



Universidad de Oviedo



CENTRO INTERNACIONAL  
DE POSTGRADO

CAMPUS DE EXCELENCIA  
INTERNACIONAL

Máster en Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica

TRABAJO FIN DE MÁSTER

# DESARROLLO DE UN MODELO GEOLÓGICO PARA EL CENTRO URBANO DE GIJÓN

ADRIÁN GARCÍA RODRÍGUEZ

JUNIO - 2018



## Máster en Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica

Universidad de Oviedo



D. Adrián García Rodríguez, autor del Trabajo Fin de Máster titulado “Desarrollo de un modelo geológico para el centro urbano de Gijón”, confirma que es un trabajo original y solicita su presentación en el Máster Universitario Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica de la Universidad de Oviedo.

En Oviedo, a 15 de junio de 2018

Fdo. Adrián García Rodríguez

El Dr. Luis A. Pando González, Profesor del Departamento de Geología de la Universidad de Oviedo, confirma que ha tutelado el trabajo “Desarrollo de un modelo geológico para el centro urbano de Gijón”, realizado por D. Adrián García Rodríguez, y autoriza su presentación y defensa como Trabajo Fin de Máster en el Máster Universitario en Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica de la Universidad de Oviedo.

En Oviedo, a 15 de junio de 2018

Fdo. Luis A. Pando González

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero expresar mi total y más sincero agradecimiento al Dr. Luis Alberto Pando, profesor del Departamento de Geología y tutor del presente trabajo. Es de destacar su total colaboración e implicación, haciendo que el hecho de residir fuera de Asturias no me fuera impedimento alguno para la realización del proyecto, además de poder aprender de él, dado el alto grado de conocimiento que atesora.

En segundo lugar, agradecer a Pelayo Fernández su total disposición para asesorarme con las diferentes trabas que me fueron surgiendo durante estos meses. Sin duda fue como un segundo tutor.

Agradecer también al Dr. Germán Flor por las observaciones realizadas.

Finalmente, agradecer a mi familia por permitirme abordar esta etapa universitaria que hoy finalizo, así como a mi novia, amigos, compañeros de clase y al grupo de Touro. Este trabajo es también parte de todos ellos.

# ÍNDICE

<i>Contenido</i>	<i>Página</i>
<b>Resumen</b>	1
<b>Abstract</b>	2
<b>1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES</b>	3
<b>1.1 La ciudad</b>	4
1.1.1 Situación geográfica	4
1.1.2 Historia y evolución urbanística	6
1.1.3 Orografía e hidrografía	8
1.1.4 Climatología	10
<b>1.2 Marco geológico-geotécnico</b>	11
1.2.1 Generalidades	11
1.2.2 Materiales	12
1.2.3 Estructura	17
1.2.4 Hidrogeología	18
1.2.5 Comportamiento geotécnico	19
<b>1.3 Objetivos</b>	21
<b>2. METODOLOGÍA</b>	22
<b>2.1 Obtención de datos</b>	22
<b>2.2 Base de datos</b>	23
2.2.1 Recursos cartográficos	23
2.2.2 Recursos geológicos	24
<b>2.3 Tratamiento de datos</b>	26
2.3.1 Información geográfica	26
2.3.2 Información geológica	29
2.3.3 Datos hidrogeológicos	33
<b>2.4 Mecanismos de interpolación</b>	34
<b>2.5 Mecanismos de validación</b>	38
<b>2.6 Obtención de superficies geológicas</b>	41
<b>3. RESULTADOS</b>	43
<b>3.1 Aspectos geográficos</b>	43
3.1.1 Modelo Digital de Elevaciones	43
3.1.2 Cartografía urbana	47
<b>3.2 Interpolación</b>	49
<b>3.3 Cartografía geológica</b>	52

<b>3.4 Unidades geológicas</b>	55
3.4.1 Rellenos antrópicos	55
3.4.2 Depósitos litorales	57
3.4.3 Fangos organógenos y turbas	59
3.4.4 Depósitos eluviales	61
3.4.5 Sustrato rocoso	63
<b>3.5 Hidrogeología</b>	66
<b>3.6 Estructura</b>	68
<b>3.7 Modelo 3D final</b>	70
<b>4. CONCLUSIONES</b>	72
<b>5. BIBLIOGRAFÍA</b>	75

---

**Resumen:** el desmesurado aumento de la población junto con la globalización tiene como consecuencia un crecimiento exponencial de la realización de obras y grandes infraestructuras, lo que nos obliga a interaccionar permanentemente con los materiales del subsuelo. En este sentido, la geología urbana viene desarrollando en los últimos años modelos geológicos que integran toda la información de una zona, sobre todo, de las áreas urbanas, obtenida fundamentalmente a través de datos de prospecciones y observaciones in situ. Estos modelos permiten ahondar en el entendimiento de los diferentes tipos de materiales sobre los que descansan las urbes, así como su distribución espacial en las tres dimensiones, ayudando, en definitiva, a mejorar los diseños de cimentaciones, excavaciones, etcétera. Así mismo, tienen un efecto directo en la elaboración de mapas de riesgo y ordenación del territorio, teniendo como objetivo último minimizar lo máximo posible los incidentes producidos por un insuficiente conocimiento del subsuelo. El punto de partida para la elaboración de dichos modelos consiste la obtención de una superficie topográfica detallada, pues será la capa de referencia a partir de la cual se obtendrán el resto de las superficies geológicas. Estas, serán calculadas a partir de los datos incluidos en las diferentes prospecciones recopiladas, cuya información ha sido previamente validada mediante diferentes criterios, tanto matemáticos como, fundamentalmente, geológicos. En este trabajo se dispone de un total de 475 prospecciones, destacando los 301 sondeos, los cuales, junto con las calicatas y las observaciones superficiales, conforman un total de 3.896 m testificados. La elaboración de las superficies geológicas se basa en la utilización de mecanismos de interpolación, incluidos en los Sistemas de Información Geográfica. En el presente estudio, todas las superficies fueron obtenidas mediante una función de base radial (RBF) denominada multicuadrícula, un mecanismo de interpolación exacto. Las superficies geológicas -bajo el centro urbano de Gijón- elaboradas en este trabajo son, de más moderna a más antigua: la base de los rellenos antrópicos, extendidos por más del 80 % del área estudiada, llegando a los 8 m de potencia; la base de los depósitos litorales (arenas y marismas), mostrando acumulaciones de más de 22 m de espesor; tres depósitos inconexos de fangos organógenos, intercalados entre las arenas y con una distribución muy irregular tanto en profundidad como en planta y, los depósitos de alteración profunda o eluviales, de potencia variable con máximos de 10 m, resultado de la alteración del sustrato rocoso (Fm. Gijón), cuyo techo se sitúa hasta a 24 m bajo la superficie topográfica, evidenciando el gran volumen de depósitos cuaternarios existentes en la zona de estudio. Para completar el modelo se han realizado aproximaciones al contexto hidrogeológico de los depósitos litorales mediante el cálculo de las isopiezas del acuífero cuaternario. Además, se obtuvo información estructural sobre del trazado de varias potenciales fallas, después de realizar diferentes interpretaciones del techo del sustrato rocoso y las pendientes de este. Finalmente, para dotar al modelo 3D de un aspecto más realista y atractivo, se incorporaron a este todos los elementos del entramado urbano (calles, edificios, zonas verdes, playas, fuentes, etcétera), los cuales, representados según su altura aproximada, otorgan al producto final una mejor referencia tanto espacial como visual.

**Palabras clave:** geología urbana; SIG; modelización geológica; 3D; Gijón.

---

---

**Abstract:** The excessive increase of the population together with globalization, has consequently an exponential growth in the execution of civil works, what forces us to interact continuously with the materials of the subsoil. In this sense, urban geology has been developing, in recent years, geological models that integrate all the information of an area, especially urban areas, obtained primarily through data from surveys and in situ observations. These models allow to increase the understanding of the different types of materials on which the cities rest, as well as their spatial distribution in three dimensions, helping to improve the designs of foundations, excavations, etc. Also, they have a direct effect on risk mapping and planning, with the goal to minimize as much as possible incidents caused by insufficient knowledge of the subsoil. The starting point for the elaboration of these models consists of obtaining a topographic surface with a high degree of detail, since it will be the reference layer from which the rest of the geological surfaces will be obtained. These will be calculated from the data included in the different surveys compiled, whose information has been previously validated by mathematical and, fundamentally, geological criteria. This paper has a total of 475 surveys, highlighting 301 holes, which, together with test pits and surface observations make a total of 3896 m logged. The elaboration of the geological surfaces is based on the use of interpolation mechanisms, included in the SIG programs. In the present study, all the surfaces were obtained by a radial basis function (RBF) called multiquadric, an exact interpolation mechanism. The geological surfaces under Gijón elaborated in this work are, from more modern to older: the base of anthropic deposits, extended by more than 80 % of the studied area, reaching 8 m of thickness; the base of the coastal deposits (sands and marshes), showing accumulations of more than 22 m thick; three disconnected deposits of organogenic mud, interspersed between the sands and with a very irregular distribution in depth and in plant and, the deposits of deep alteration, with variable thickness with maximums of 10 m, result of the alteration of the rock materials (Fm. Gijón), whose top is located up to 24 m below the topographic surface, evidencing the large volume of quaternary materials in the study area. To complete the model, approximations have been made to the hydrogeological context of the coastal deposits by calculating the top shape of the quaternary aquifer. In addition, after making different interpretations of the top of the rocky substrate and its slopes, structural information was obtained by the drawing of several potential faults. Finally, to give the 3D model a more realistic and attractive appearance, all the urban elements were incorporated into it (streets, buildings, parks, beaches, ponds, etc.), which represented according to their approximate height, give the final product a better spatial and visual reference.

**Key words:** urban geology; SIG; geological modeling; 3D; Gijón.

---

## 1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

El presente estudio se enmarca en el grupo de trabajos de modelización geológica en entorno urbano, tratándose de un tipo de estudios de creciente interés para la comunidad científica y necesidad para la propia sociedad. Estos trabajos, que comenzaron a desarrollarse desde hace unos años en ciudades europeas como Lisboa, Oslo o Viena, se fueron extendiendo en el mapa hasta territorio nacional, con la realización de modelos geológicos a escala local del subsuelo de A Coruña, Barcelona y, más recientemente, Oviedo, este último, también bajo el amparo del Máster en Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica de la Universidad de Oviedo. Es por ello por lo que este trabajo pretende continuar avanzando en este campo de la geología, ahora, bajo el estudio del subsuelo de Gijón.

Vivimos en un planeta donde cada día que pasa el número de habitantes crece a pasos agigantados, además, el progresivo abandono del medio rural y la globalización, hacen que las ciudades aumenten su tamaño desmesuradamente. Todo ello tiene una repercusión sobre el medio natural, que en ocasiones no tiene buen desenlace y se traduce en catástrofes por la mala ejecución de las actividades antrópicas, en muchos casos debidas al desconocimiento del subsuelo y los procesos geológicos que operan en el medio. En este sentido, la realización de este tipo de trabajos en 3D permite ahondar en el conocimiento de los materiales bajo el subsuelo de las ciudades, las características geotécnicas de los mismos y su continuidad tanto lateral como vertical. Estos modelos, condicionarán la elaboración de los mapas de riesgo y ordenación del territorio, también cada vez más presentes, de manera que se minimizarán los desastres producidos por el mal diseño de obras y grandes infraestructuras.

La elaboración de este modelo 3D sustentado por un Sistema de Información Geográfica permite al usuario conocer la información del subsuelo bajo cualquier punto de la ciudad de una forma muy rápida y sencilla. Esto puede emplearse, por ejemplo, en etapas anteriores a cualquier informe geotécnico, de manera que la realización de estos trabajos es y será una línea creciente de investigación en el amplio mundo de la geología y la geotecnia.

## 1.1 La ciudad

En este punto se realizará una breve introducción de la ciudad y, más concretamente, de la zona objeto de estudio. Para ello, se situará geográficamente y se explicarán sus divisiones administrativas (distritos y barrios) de manera que la comprensión del trabajo sea mejor cuando, en posteriores apartados, se haga referencia, por ejemplo, a un barrio o playa en concreto. De igual forma, se realizará una breve descripción de la orografía, hidrografía y climatología del lugar. Además, se narrarán unas pinceladas de la historia de la ciudad, así como de su evolución urbanística, algo muy importante, pues será fundamental para la existencia de información sobre el subsuelo, como se verá a lo largo del trabajo.

### 1.1.1 Situación geográfica

La zona de estudio consiste en un rectángulo orientado en dirección Este-Oeste (Figuras 1.1 y 1.2), el cual tiene un área de 5,2 km<sup>2</sup> (2 km por 2,6 km de lado), situado en la zona centro de la ciudad de Gijón. Ésta, a su vez, se sitúa en la zona central-septentrional de Asturias (norte de España), a 28 km de la capital del Principado, Oviedo, y a 26 km de Avilés, formando parte de una de las principales áreas metropolitanas del NO de la Península Ibérica, contando con más de ochocientos mil habitantes.

