of Paleolimnology*, 46(3), (2011), 327-349.

MUÑOZ JIMÉNEZ, Julio: «El relieve, el clima y las aguas». En: *Geografía de Asturias. Geografía física. Asturias*, Salinas: Ayalga Ediciones, 1982.

PASTOR CRIADO, María Isabel: «El Acueducto de los Pilares de Oviedo», *Liño*, 7, (1987), 39-54.

PONTEVEDRA-POMBAL, Xabier, CASTRO, Daniel, SOUTO, Martín, FRAGA, Isabel, BLAKE, William H., BLAAUW, Martin y GARCÍA-RODEJA, Eduardo: «10,000 years of climate control over carbon accumulation in an Iberian bog (southwestern Europe)», *Geoscience Frontiers*, 10 (4), (2019) 1521-1533.

REQUEJO PAGÉS, Otilia: «San Vicente de Oviedo», A. García Álvarez-Busto (ed.): *Asturias monástica. Catálogo de monasterios y revisión histórica-arqueológica (siglos XI-XIX)*, *Anejos de Nailos*, 7, (2020), 23-45.

RÍOS GONZÁLEZ, Sergio: «Excavaciones arqueológicas en la calle de Cimadevilla (1992). Contribución al estudio de las redes de suministro de agua potable de época medieval y moderna en la ciudad de Oviedo», *BRIDEA*, 150, (1997), 75-99.

——— «La fuente de Foncalada: paralelos técnicos, formales y funcionales», *Zephyrus*, 52, (1999), 261-278.

RODRÍGUEZ BALBÍN, Herminia: *De un monte despoblado a un fuero real: 700 a 1145. Estudio de los primeros siglos del desarrollo urbano de Oviedo*, Oviedo: 1977.

RUIZ-FERNÁNDEZ, Jesús y GARCÍA-HERNÁNDEZ, Cristina: «Morfología y evolución glaciár en el Macizo del CorniÓN (Picos de Europa, Montañas Cantábricas)», *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe*, 40, (2018), 29-68.

SÁNCHEZ FERNÁNDEZ, Luis Vicente: *Cólera morbo asiático en Asturias. Epidemias de 1834, 1854/55, 1865/66 y 1885*, Oviedo: Ed. Imprenta Noval, 2011.

SANZ FUENTES, María Josefa: «La traída de aguas a Oviedo contratada por el Cabildo Catedral a mediados del siglo XIV», *La Balesquida*, (2012), 145-148.

SAZ SÁNCHEZ, Miguel Ángel: *Temperaturas y precipitaciones en la mitad norte de España desde el siglo XV*. CPNA, Zaragoza: Diputación General de Aragón, 2003.

SUÁREZ, José: *El problema de las aguas en Oviedo*, Oviedo: Imprenta de Pardo, Gusano y Compañía, 1896.

TRUYOLS, Jaime y MARTÍNEZ-GARCÍA, Enrique: «Una descripción geológica del carbonífero cantábrico en 1831», *Acta Geológica Hispánica*, 17, (1982), 133-137.

VILLA GARCÍA, Luis Manuel: «Los depósitos de abastecimiento de aguas de Oviedo», *Revista Técnica Industrial*, 258, (2005), 50-54.

VILLA GONZÁLEZ-RÍO, María Palmira: *Catálogo-Inventario del Archivo Municipal de la Ciudad de Oviedo*, Oviedo, 1987.



El agua, tan cotidiana como fascinante. Resulta difícil exagerar su importancia para los seres humanos: calma la sed, limpia, refresca, riega, divierte y comunica, pero también anega, desgasta, ahoga, enmohece, divide o arrastra. Pocas cosas tienen un papel tan protagonista en el aspecto de nuestro planeta, en los seres que lo pueblan, y en las expresiones humanas de cualquier tiempo y lugar. Conocer el agua en todas sus facetas supone adentrarse en la historia de la humanidad, de la vida, de la Tierra que la acoge e incluso del cosmos en su conjunto. Y eso es lo que invita a hacer este libro, escrito por especialistas de diferentes disciplinas para zambullirse en el agua y la gran historia que la explica.

La expresión gran historia designa un enfoque académico consolidado, que se origina en las últimas décadas del S. XX a partir de los trabajos de David Christian, Fred Spier, William McNeill, Walter Álvarez y otros autores, con el propósito de integrar los relatos generados por las diversas ciencias (naturales, sociales y humanas) y así ofrecer un retrato lo más amplio posible de todo lo que hay. La Universidad de Oviedo es una de las pocas del mundo que alberga cursos de gran historia y un grupo de investigación dedicado a ella. Este libro es el resultado de su trabajo en equipo y a la vez un primer paso en un apasionante camino de conocimiento transdisciplinar que cualquier persona interesada puede recorrer.



**ediuno**

Ediciones de la  
Universidad de Oviedo