De manera más precisa, los límites del citado área de estudio, según coordenadas UTM referidas al sistema de referencia ETRS89 y huso 30N, son los siguientes: X<sub>mín</sub> 283650; X<sub>máx</sub> 286250; Y<sub>mín</sub> 4823450; Y<sub>máx</sub> 4825450.

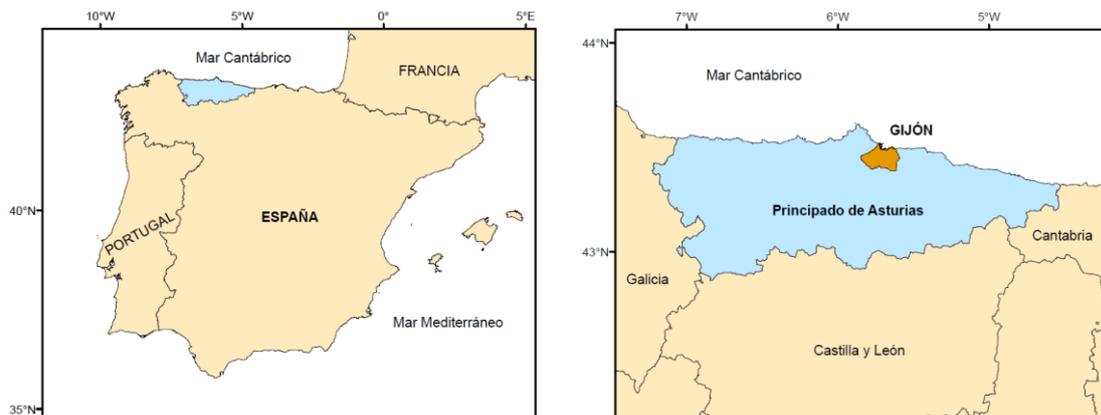


FIGURA 1.1. Contexto geográfico general.



FIGURA 1.2. Situación geográfica de la zona de estudio (PNOA 2014).

El casco urbano de Gijón ocupa un área aproximada de 13,9 km<sup>2</sup>, constituyendo aproximadamente un 8 % de la superficie total del concejo y concentrando un 90 % de la población total de este, que llega a los 280.000 habitantes aproximadamente. El 10 % de la población restante se distribuye por las 25 parroquias del Concejo. La ciudad está dividida en seis distritos municipales, los cuales constan de órganos de gestión propios para asuntos municipales y cuya extensión y límites son competencia del Ayuntamiento de la ciudad. Dichos distritos municipales están subdivididos a su vez en barrios:

- Centro: Barrios de El Centro, Cimadevilla y Laviada.
- Este: Barrios de La Arena, El Coto, El Bibio-Parque, Las Mestas, Viesques y Ceares/Ciares.
- El Llano (barrio de El Llano).
- Sur: Barrios o zonas de Pumarín, Montevil, Contrueces, El Polígono, Nuevo Gijón/La Peral, Santa Bárbara, Perchera-La Braña, Rocés y Nuevo Rocés.
- Oeste: Barrios o zonas de La Calzada, Jove/Xove, Tremañes, El Natahoyo y Moreda.
- Periurbano-rural: Cabueñes, Caldones, Castiello Bernueces, Deva, Fano, Fresno, Granda, L'Abadía Cenero, La Pedrera, Leorio/Llorio, Lavandera, Porceyo, Puaó,

parte de la Parroquia de Roces, Ruedes, San Martín de Huerces, San Andrés de los Tacones, Santurio, Serín, Somió, Tremañes (sur), Valdornón, Vega y Veriña.

Tal y como se puede comprobar en la Figura 1.3, la cual muestra tanto los distritos como los barrios de la ciudad; la zona de estudio está especialmente enfocada al distrito Centro, el cual comprende algunos de los barrios más históricos como son Centro, Cimadevilla y Laviada. Este distrito, durante los años 2000, 2001 y 2002 fue el que más población tenía, con algo más del 20 % de Gijón en cada año. A pesar de ello, desde el año 2000 la población ha ido bajando en esta área, pasando de 56.016 habitantes en 2000, a 49.180 en el año 2013 (un 17,58 % del total), siendo el distrito que más población ha perdido en ese periodo. Cabe destacar también la situación dentro de la zona de estudio de otros barrios de renombre como es de La Arena, así como gran parte de El Natahoyo, El Llano, Ceares o El Coto, estos últimos más modernos.



FIGURA 1.3. Distritos y barrios con la zona de estudio delimitada en color rojo.

### 1.1.2 Historia y evolución urbanística

El concejo de Gijón tiene un área total de 181,7 km<sup>2</sup> y está situado, desde un punto de vista general en el centro de la costa asturiana, bordeado por los concejos de Carreño, Corvera, Llanera, Siero, Sariego y Villaviciosa. Desde su fundación en el siglo V a. C. hasta pocos años atrás, Gijón fue una ciudad fundamentalmente industrial, lo que derivó

en un gran desarrollo de esta durante el siglo XX. Sin embargo, la reciente crisis de la siderurgia supuso la reconversión de la ciudad, transformándola en una urbe universitaria, con importante reclamo turístico y comercial.

La metrópoli actual es de pasado romano, como se puede comprobar en el Parque arqueológico de la Campa de Torres y, sobre todo, en el complejo termal de Campo Valdés. Los primeros asentamientos de la ciudad se produjeron en la citada Campa Torres (siglo V a. de C.), castro que fue romanizado hasta que dicha población romana descendió hacia el cerro de Santa Catalina, al tratarse de una zona más protegida de los accidentes meteorológicos, extendiéndose la ocupación en este lugar hasta el siglo III. Posteriormente, la población se fue expandiendo a lo largo del margen litoral, asentada normalmente sobre los depósitos litorales. Durante la Edad Media, se mantiene una ocupación del territorio constatada por las iglesias románicas que datan de los siglos XII y XIII. La fundación de la Puebla en el año 1270 implica una fuerte expansión urbana que se verá frenada a finales del siglo XIV, cuando Gijón se convierte en escenario de los conflictos de los Trastámara y tiene lugar la destrucción casi total de la ciudad. En torno a 1785 se llevó a cabo un importante proyecto que consistió en el saneamiento de las zonas de marismas que existían en la zona de El Humedal, lo que tendría una importante repercusión en la expansión de la ciudad, pues se convertía la zona en edificable.

El camino a seguir en la evolución urbanística se estableció cuando a finales del siglo XVIII (Siglo de las Luces) tiene lugar el diseño del marco de crecimiento espacial de Gijón, impulsado por Jovellanos y presentado al Ayuntamiento en 1782 bajo el título de “Plan de Mejoras”. El proceso de industrialización, a partir de la mitad del siglo XIX, convirtió a la ciudad en el centro industrial de Asturias con el potente Puerto de El Musel, astilleros y abundantes instalaciones fabriles. Más tarde, a finales del siglo XIX y primeras décadas del siglo XX, tuvo lugar otro hito importante en la estructuración de la ciudad tal y como la conocemos hoy en día, y fue la urbanización del barrio de La Arena y de la zona comprendida entre Begoña y la playa de San Lorenzo, cuyo desarrollo se vio completado entre los años 40 y 70. Posteriormente, en 1907, se terminó el muro de San Lorenzo hasta el puente del Piles. En los años 80 y 90 tuvo lugar una expansión de la población muy importante, centrándose en la zona meridional de la ciudad (Pumarín, Viesques-La Coría, Montevil y El Llano). En este periodo fue importante la transformación de antiguas zonas industriales a barrios residenciales, como, por ejemplo, el Natahoyo. La continua modernización de la población y las condiciones naturales de la misma han hecho de Gijón una urbe que atrae un creciente número de familias. Debido a esto, continúa el crecimiento urbano de la ciudad tanto hacia el Este (Somió), Oeste (La Calzada) y Sur (Roces), tal y como se puede observar en la Figura 1.4.

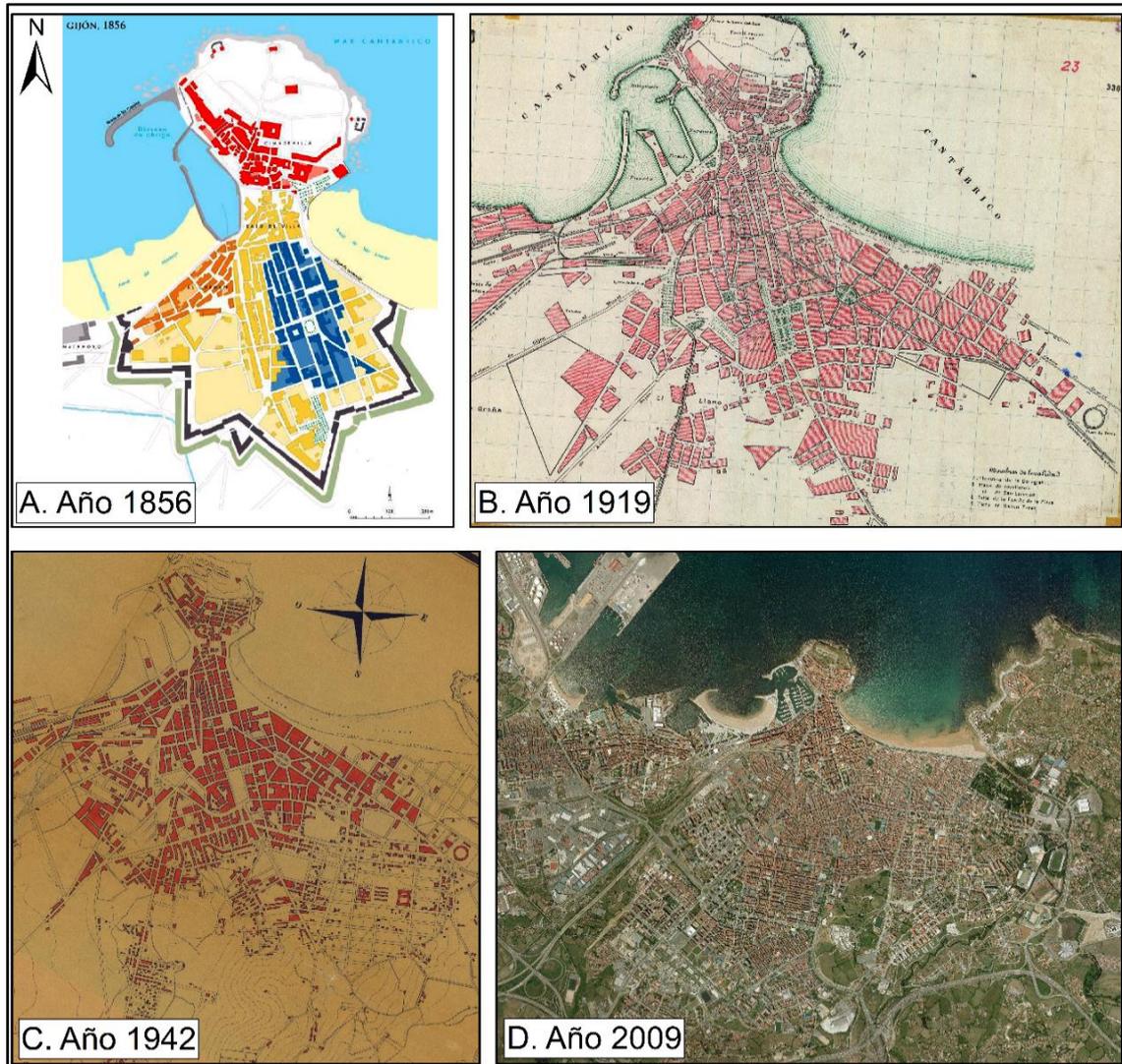


FIGURA 1.4. Diferentes episodios en el crecimiento urbanístico de Gijón. (A) tomado de Fernández Cuesta (2016); (B, C y D) datos del IGN.

### 1.1.3 Orografía e hidrografía

En líneas generales, la ciudad de Gijón, junto con las zonas adyacentes, forman un área relativamente plana bordeada por una serie de montañas, las cuales presentan una forma de arco abierto hacia el mar, destacando el Pico del Sol (439 m) y el Pico San Martín (519 m) hacia el sur, la Campa Torres (128 m) hacia el oeste y la Peña de los Cuatro Jueces hacia el sureste, que es, con 662 m, el punto más alto del municipio. Esta orografía fundamentalmente plana, dónde más del 80 % del concejo se sitúa por debajo de los 200 m, es consecuencia de la estratificación subhorizontal de los materiales del sustrato rocoso, dotando de bajas altitudes y suaves pendientes tanto a la propia ciudad como al municipio entero. La zona puramente urbana está constituida por dos dominios morfológicos, divididos por el relieve positivo que forman en conjunto el cerro de Santa Catalina y la zona de Begoña. Estos dominios son, al oeste, el drenado por los arroyos Cutis y Pílon y, al este, el drenado por el río Piles.

Tal y como se puede observar en la figura 1.5, la cual muestra únicamente el relieve de la zona de estudio, dicho área es fundamentalmente plana, destacando como gran relieve positivo el Cerro de Santa Catalina (con máximos de 44 m.s.n.m.), en la zona central superior de la figura. En segundo plano, destaca la parte SE de la zona, también con relieve positivo, adivinándose una unión entre ambas y dividiendo la ciudad en los dos dominios citados anteriormente. Por su parte, el mapa de pendientes refleja también lo explicado con anterioridad.

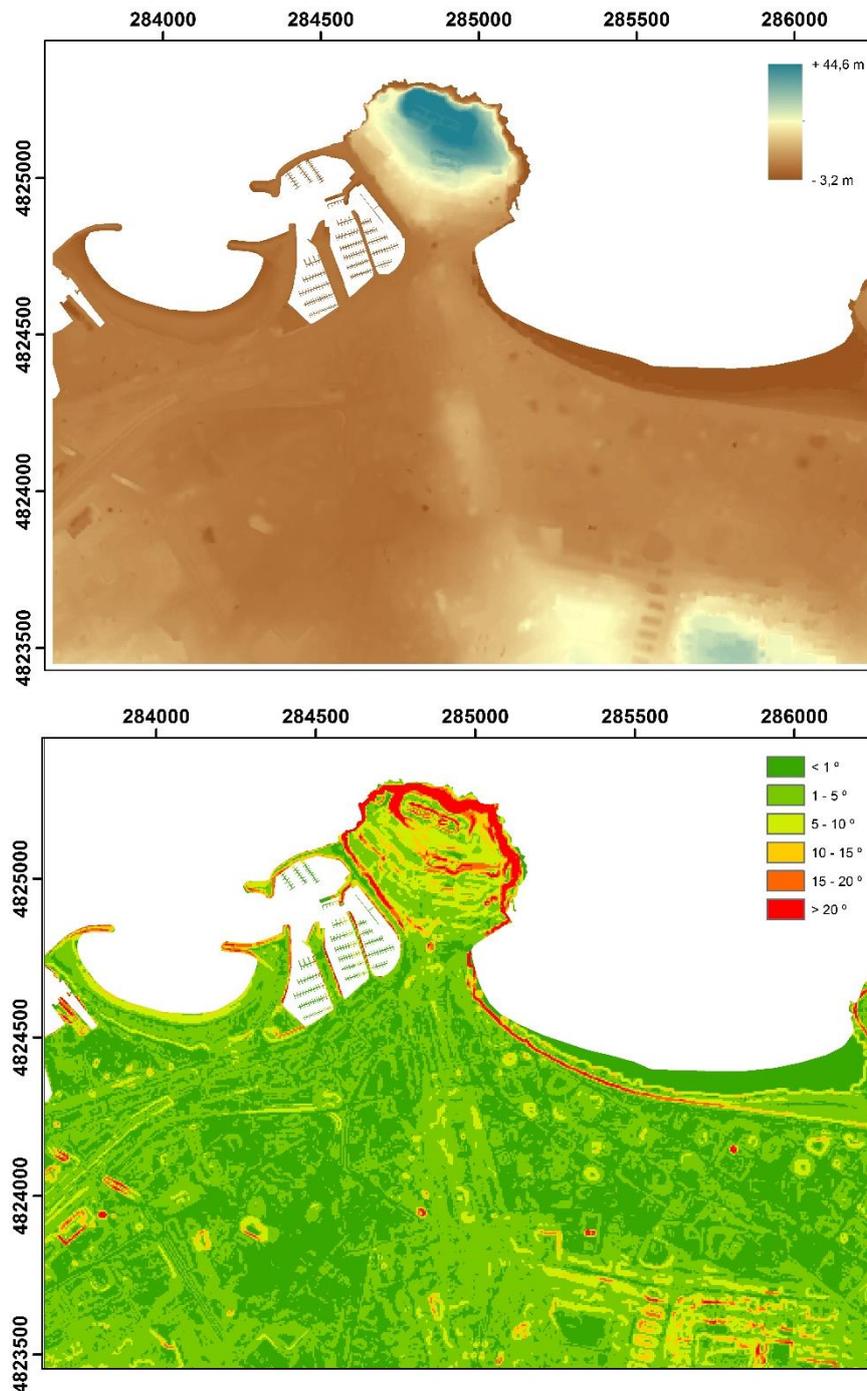


FIGURA 1.5. Modelo Digital de Elevaciones (arriba) y mapa derivado de pendientes de la zona de estudio (abajo), ambos con un tamaño de celda de 5 m. Fuente:MDT05 del IGN.

#### *1.1.4 Climatología*

El concejo de Gijón está incluido en el dominio climático de la España atlántica, por lo que presenta los rasgos típicos de dicho clima, con algunas ligeras matizaciones debido a su carácter de ciudad costera y a su relieve particular. En trabajos detallados sobre el clima de la región, tales como IGME (1981), se concluye que el clima gijonés es el resultado de la interacción entre dos factores: la dinámica atmosférica característica de latitudes medias y el choque del frente atlántico contra una cadena montañosa próxima a la línea de costa, definiéndolo como un dominio climático templado-frío oceánico caracterizado por lluvias, neblinas y baja insolación.

La práctica totalidad de las precipitaciones en Gijón son en forma de lluvia, estando presente en la mitad de los días del año, con una media anual aproximada de mil litros por metro cuadrado. La lluvia está presente en todos los meses del año, con máximos en noviembre y mínimos en julio, estando bien repartida en todas las estaciones -a excepción del verano-. Por su parte, la nieve es muy escasa, con una media de dos días anuales, aunque lo más común es que no llegue a cubrir las calles de la ciudad. Finalmente, la ciudad recibe precipitaciones en forma de granizo una media de once días al año, sobre todo en la etapa invernal, debido a los frentes fríos activos. La humedad, al igual que en todo el Principado, es notoria, con una media anual del 78 % sin destacadas oscilaciones (80 % de máximo en octubre y 75 % de mínimo en marzo). Dicha alta humedad ambiental, junto con las bajas temperaturas nocturnas en las estaciones cálidas, provocan condensaciones acuosas.

La ciudad de Gijón se caracteriza, desde un punto termométrico, por temperaturas moderadas y por una baja oscilación de estas a lo largo del año, con una media anual de 13,8 grados centígrados, de manera que se puede considerar un clima ligeramente frío a templado en invierno y, más suave y cálido en torno al verano. La tónica general de los últimos años es un aumento de las temperaturas (un grado más de media en los últimos 30 años) así como del agua del mar (tres décimas de grado en los últimos 50 años), lo que puede ser debido al famoso cambio climático ligado a la actividad humana.

La presencia de nubes es algo muy común en Gijón, ya que el 90 % de los días presentan cielos cubiertos. Por su parte, la niebla está presente una media de 39,2 días anuales. En cuanto a los vientos, al tratarse de una ciudad costera, son un fenómeno muy común. Las mediciones realizadas a lo largo de la historia marcan un claro dominio de las rachas procedentes del noreste (139 días), con picos máximos en mayo junio, seguidas por las rachas de orientación oeste, más intensas en el mes de enero.

## 1.2 Marco geológico-geotécnico

En este apartado se describirá lo relativo a la geología de la zona de estudio y de su entorno, tanto del sustrato rocoso como de las formaciones superficiales. Además, se explicará brevemente el comportamiento geotécnico de cada una de las unidades y, finalmente, se realizará una introducción a la estructura y a la hidrogeología del lugar.

### 1.2.1 Generalidades

El Principado de Asturias está ubicado, desde un punto de vista geológico, en el Macizo Ibérico, concretamente en las zonas Cantábrica y Asturoccidental-Leonesa (Lotze, 1945; Julivert *et al.*, 1972). Dicha Zona Cantábrica, que ocupa la parte central y oriental de Asturias, está fundamentalmente compuesta por rocas paleozoicas afectadas por multitud de pliegues y fallas, dando lugar a una orografía muy acentuada con la existencia de numerosas sierras y áreas deprimidas entre ellas. Inmediatamente por encima de dicho basamento, están presentes los sedimentos discordantes, los cuales presentan una deformación mucho más leve y que forman cuencas, entre las que destaca la Depresión Mesoterciaria Central de Asturias, subdividida a su vez en seis áreas atendiendo a los materiales que contiene cada una de ellas: área de Gijón, Villaviciosa, Colunga, Oviedo, Pola de Siero y Nava-Infiesto.

Atendiendo al área de interés del presente trabajo, la ciudad está situada sobre la cuenca de Gijón-Villaviciosa, formada por depósitos del Permotriás y del Jurásico (García-Ramos y Gutiérrez Claverol, 1995) y sustentada por un basamento paleozoico muy tectonizado, afectado por fallas subverticales con orientaciones preferentes NO-SE y SO-NE (Figura 1.6).

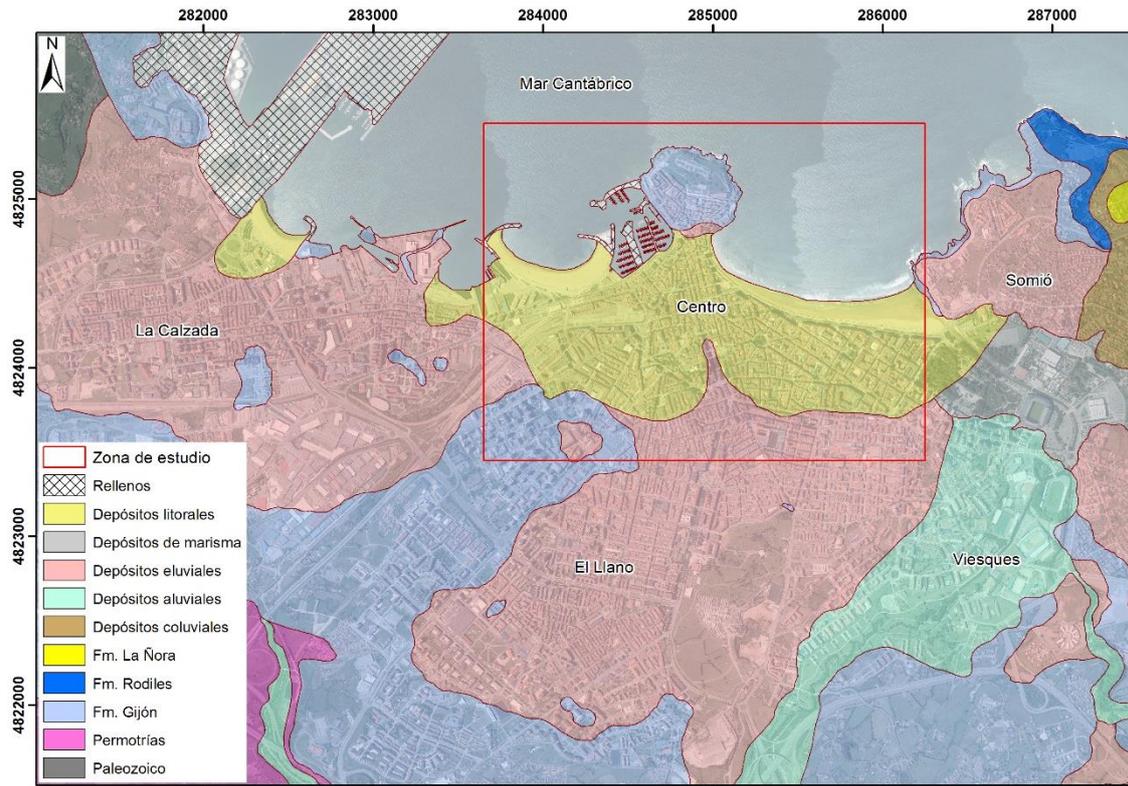


FIGURA 1.6. Mapa geológico de Gijón y alrededores (modificado de Martínez Largo, 2014).

### 1.2.2 Materiales

Los materiales rocosos del subsuelo de la ciudad están compuestos en su práctica totalidad por calizas y dolomías de la Formación Gijón, formando una serie estratigráfica paleozoica, sobre la cual se extienden los materiales cuaternarios, que llegan a ocupar el 80 % del terreno urbanizado. Dentro de los rellenos cuaternarios, destaca la secuencia de arcillas de alteración, la cual está presente en casi todo el subsuelo de la ciudad y sobre la cual se depositan el resto de los sedimentos más recientes, ya sean depósitos litorales, de marisma o rellenos antrópicos.

- **Sustrato rocoso**

La Formación Gijón (Triásico Superior-Jurásico Inferior) fue descrita por primera vez por Valenzuela *et al.*, (1986) como una formación de naturaleza carbonatada, de origen marino, situada sobre unas arcillas grises oscuras, a veces rojizas, con finas intercalaciones dolomíticas y yesos pertenecientes a la Serie de Transición. Esta formación constituye el sustrato mesozoico junto con la Fm. Rodiles, también carbonatada y las formaciones La Ñora-Vega, Tereñes y Lastres, de naturaleza siliciclástica.

La citada Formación Gijón, fue subdividida posteriormente en tres miembros (González *et al.*, 2004), que varían de potencia a lo largo de la extensión de esta, llegando en ocasiones a desaparecer. De modo general, los miembros inferior y superior son

fundamentalmente carbonatados, con algún nivel de calizas oolíticas dentro del último. Por su parte, el miembro intermedio está constituido por brechas de cantos carbonatados y matriz margosa:

- *Miembro inferior*

Está constituido por una sucesión de calizas, fundamentalmente mudstone, y dolomías de color gris claro junto alguna intercalación margosa y, puntualmente a techo, algunas brechas de colapso. Tanto las calizas como las dolomías están bien estratificadas y laminadas, y suelen presentar importantes signos de karstificación. También es notoria la presencia de moldes internos de bivalvos y gasterópodos, pero solamente en algunos niveles.

Este miembro, que aparece por primera vez al Este de la ría de Avilés y que disminuye progresivamente su espesor hacia el Este, aflora en el acantilado del cerro de Santa Catalina, ubicado en la parte central de la zona de estudio del presente trabajo (Figura 1.7). Allí, en las paredes del acantilado, afloran unos 40 metros de la parte superior del miembro, donde se distinguen 7,5 metros de brechas de colapso con cantos de tamaño variable, llegando en ocasiones a superar el metro de diámetro.

- *Miembro medio*

Este miembro está formado fundamentalmente por brechas, margas y lutitas de color gris oscuro y rojizo con nódulos carbonatados y piríticos. Entre ellos, se intercalan finos niveles de yesos, calizas y dolomías, desapareciendo lateralmente las dos últimas debido al colapso provocado por la disolución de los sulfatos provocando la rotura de las rocas carbonatadas de los niveles superiores y dando lugar a las citadas brechas. Éstas, en ocasiones, se ordenan dando lugar a secuencias granocrecientes o granodecrecientes, producidas por el colapso de sucesiones calcáreas estratocrecientes o estratodecrecientes.

Las variaciones de potencia son muy acusadas en este caso, aumentando hacia el Este, pasando de unos 10-15 metros en la zona de Avilés hasta los 80-90 metros en la zona de Fabares, Candanal y playa de La Espasa. En Gijón, el miembro medio presenta una potencia aproximada de 60 metros. Una vez más, en el cerro de Santa Catalina de Gijón, se puede observar este miembro en la parte más alta del acantilado, en contacto con el miembro inferior descrito anteriormente. Además, debido al buzamiento de la sucesión hacia el Este, se observa como el miembro medio constituye el sustrato de la playa de San Lorenzo.

- *Miembro superior*

Este miembro está constituido por una alternancia de calizas mudstone de color gris oscuro, grainstone oolíticas, calizas estromatolíticas y finalmente, en transición con la unidad superior, calizas packstone y wackstone nodulosas y bioclásticas. Así mismo, están presentes algunos niveles de brechas, pero solo de manera ocasional. Finalmente, cabe destacar la presencia puntual de calizas con granos de cuarzo de tamaño arena a gravilla, en la parte alta del miembro.

La potencia de este miembro también sufre variaciones importantes, fundamentalmente, por procesos de erosión. Hacia el occidente, presenta una potencia de unos 20-40 metros, aumentando hasta los 120 metros que presenta hacia el oriente, en el valle del río España.



FIGURA 1.7. Imagen del Cerro de Santa Catalina, con la ciudad al fondo, donde afloran los miembros medio e inferior de la Fm. Gijón (tomado de Google Maps).

- Formaciones superficiales

El casco urbano de la ciudad, objeto de estudio del presente informe, se caracteriza por una elevada densidad de edificaciones dispuestas sobre materiales de origen litoral y, en la parte continental, sobre arcillas producto de la alteración del sustrato rocoso, todo ello interrumpido en numerosas zonas por la actividad humana, que deja su sello mediante depósitos antrópicos o rellenos (Figura 1.8). Esta división sirve también para clasificar el área urbana en dos dominios geotécnicamente diferentes: el litoral y el continental (Torres Alonso *et al.*, 1998).

- *Materiales de dominio litoral*

Desde un punto de vista genético, consisten en sistemas de barrera arenosa/estuario superpuestos, generados durante tres fases sucesivas y separadas entre sí por superficies erosivas, relacionadas con el ascenso del nivel del mar en el Pleistoceno Superior y Holoceno, cuya etapa final es posterior a la transgresión flandriense, correspondiendo al sistema de playa/dunas (Flor y Lharti, 2008).

Los depósitos de dominio litoral están presentes en la playa de San Lorenzo y su continuación hacia el barrio de La Arena. Hacia occidente, se extienden hasta la playa de Poniente, existiendo, además, una pequeña zona aislada en el barrio de Natahoyo. Por su parte, hacia el oriente, se extienden hasta la desembocadura del río Piles, donde pasan a depósitos de marismas. Estos materiales de dominio litoral forman importantes acumulaciones con potencias que alcanzan los 25 m y están subdivididos en tres tramos. El tramo superior está compuesto por arenas limpias amarillentas, en ocasiones conchíferas, típicas de depósitos de playa y dunas. El tramo medio está formado por arenas y arenas limo-arcillosas grisáceas debido a la presencia de materia orgánica diseminada, además de niveles de gravas intercalados. Finalmente, el tramo basal está compuesto por materiales arenosos, gravas y niveles de turba, de carácter irregular, atendiendo tanto a espesor como a morfología (Gutiérrez Claverol *et al.*, 2002).

Los materiales arenosos son el constituyente principal de los depósitos de dominio litoral, tanto en extensión como en potencia, llegando a alcanzar los 20 metros en la zona entre Begoña y la playa de San Lorenzo. Los niveles de gravas se encuentran presentes, tal y como se citó anteriormente, en la zona exterior de la parte basal de los depósitos arenosos, no aflorando en ningún caso. Fundamentalmente están formadas por cantos rodados de composición silícea, con un pequeño porcentaje de cantos carbonatados (calizas y calizas dolomíticas). Presentan variaciones de potencia muy irregulares, existiendo dos niveles mejores o peor diferenciados según la zona.

Los depósitos de turba se encuentran formando dos o más pequeños horizontes o bien diseminados en los materiales de naturaleza arcillosa-limosa. Son niveles muy irregulares, que varían notablemente su espesor y presentan cambios laterales de facies en un espacio muy reducido, alcanzando su mejor desarrollo en la zona de El Humedal.

Por último, aunque su presencia en la zona de estudio sea eventual, cabe destacar la presencia de depósitos de marisma en la zona de desembocadura del río Piles (al este de la zona de estudio). Consiste en una mezcla de arenas, limos, arcillas y fangos, con materia orgánica diseminada.

#### - *Materiales de dominio continental*

Estos materiales ocupan el sector meridional y bordean a los materiales de dominio litoral, como sedimentos subyacentes a ellos. Estos consisten en suelos residuales originados por la alteración del sustrato rocoso calcáreo y dolomítico jurásico (Fm. Gijón). Se trata de arcillas, entre las que destaca la illita, y limos de color amarillo-parduzco y gris (Torres Alonso, 1984), las cuales contienen arenas, gravas, gravillas e incluso cantos, de manera ocasional; también contienen nódulos, tinciones ferruginosas y, en el tramo basal, fragmentos angulosos de la roca

subyacente, ya sea dolomía o caliza. Por otro lado, hay descritos en el entorno de Gijón materiales aluviales (pertenecientes a las cuencas de los ríos Aboño y Piles), pero no se va a hacer demasiado hincapié en ellos, al no aparecer representados en la zona de estudio o hacerlo de forma muy eventual. Lo mismo ocurre con los materiales originados por coluviones.

- *Rellenos antrópicos*

Los depósitos antrópicos son importantes en la ciudad de Gijón, pues cubren una gran parte del área urbana. Estos materiales se encuentran fundamentalmente en las zonas de El Humedal, Moreda, El Natahoyo y en la faja de las marismas del Piles (Parque Isabel la Católica y recinto de la Feria de Muestras). Además de estos, hay importantes depósitos antrópicos en la zona de La Arena y en el istmo que separa Cimadevilla del resto de la ciudad. El trabajo de Gutiérrez Claverol *et al.* (2002) es el estudio más detallado de los depósitos antrópicos hasta la fecha y establece que cubren un total del 40 % del dominio litoral, sin embargo, sólo se tuvieron en cuenta aquellas acumulaciones con una potencia superior a los 2 m, por lo que cabe esperar que el área cubierta por estos depósitos será, con total seguridad, superior al 40 % citado.



FIGURA 1.8. Materiales bajo el subsuelo de la ciudad: (A) sustrato rocoso (Fm. Gijón); (B); depósitos eluviales; (C) depósitos arenosos con fangos y (D) rellenos antrópicos.

### 1.2.3 Estructura

En líneas generales, el concejo de Gijón está caracterizado, desde un punto de vista estructural, por la presencia de materiales mesozoicos con bajos buzamientos (hasta 10-20 grados) con sentido NE (Figura 1.9), lo que se puede comprobar en el mejor afloramiento de la ciudad, el cerro de Santa Catalina, donde se observa la disposición subhorizontal de los estratos de la Fm. Gijón.

Las principales estructuras variscas que afectan a los materiales paleozoicos son el Cabalgamiento de Torres-Monte Areo y el Sinclinal de La Camocha. No obstante, el conocimiento de estas estructuras no es muy extenso, dada la baja cantidad de afloramientos. Por su parte, la tectónica tardivarisca y alpina se caracteriza por la citada disposición subhorizontal.

El rasgo más característico de la ciudad de Gijón y su entorno es la deformación frágil, lo que da lugar a importantes sistemas de fallas que afectan al conjunto de los materiales. Destacan dos familias principales: una primera, con orientación NE-SW (longitudinales, subverticales, de pequeño salto, cortando materiales mesozoicos y paleozoicos) y, una segunda, que contiene fallas con orientación NW-SE (transversales, con mayor desplazamiento vertical que horizontal, de pequeño salto y que involucran también a ambos materiales). Las más conocidas son la falla del Pico del Sol, la falla de Granda y la falla de Llantonos, todas ellas transversales. Además de esta extensa red de fallas, existe un importante sistema de diaclasas, destacando aquellas con rumbo NO-SE y buzamientos muy altos.

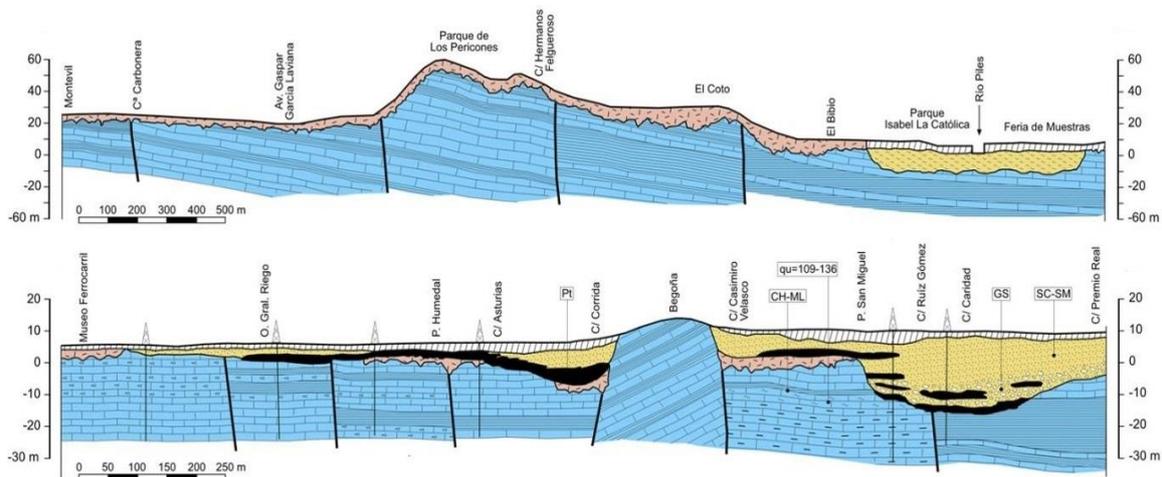


FIGURA 1.9. Cortes geológicos de Gijón, destacando la estratificación subhorizontal de los materiales mesozoicos afectada por fallas subverticales (Gutiérrez Claverol et al., 2002).

#### 1.2.4 Hidrogeología

El concejo de Gijón presenta, como fue comentado, una elevada pluviometría, lo que, ligado a un sustrato geológico permeable, lo convierten en una zona idónea para el almacenamiento de aguas subterráneas.

Las propiedades hidrogeológicas de la Fm. Gijón, protagonista del subsuelo urbano de la ciudad, son diferentes para cada miembro de los tres descritos con anterioridad. Los miembros inferior y superior presentan una permeabilidad elevada debida al desarrollo de fisuración y karstificación, mientras que el miembro medio constituye un nivel acuitado (Menéndez *et al.*, 2004). Por su parte, el sustrato arcilloso sobre el que se asienta dicha formación geológica (facies Keuper de la Serie de Transición) muestra propiedades altamente impermeables (acuicludo).

El acuífero que constituye el miembro inferior de la Fm. Gijón se dispone sobre una litología de baja permeabilidad; capas finas de dolomías, yesos y lutitas de la citada Serie de Transición (Figura 1.10). Es debido a esto que en el contacto entre ambas unidades se localicen numerosas fuentes. Se trata de aguas ricas en sulfatos, debido a la presencia de yesos, lo que es perjudicial para su utilización como agua potable y que suele ir ligado a una elevada conductividad de estas.

Por su parte, el acuífero que constituye el miembro superior de la Fm. Gijón está separado del anterior por el miembro medio de dicha unidad geológica, teniendo como límite superior la Fm. Rodiles, de muy baja permeabilidad. Las fuentes que origina este acuífero presentan caudales menores que las del miembro inferior, pero con un contenido en sulfatos y unas conductividades mucho menores. Cabe destacar que, en ambos acuíferos, los valores de permeabilidad, transmisividad y almacenamiento no son constantes, sino que varían lateralmente dependiendo del grado de fracturación y karstificación de los materiales.

Finalmente, cabe mencionar la presencia de pequeñas acumulaciones hídricas en las formaciones cuaternarias, aunque son poco significativas y sufren importantes oscilaciones periódicas, lo que se traduce en una sensible reducción de la descarga en los periodos de estiaje. Dentro de estos acuíferos cuaternarios destacan dos; por un lado, el acuífero subálveo del río Piles, constituido por sedimentos conglomeráticos que forman la llanura de inundación y, por otro lado, el acuífero de las arenas de Gijón, ubicado en las acumulaciones arenosas costeras. Referido a este último, cabe destacar la existencia de pozos de bombeo para utilización de agua potable en el barrio de La Arena, datando los últimos de las primeras décadas del siglo XX.

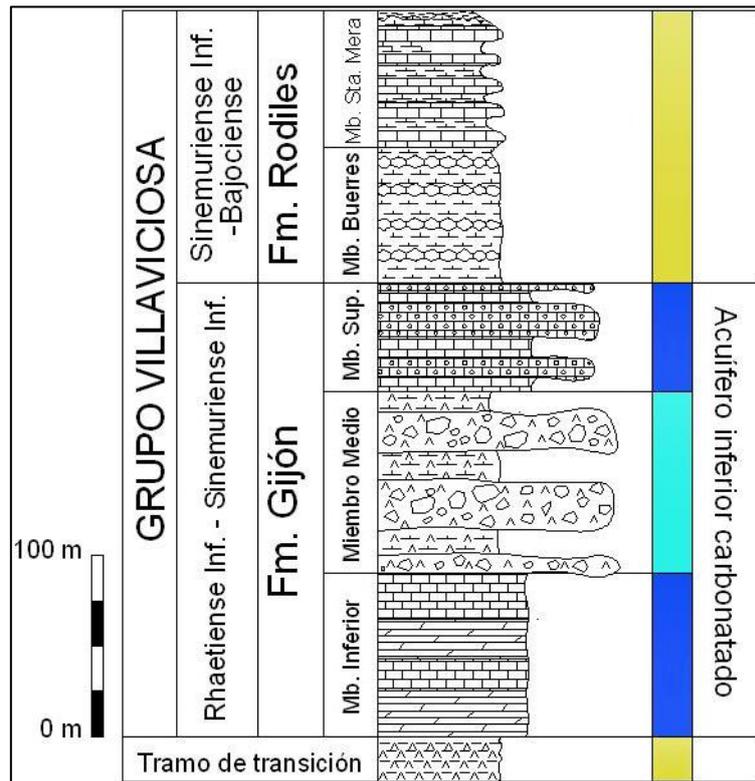


FIGURA 1.10. Columna estratigráfica del Grupo Villaviciosa (González Quirós, 2011).

### 1.2.5 Comportamiento geotécnico

El subsuelo pétreo de la urbe está dominado por la Formación Gijón, compuesta por una serie de litologías descritas con anterioridad, las cuales presentan las mejores propiedades geotécnicas del subsuelo de la ciudad. La capacidad portante de estas rocas es elevada, dada su resistencia mecánica bajo compresión con un promedio de 45 MPa (Álvarez Alonso, 2017), llegando en ocasiones a superar los 100 MPa. Además, la escasa fracturación de estos macizos y la estratificación subhorizontal, son también beneficiosas desde un punto de vista geotécnico. Cabe destacar, en los tramos carbonatados, la presencia de algunos niveles de karstificación que ocasionalmente alcanzan dimensiones de cueva, así como los depósitos de alteración acumulados a techo de la roca sana -que generalmente oscilan entre grado III y IV, según ISRM (1981), los cuales serán descritos más adelante.

Los materiales cuaternarios presentan, como es lógico, un comportamiento geotécnico bastante más pobre. Las arenas del dominio litoral consisten en materiales sueltos o con un grado de compacidad muy bajo, altamente permeables y muy saturados en agua, pues el nivel freático se sitúa muy próximo a la superficie topográfica. Esto provoca que la capacidad portante de las arenas sea baja, al igual que su cohesión, que puede ser incluso nula. Además, la presencia de materia orgánica diseminada supone otro hándicap para su calidad geotécnica, así como el hecho de que son materiales susceptibles de sufrir procesos de compresibilidad y, en las zonas saturadas, de subpresión. Por otro

lado, los depósitos de marismas identificados en la ciudad presentan un comportamiento geotécnico muy deficiente. Los depósitos de fangos oscuros organógenos y turbas presentan las peores condiciones geotécnicas del subsuelo gijonés. Esto es debido a su estructura abierta y esponjosa, elevadísima humedad natural, debilidad mecánica, contenido en materia orgánica, muy bajo ángulo de rozamiento interno y, sobre todo, la tendencia a sufrir procesos de hinchamiento y consolidación, dando lugar a asientos diferenciales.

Los materiales de dominio continental, es decir las arcillas resultantes de la alteración del sustrato rocoso, están condicionadas, desde un punto de vista geotécnico, por la litoestratigrafía del sustrato a partir del cual se desarrollan (López Fernández *et al.*, 2006), pero en líneas generales presentan una calidad geotécnica baja y suelen estar saturados en agua. Se componen fundamentalmente de arcillas de baja plasticidad, reducida consistencia y resistencia a la compresión simple que no suele superar los 300 kPa. Por su parte, aquellos términos de mayor plasticidad presentan aún menor densidad que los anteriores, mayor humedad y una consistencia blanda a muy blanda, así como mayor compresibilidad y un potencial expansivo que puede ser muy elevado (Pando *et al.*, 2012). En resumen, se trata de materiales de capacidad portante baja, debido a la alta tendencia a sufrir procesos de consolidación, todo ello ligado a una variación muy notable de su potencia, oscilando generalmente desde los 2 a los 6 m en la zona de estudio, alcanzando máximos de 14 m en El Llano y El Natahoyo.

Finalmente, los rellenos antrópicos presentan un comportamiento geotécnico muy pobre, dada su variada composición, ausencia de consolidación y elevada permeabilidad, haciendo que la capacidad portante de los mismos sea muy baja.

### 1.3 Objetivos

Los objetivos del presente trabajo se resumen en:

- Aprovechar la información contenida en una base de datos consistente en una recopilación de prospecciones geológicas implementadas en un Sistema de Información Geográfica, pertenecientes a la ciudad de Gijón. Ésta contiene datos de sondeos mecánicos, calicatas, penetrómetros y reconocimientos superficiales; han sido obtenidos de numerosos informes geológico-geotécnicos o bien de observaciones directas in situ.
- Hacer uso las posibilidades que ofrecen los interpoladores de los programas SIG para obtener superficies geológicas del subsuelo de Gijón, determinando cual o cuales se ajustan mejor en cada caso, con el objetivo final de obtener contactos (bases y techos) de las diferentes unidades geológicas definidas en la zona de estudio.
- Mejorar la cartografía geológica en superficie, investigando asimismo la geometría de las diferentes unidades geológicas, calculando tanto la profundidad a la que se encuentran como la potencia que presentan. Esto permitirá conocer mejor la sucesión cuaternaria, la cual acarrea diversas dificultades para los trabajos de construcción en el subsuelo gijonés. Además, se investiga el posible trazado de fallas bajo el entramado urbano, y se tratarán los datos piezométricos recabados para estudiar las profundidades a que se encuentra el agua subterránea.
- Crear un Modelo Digital de Elevaciones para la zona de estudio, así como una recreación de los diferentes elementos urbanos (edificios, zonas verdes o fuentes) y suburbanos (parkings y túneles). Esto servirá de referencia espacial y visual para presentar en conjunto con los resultados de la investigación sobre la configuración geológica. Finalmente, se creará un modelo 3D que integre todos los resultados obtenidos, de manera que la consulta y visualización de la información sea mucho más sencilla, intuitiva y atractiva para el usuario.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1 Obtención de datos

El primer paso antes de abordar un trabajo de este tipo es consultar los datos disponibles, pues son la base fundamental para la creación del modelo: cuanto mayor sea la densidad de datos y la validez de estos, mejor y más detallado será el resultado final. En este sentido, es necesario obtener tanto información geológica como geográfica de máxima actualidad, sin desestimar datos antiguos que, pese a haber sufrido modificaciones, puede recurrirse a ellos, por ejemplo, para cubrir vacíos de información actual. Es importante destacar que, en el presente trabajo, se han tomado puntos de información situados fuera de la zona de estudio descrita anteriormente hasta un margen máximo de 250 m en todas direcciones. Esto tiene como objetivo lograr un mejor acabado de los límites de la zona de estudio, de manera que se pueda establecer una correlación con la información situada dentro y fuera de dicha área.

Tal y como se citó anteriormente, la información es fundamentalmente de dos tipologías: geográfica y geológica. La documentación de tipo geográfico se obtuvo, principalmente, del Instituto Geográfico Nacional a través de su centro de descargas online y de otros portales como el servicio de descargas del Ayuntamiento de Gijón.

La principal fuente de información de tipo geológico fue la bibliografía existente, dada la multitud de publicaciones y trabajos referentes al entorno de la zona de estudio, ya sean puramente geológicos, geotécnicos, hidrogeológicos, etc. En segundo lugar, fue muy importante la aportación procedente de Trabajos Fin de Máster previos a este, destacando los de Martínez Largo (2014) y Fernández Álvarez (2017). Además, se añadió información procedente de informes geológico-geotécnicos elaborados por empresas privadas, a los cuales se tuvo acceso a través de la web del Ayuntamiento de Gijón, cuyos datos a cerca de prospecciones no estaban incluidos en la recopilación de Martínez Largo, de manera que se precisará y aumentará la base de datos, con el fin de elaborar el modelo geológico más actual de la zona. Finalmente, se tomaron también algunos puntos de información referidos a observaciones directas, algo fundamental en la geología urbana dada la escasez o ausencia de afloramientos. Estos se obtienen, fundamentalmente, de la apertura de zanjas y otras excavaciones con fines constructivos (edificios, garajes, conducciones, etc.).

## 2.2 Base de datos

### 2.2.1 Recursos cartográficos

La situación del presente estudio en una importante zona urbana, como es Gijón, supone un dato positivo pues la densidad de información geográfica es muy alta, superior a la existente para zonas rurales menos pobladas. En este sentido, se obtuvo gran cantidad de información de las fuentes mencionadas anteriormente:

- Datos de cartografía topográfica del IGN (BTN25 a escala 1:25.000, BTN100 a escala 1:100.000 y archivos “Cartociudad” que incluye la red viaria urbana e interurbana); servidor web “NAVIONICS” para topografía submarina; SITPA (*Sistema de Información Territorial del Principado de Asturias*) a escalas 1:10.000 y 1:5.000 y cartografía catastral oficial (servicio WMS). Además, Modelos Digitales del Terreno, tanto del IGN (MDT25 a escala 1:25.000, MDT05 a escala 1:5.000 y nube de puntos topográficos LIDAR *-Laser Imaging Detection and Ranging-* recogidos dentro del plan PNOA-LIDAR del año 2012 y con una resolución de 0,2 m en altura) como del SITPA (1:5.000).
- Ortofotos del PNOA (Plan Nacional de Ortofotografía Aérea) de máxima actualidad (2014) e históricas (2006, 2009, 2011, vuelo quinquenal 1998-03 y vuelo de costas 1989-91). Además, también del IGN, datos sobre la línea de costa y los límites municipales, autonómicos, provinciales y estatales.
- Imágenes aéreas y planos de la ciudad (IGN), tanto actuales como históricos (años 1919 y 1942), que muestran la extensión de los barrios y distritos, así como la evolución y crecimiento de estos con el paso de los años.
- Datos obtenidos a través del portal IDE Gijón (Infraestructura de Datos Espaciales ofrecida por el Ayuntamiento de Gijón), entre los que se incluyen archivos tipo *shapefile* de: autopistas, caminos asfaltados, caminos de tierra, carreteras, edificios, conducciones, ferrocarriles, línea de costa, muros, playas, puentes, ríos, taludes, viario y zonas verdes, así como información topográfica, todos ellos a escala 1:25.000.

Esta multitud de datos y fuentes de información requiere un proceso de filtrado, pues hay gran cantidad de información innecesaria que, de no ser eliminada o modificada, puede dificultar la visualización de aquella que es verdaderamente útil. De igual manera, para cierto tipo de información de la que se disponen varias versiones como puede ser la topográfica, es necesario hacer una valoración y decidir cuál es la mejor para tomarla como referencia, o bien hacer un archivo final partiendo de varias fuentes, como se describirá en el siguiente apartado.

### 2.2.2 Recursos geológicos

La documentación geológica existente sobre Gijón es bastante amplia, de manera que es necesario realizar una criba de esta, descartando aquella que no es útil para el objetivo del trabajo, por ejemplo, debido a su antigüedad. En este sentido se requiere información geológica lo más detallada y actualizada posible, pues esto condicionará de manera directa la resolución y la calidad del modelo final.

El documento más consultado como referencia bibliográfica, tal y como se puede observar en el apartado de la introducción, fue el libro de Gutiérrez Claverol *et al.* (2002), al tratarse de una completa guía en lo que a geología se refiere de la ciudad. Además, en ese mismo documento se publicó un mapa geológico, tomado como referencia al tratarse del más preciso sobre la zona de estudio. De igual manera, se tiene en cuenta el elaborado por el IGME dentro del PLAN GEODE (2004) por tratarse de la versión oficial y, finalmente, el publicado por Martínez Largo (2014), al ser la versión más actualizada y basarse en el primero de los citados. Por otro lado, las características estratigráficas, descripción de materiales y propiedades geotécnicas de las diferentes unidades, se obtuvieron fundamentalmente de publicaciones de diversos autores, la gran mayoría de la Universidad de Oviedo.

En cuanto a los datos de tipo geológico obtenidos de la red en diversos formatos, destacan el servicio WMS del mapa geológico continuo (GEODE, IGME) y los archivos tipo shapefile de Martínez Largo (unidades geológicas y contornos). Además, aunque menos relevante, se trabajó con la versión digitalizada de la hoja MAGNA.

Dado el objetivo de este trabajo, es necesario el disponer de datos de prospecciones geológicas, los cuales se obtienen sobre todo de informes geotécnicos llevados a cabo por empresas privadas. En este sentido fue fundamental la labor de Martínez Largo (2014), pues realizó una base de datos, implementada en un Sistema de Información Geográfica, la cual incluye datos relativos a prospecciones realizados en Gijón a los cuales han tenido acceso investigadores de la Universidad de Oviedo hasta la fecha (Figura 2.1). En este sentido, se tomó esta información y se llevó a cabo una selección de esta, atendiendo al área de la zona de estudio con el citado margen de 250 m, para finalmente quedarse con un total de 475 prospecciones, divididas de la siguiente manera:

- 301 sondeos, de los cuales algunos no están testificados, no descartándose, sin embargo, pues pueden aportar otro tipo de información como por ejemplo la cota del nivel piezométrico. Todos ellos presentan información geográfica (coordenadas UTM), profundidad de perforación y, algunos, cota topográfica. Por su parte, aquellos que están testificados contienen información sobre la potencia de cada unidad geológica, tanto de las formaciones superficiales como del sustrato rocoso. En total se dispone de 3.748,65 m testificados.

- 116 pruebas penetrométricas, un tercio de estas con indicación de la profundidad de rechazo, útil para conocer la profundidad del sustrato rocoso nada o ligeramente meteorizado.
- 53 observaciones superficiales, referidas a obras de cimentación, zanjas urbanas o excavaciones, representando un total de más de 130 metros de profundidad.
- 5 calicatas con un total de 18,2 m excavados.

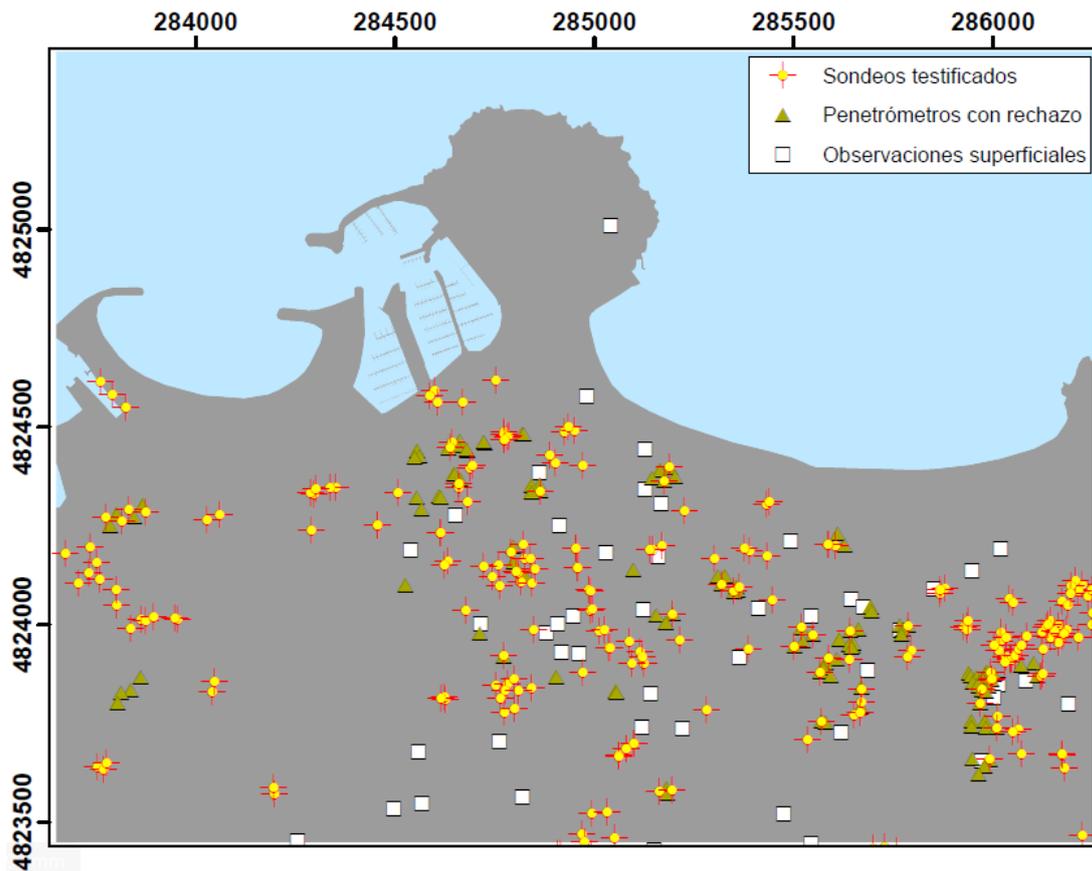


FIGURA 2.1. Prospecciones englobadas dentro de la zona de estudio.

## 2.3 Tratamiento de datos

En este apartado, se explicarán las diferentes operaciones que se realizaron para tratar la información recogida en la base de datos explicada anteriormente, de manera que su visualización y aprovechamiento fuese lo más óptimo posible. Igualmente, como se explica a continuación, también fue necesario corregir algunos datos y descartar otros al considerarlos erróneos o innecesarios.

El proceso de manejo y tratamiento de datos se llevó a cabo, principalmente, mediante un Sistema de Información Geográfica libre y gratuito, el QUANTUM GIS en su versión 2.18.15 “Las Palmas”. Si bien es cierto que para algunos aspectos del tratamiento de datos en 3D y para el cálculo de superficies interpoladas fue necesario recurrir a otro software -ArcGIS de ESRI-, el grueso del trabajo se llevó a cabo con el primero. Se trata de programas en continuo crecimiento y que están ganando protagonismo en el campo de la geología, cuyo manejo está comenzando a ser indispensable en el mundo profesional, pues permiten trabajar con multitud de información tanto geográfica como geológica y obtener grandes resultados, añadiendo a esto un acabado final mucho más atractivo.

### 2.3.1 Información geográfica

La correcta representación de la información geográfica fue sencilla en algunos casos, como por ejemplo para tratar la información contenida en las ortofotos de la zona de estudio. Estas imágenes aéreas se encuentran divididas en diferentes archivos de un área determinada, no obstante, la zona de estudio se encuentra íntegramente en la hoja 29, de manera que el único procedimiento que se llevó a cabo fue su recorte, aligerando así el procesado de información mediante el software QGIS, al tratarse las ortofotos de archivos muy pesados.

A continuación, se puso especial interés en la correcta definición de la línea de costa, pues el tratamiento de la información no es el mismo para la zona marina que para la terrestre. Para ello, se trabajó con una serie de archivos (IGN) los cuales incluyen: línea de costa natural (playas y acantilados), línea de costa artificial (muelles, puertos, etc.) y línea de bajamar o profundidad cero. Dado que, en la zona de estudio, la línea de costa atraviesa zonas naturales y zonas artificiales, se obtuvo un archivo final que integra ambas tipologías, teniendo siempre como base la línea de bajamar, pues el objetivo último de la línea de costa en este proyecto es el de establecer una cota 0 que divida la zona emergida de la sumergida.

Posteriormente, se continuó con el tratamiento de la información contenida en los archivos BTN, con especial interés en el BTN25 al ser el más detallado de los disponibles. Estos archivos contienen multitud de información que, después de despreciar la situada fuera de la zona de estudio como en el caso de la ortofoto, fue necesario organizar, de manera que la correcta visualización e interpretación de los datos fuese la adecuada. Para

ello, se clasificó la información en dos grupos: uno para los datos de relieve (curvas de nivel y puntos acotados) y un segundo grupo para los datos de urbanismo (edificios, tramos viales, manzanas o zonas verdes). Esta clasificación, acompañada de un estilo distintivo y característico para cada categoría, permitió representar y trabajar con la información de un modo mucho más claro y sencillo.

La información incluida en el grupo de urbanismo fue la base para la creación del modelo 3D de la ciudad, uno de los objetivos del trabajo, donde se mostrarán los edificios, fuentes, aceras y otros accidentes urbanos con sus respectivas alturas. Para lograr esta visualización en 3D según el procedimiento seguido en este trabajo, fue necesario que las citadas estructuras se encuentren en un archivo *shapefile* de tipo polígono (Figura 2.2). Por tanto, es necesario transformar los archivos originales (*shapefiles* de tipo línea) a polígonos, lo que acarreó bastantes problemas debido a desajustes en el archivo original de líneas, quedando, los polígonos creados, mal cerrados, mal delimitados o desplazados de su posición real (comprobada con la ortofoto y el servicio WMS del catastro). Para corregir esto, se revisó manualmente cada una de las manzanas, tramos viales, zonas verdes y fuentes de la ciudad, entre otros, de manera que la situación y área de los citados elementos se ajustase lo máximo posible a la realidad, proceso que llevó mucho trabajo y que culminó con la definición de los patios interiores y la recopilación de las alturas de cada edificio. Además, con el objetivo de lograr una mejor orientación dentro de la zona de estudio, se decidió remarcar algunos edificios singulares de la ciudad, tales como el Ayuntamiento, el Palacio de Revillagigedo o la biblioteca Jovellanos. Finalmente, en lo que al aspecto urbano se refiere, se creó un directorio de parkings públicos, asignándoles sus profundidades estimadas según el número de plantas, los cuales integran la parte urbana del subsuelo junto con el tubo del Metrotrén, el cual cruza gran parte de la zona centro de la ciudad y cuyo trazado y cotas se obtuvieron del documento resumen del proyecto (Ministerio de Fomento, 2001).



FIGURA 2.2. Diferentes polígonos utilizados para la construcción 3D de la parte urbana.

Una de las partes más laboriosas del tratamiento de datos geográficos fue el procesado de información de los datos PNOA-LIDAR, obtenida, como se citó anteriormente, del centro de descargas del IGN y que data del año 2012. Esta información, que se encuentra dividida en hojas cuadradas de dos kilómetros de lado (en archivos LAZ, formato de compresión de ficheros LAS o *Log ASCII Standard*), consiste en una nube de puntos LIDAR en bruto, siendo necesaria la descarga de seis de estas hojas para cubrir toda el área de estudio. En primer lugar, para trabajar con estos archivos, fue necesario descomprimirlos mediante un programa específico para este tipo de archivos, utilizándose en este caso el software *LASTask Tools (ADB Software)* para después convertirlos a archivos tipo LAS y poder abrirlos con los programas SIG. Dichos archivos LAS contienen la información clasificada en diferentes categorías, según la ubicación -a priori- de los puntos en los que se realizaron mediciones, de manera que se separan los datos tomados sobre el propio terreno, edificios y zonas verdes y árboles. A partir de esta información clasificada se procede a filtrar los datos con el objetivo final de crear un Modelo Digital de Elevaciones de la superficie topográfica, de manera que se trabaja fundamentalmente con los puntos incluidos en la categoría “ground”, la cual contiene o debería contener únicamente información de la superficie topográfica, sin verse influenciado por edificios, vehículos o cualquier otro elemento. El siguiente paso

consistió en transformar este archivo LAS en un TIN (*Triangulated Irregular Network*), realizándose una triangulación entre los millones de puntos contenidos y generando una superficie continua. Posteriormente, los seis archivos TIN creados se unen y recortan según el polígono de la zona de estudio, todo ello con el programa QGIS. Finalmente, ya con un solo archivo TIN que abarca toda la zona de estudio, se crea el citado MDE del terreno, así como otro denominado completo, que incluye todos los puntos tomados y, para obtener una comparativa, se realiza una resta entre ambos, obteniéndose un total de tres archivos ráster.

### 2.3.2 Información geológica

El primer paso del tratamiento de datos geológicos consistió en eliminar aquellas prospecciones vacantes de información, así como algunos sondeos que se encontraban duplicados en la base de datos de Martínez Largo (2014). Esto mismo se llevó a cabo con los datos de penetrómetros, pues algunos de ellos no tenían la cota de rechazo. Una vez se desechan las prospecciones sin datos, se procede a validar aquellas que tienen información atendiendo principalmente a dos factores como son la cota topográfica y la testificación (en el caso de los sondeos, observaciones superficiales y calicatas).

En primer lugar, para validar la cota de cada prospección, se llevaron a cabo una serie de operaciones en una hoja de cálculo partiendo de la cota original de las prospecciones, de la cota a la que se encuentran dichas prospecciones tomando como referencia el MDE calculado y, la cota que presentarían si se tomase como base topográfica la obtenida con los datos PNOA-LIDAR. Con estas tres referencias se realizaron cálculos que permitieron conocer que la cota original de los sondeos es casi siempre ligeramente superior a la calculada para el MDE y el LIDAR, existiendo una importante similitud entre las dos últimas. Debido a esto, se decide corregir la cota de todos los sondeos tomando como superficie topográfica el MDE obtenido, al considerarse la superficie más fiable de la zona. Cabe destacar la presencia de tres sondeos (situados al sur del Parque de Begoña) que presentan una importante anomalía, pues su cota original los sitúa hasta 6 metros por debajo del MDE, pero una vez más, se les asigna la cota del MDE, al comprobar que esta se ajusta perfectamente a la del LIDAR, entendiendo la información de la base de datos como errónea, por el motivo que fuese. En segundo lugar, en lo que a la testificación geológica se refiere, se comprobó, también con una hoja de cálculo, que los datos de potencias de cada unidad geológica tuvieran consistencia con la longitud de la prospección, obteniéndose ningún error al respecto, por lo que dicha información se consideró totalmente válida.

Después de esta validación y corrección se procedió a la incorporación de nuevos puntos de información a la base de datos. Se añadieron tres nuevos sondeos, dos de ellos pertenecientes a un informe geológico-geotécnico publicado en la web del Ayuntamiento de Gijón “*Estudio geotécnico relativo al proyecto de construcción del aparcamiento*

*subterráneo del Parque de la Serena de Gijón (Asturias)*” situado en el límite sur de la zona de estudio y, un tercero, obtenido de un informe geotécnico titulado “*Estudio geotécnico del proyecto de confederación hidrográfica del Cantábrico de los colectores del arenal de San Lorenzo y del coto San Nicolás*”. Además, se incorporó otra calicata certificada en Cimadevilla, la cual fue muy importante al tratarse de una de las zonas con menos densidad de información (Figura 2.3). Por otro lado, pese a que no se añadieron a la base de datos al situarse fuera del perímetro de 250 metros que rodea a la zona de estudio, se tuvieron en cuenta varios sondeos pertenecientes al informe “*Estudio geológico-geotécnico para el depósito de aguas de tormenta en el Parque de los Hermanos Castro (Gijón)*” pues serían útiles para comprender la geología al Este de la ciudad, donde la presencia de los depósitos del río Piles complica la estratigrafía.

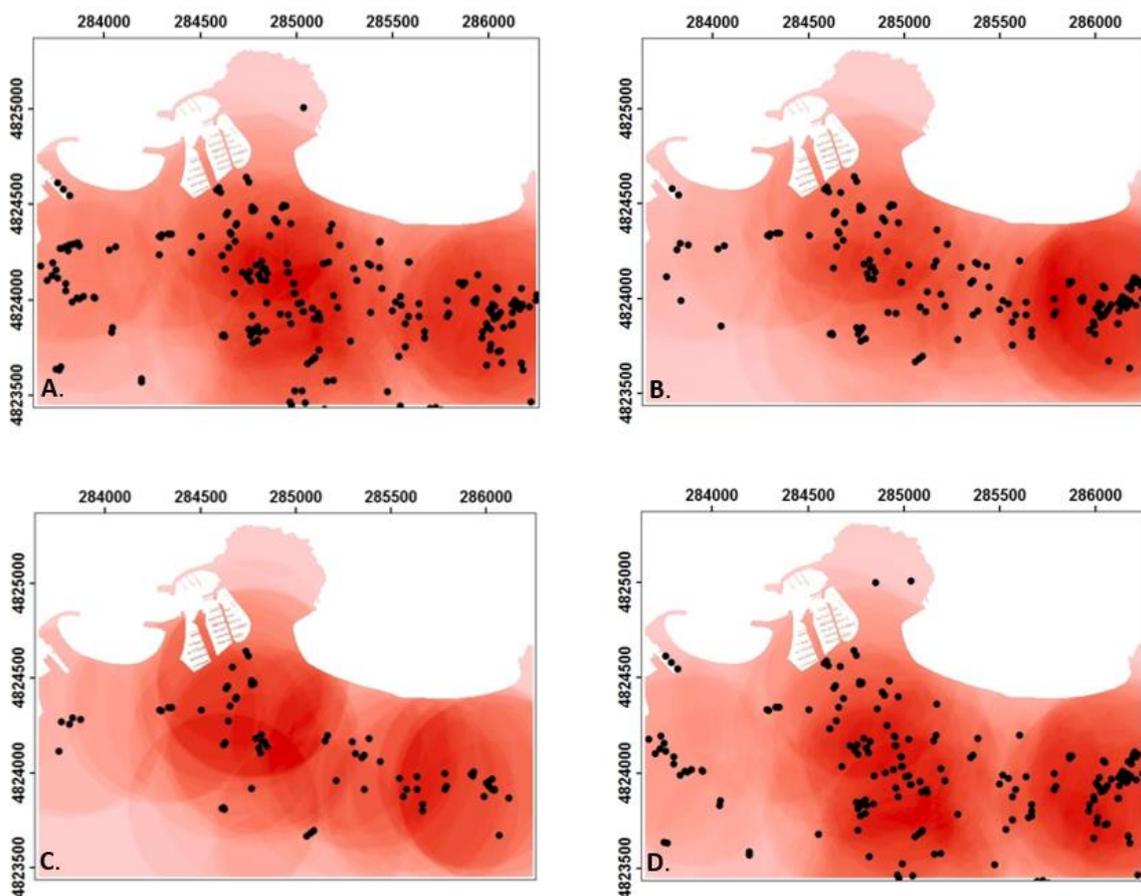


FIGURA 2.3. Mapas de densidad de puntos para: (A) base de rellenos antrópicos; (B) base de depósitos arenosos; (C) base de turbas; (D) techo de la Fm. Gijón.

El siguiente paso fue la agrupación de todos los datos de prospecciones en una misma capa de puntos, de manera que se pudiese trabajar con todas las prospecciones a la vez independientemente de su tipología (a excepción de los penetrómetros), estando representada cada una de ellas por unas coordenadas XYZ. En alguna de las calicatas y observaciones superficiales, la información no es un punto como en el caso de los

sondeos, sino que se trata de, por ejemplo, una zanja de varios metros de longitud. Esto podría incorporarse a la base de datos como una línea en vez de como un punto, sin embargo, se decidió unificar todo como puntos, pues esa diferencia de escasos metros es insignificante teniendo en cuenta su relación con las dimensiones del área de estudio.

Posteriormente, ya con todas las prospecciones agrupadas, se realizó una última comprobación de estas que consistió en verificar que la unidad estratigráfica situada a techo de cada prospección (unidad aflorante) tuviera coherencia con los mapas geológicos de la ciudad tomados como referencia bibliográfica, los cuales se citaron en el apartado anterior. De esta manera se obtuvo un mapa de puntos de afloramiento y se comprobó que, como era de esperar, son datos válidos (Figura 2.4). Además, a partir de estos puntos de afloramiento se elaboró un primer mapa geológico, tomando como espesor mínimo cartografiable un metro de potencia, algo que fue fundamental definir para el caso de los rellenos antrópicos y los depósitos eluviales, pues, como se puede observar, de no establecer una mínima potencia sería prácticamente imposible delimitar afloramientos para estas unidades, ya que se encuentran muy dispersos, sobre todo los rellenos, extendidos por la práctica totalidad de la zona de estudio. Pese a probar con varias potencias, se decidió tomar un metro como espesor mínimo por dos causas: para mejorar la calidad de mapas anteriores y, porque es un espesor que permite una definición relativamente sencilla de afloramientos, frente al intento realizado con 0,5 m, que aún discriminaba pocos puntos y no permitía una cartografía clara.

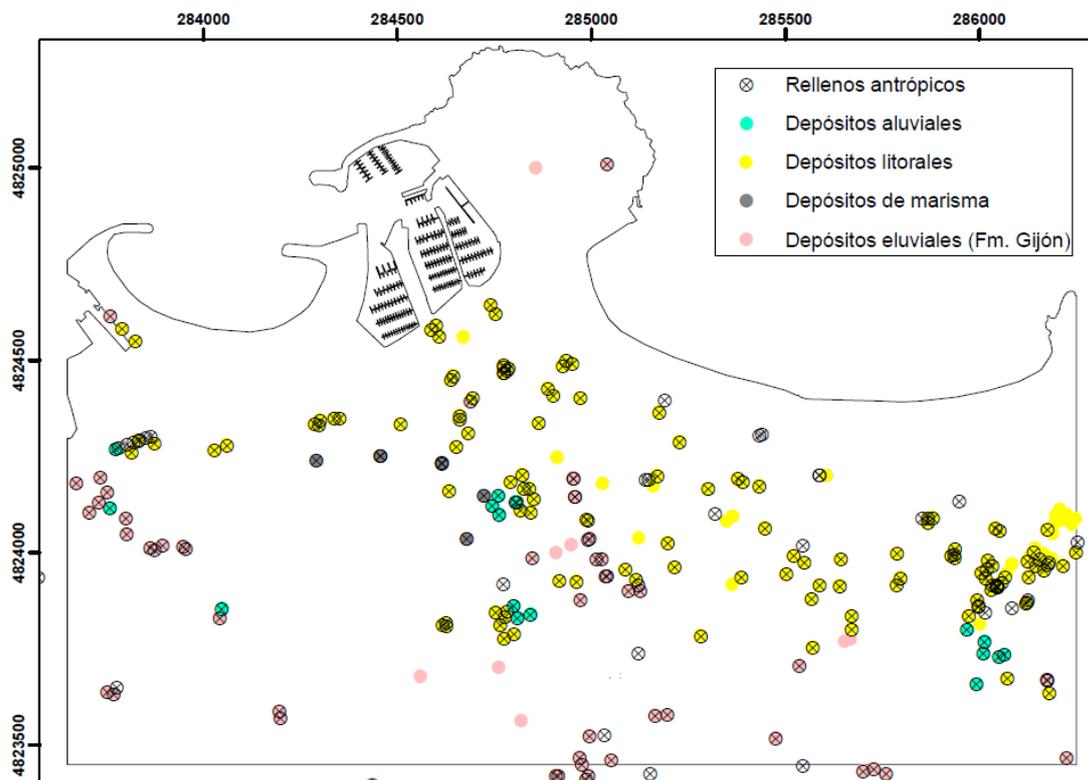


FIGURA 2.4. Mapa de puntos de afloramiento.

A continuación, ya con los datos de afloramiento validados, se procedió a validar los datos en profundidad. Para ello, se agruparon todas las prospecciones donde se producía un contacto entre dos unidades geológicas y se obtuvieron nuevas capas de puntos 3D que representaban dichos contactos. En vez de trabajar solamente con las bases de cada unidad, pese a ser estas las superficies más importantes para la posterior interpolación, se decidió crear capas de puntos tanto para el muro de las unidades como para el techo, pues sería útil en el posterior manejo de información, ya que la base de una determinada unidad puede ser a la vez techo de varias unidades diferentes. Estos puntos serán la base para la interpolación de superficies geológicas, al tratarse de información totalmente veraz y validada (Figura 2.5). Por otro lado, con los datos de los penetrómetros, se obtuvo otra capa de puntos Z con la profundidad de rechazo de cada uno de ellos.

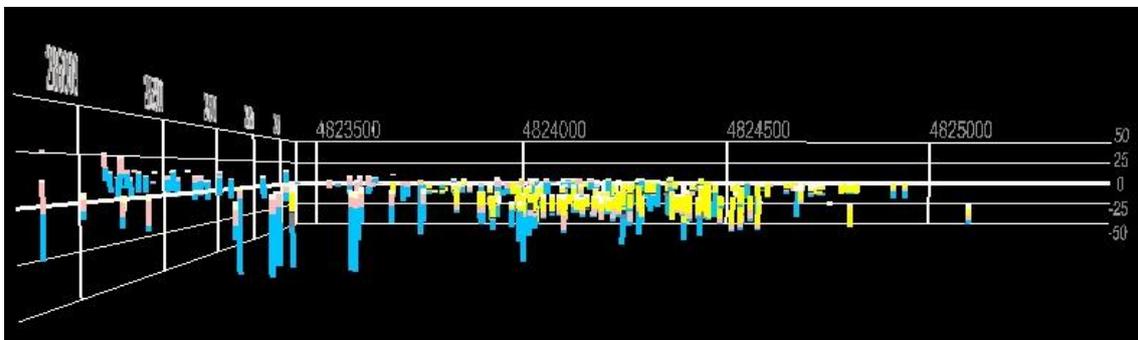


FIGURA 2.5. Vista 3D de los sondeos, correspondiéndose cada color con una unidad geológica.

Los puntos obtenidos según el proceso anterior se denominarán puntos base o puntos primarios, al considerarlos puntos exactos. Sin embargo, estos no cubren toda la zona de estudio, sobre todo para el caso de los depósitos aluviales y de marisma, los cuales, debido a esto, a su baja relevancia y a su relación genética, serán tratados en conjunto con los depósitos arenosos. Por otro lado, los niveles de turba y fangos que aparecen situados entre los depósitos litorales, caracterizados por su irregularidad tanto en espesor como en extensión, serán tratados de forma ligeramente diferente al resto, como se explicará en siguientes apartados. Cabe destacar que, para el caso de los rellenos antrópicos, los depósitos litorales y, el contacto entre los depósitos eluviales y el sustrato rocoso, la representatividad de puntos es muy buena para toda el área de estudio, salvo en la zona del Cerro de Santa Catalina y la parte SW de la ciudad, lo cual no es preocupante, pues ambas áreas consisten en zonas donde el sustrato rocoso se encuentra en superficie, bajo los rellenos antrópicos o una capa de muy baja potencia de depósitos eluviales.

### 2.3.3 Datos hidrogeológicos

El tratamiento de datos llevado a cabo para la obtención de resultados referidos a la hidrogeología fue menos complejo que para el caso de la información litológica, dado el altísimo grado de detalle con el que se trató a los primeros. El proceso consistió, en primer lugar, en seleccionar aquellos sondeos que tenían lectura piezométrica para, a continuación, clasificar dichas lecturas según el acuífero al que potencialmente correspondiesen: bien al que constituye el miembro superior de la Fm. Gijón o bien al acuífero de los depósitos cuaternarios, formado principalmente por arenas (Figura 2.6). Con esta división, se llevaron a cabo una serie de cálculos para obtener la cota del nivel piezométrico medido con el objetivo de, posteriormente, realizar interpolaciones que permitan obtener el techo del acuífero. Finalmente, tras realizar varias operaciones con dicha superficie y otras, como, por ejemplo, la topográfica, se obtendrían los mapas de isopiezas y de profundidad del nivel piezométrico del área de estudio.

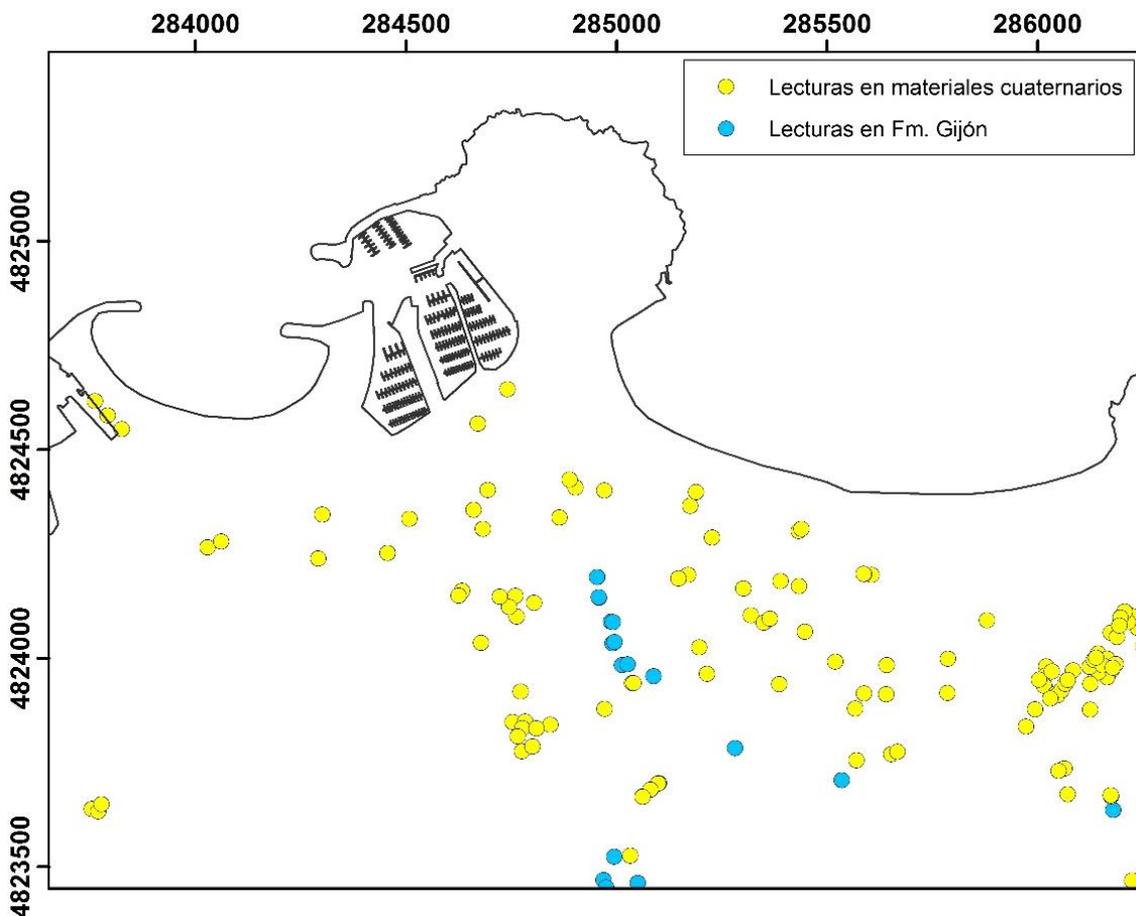


FIGURA 2.6. Puntos de lectura del nivel piezométrico.

## 2.4 Mecanismos de interpolación

La construcción de las superficies que representan los diferentes contactos geológicos estudiados se lleva a cabo, en un primer paso, a partir de la interpolación entre los puntos fijos obtenidos a través de la información contenida en las prospecciones. Dicho proceso de interpolación se realiza fundamentalmente mediante ArcGIS y, dado que existen numerosos métodos de interpolación, es necesario conocer bien cada uno de ellos con el fin de comprender cual es mejor para cada situación, ya que cada modelo produce predicciones usando diferentes cálculos y, los resultados, pueden llegar a ser bastante diferentes. La interpolación consiste en una predicción de valores para las celdas de un archivo ráster basándose en una serie de puntos con información, pudiendo emplearse para calcular cualquier atributo geográfico como puede ser elevación, concentración de un elemento químico o pluviosidad. En este caso, se utilizarán para predecir las cotas a las cuales se sitúa cada contacto geológico dentro del área de estudio.

El software ArcGIS empleado cuenta con ocho métodos de interpolación, los cuales se dividen en dos grupos: métodos determinísticos y métodos de estadísticas geográficas. Los primeros asignan valores a las ubicaciones basándose en los valores medidos circundantes y en diferentes fórmulas matemáticas que condicionarán la suavidad de la superficie resultante. Estos, a su vez, se dividen en exactos (IDW y RBF, donde la superficie generada toma el valor exacto de cada punto medido) e inexactos (GPI y LPI, los cuales calculan tendencias entre los puntos medidos, pudiendo no tomar el valor exacto de los mismos, lo que genera un suavizado de los valores máximos y mínimos). Por su parte, los segundos se basan en modelos estadísticos que incluyen la autocorrelación o relación estadística entre los puntos medidos, lo que permite a estos métodos, además de crear una superficie de predicción, proporcionar una medida de la precisión de cada estimación.

Cabe destacar que, QGIS, el otro de los SIG empleados en este trabajo, permite realizar interpolaciones de datos vectoriales, pero solamente con el método IDW. Es debido a esta limitación por la que se decidió realizar las operaciones de interpolación con ArcGIS, no sin antes comprobar los resultados de uno y otro.

Posteriormente se explicará brevemente cada uno de los métodos determinísticos citados anteriormente (Figura 2.7), pues los resultados expuestos en el presente trabajo, en lo que a generación de superficies interpoladas se refiere, han sido obtenidos en su totalidad con este grupo de métodos de interpolación, al considerarse unos resultados totalmente válidos y precisos y, además, al ser más sencillos de comprender en comparación a los métodos geoestadísticos, los cuales se basan en fundamentos matemáticos más complejos. Por tanto, se ha concluido que las mejoras que se hayan podido lograr con ellos, no justificaban el tiempo que sería necesario dedicar para comprender y manejar estos métodos con un cierto grado de conocimiento. La selección de un método de interpolación u otro para generar cada una de las superficies geológicas

se ha basado fundamentalmente en criterios geológicos y visuales, lo que está directamente influenciado por el número de puntos de información disponibles para cada superficie.

- *IDW (Inverse Distance Weight)*

Este método de interpolación determinístico y exacto consiste en una estimación de los valores de las celdas calculando promedios de los valores de los puntos de datos de muestra en la vecindad de cada celda de procesamiento. A mayor cercanía de un punto de la celda que se está estimando, más influencia tendrá este en el proceso de cálculo del promedio.

El método IDW está basado en la inversa de la distancia elevada a una potencia matemática siendo fundamental el parámetro “potencia”, el cual le permite controlar la significancia de puntos conocidos en los valores interpolados basándose en la distancia desde el punto de salida. Es importante mencionar que el valor de salida para una celda estará comprendido en el rango de valores empleados para la interpolación, es decir, no se pueden crear crestas y valles en un contacto geológico si no hay datos máximos y mínimos de dicha cresta o valle. Además, se pueden emplear barreras para interrumpir la continuidad de una superficie, por ejemplo, si existe una falla, dado que la continuidad de la capa se ve interrumpida.

- *RBF (Radial Basis Functions)*

Las funciones de base radial son un conjunto de técnicas de interpolación exacta, cada una de ellas con una forma diferente y que dan lugar a superficies de interpolación distintas. Los métodos RBF ajustan la superficie resultante a todos los valores medidos proporcionados, minimizando la curvatura total de la superficie. En comparación con el método descrito anteriormente, IDW nunca predice valores por encima del valor máximo medido o por debajo del valor mínimo medido, sin embargo, las RBF sí pueden predecir estos valores. Esto, pese a ser igualmente un método exacto, hace que las RBF sean más “interpretativas” que el método IDW, al salirse de los rangos establecidos por los datos medidos.

Las RBF son muy útiles para generar superficies suaves a partir de un gran número de datos, produciendo buenos resultados cuando las variaciones de dichos valores no son muy acusadas. Sin embargo, los resultados no suelen ser óptimos cuando se producen saltos bruscos en los valores medidos en distancias cortas.

- *GPI (Global Polynomial Interpolator)*

Este método de interpolación es de tipo determinístico inexacto y es además el único método de interpolación global que incluye ArcGIS, es decir, que trabaja con la información de todos los puntos medidos simultáneamente y no en función de vecindades.

Al igual que el RBF, este mecanismo funciona muy bien para el cálculo de superficies muy suaves ausentes de picos máximos y/o mínimos. Dentro del método GPI, cabe la posibilidad de utilizar varios polinomios para realizar el cálculo de interpolación de la superficie, pudiendo cambiar el orden de los mismos. A medida que el valor del polinomio empleado es superior, la superficie final obtenida tendrá cada vez más inflexión, partiendo de una superficie inicial totalmente plana, hasta la generación de valles (polinomio de orden 2) y collados (polinomio de orden 3). Si bien es cierto que existen polinomio de orden superior a tres, su uso no se recomienda en estos casos.

- *LPI (Local Polynomial Interpolator)*

Es similar al anterior, ya que se trata igualmente de un método de interpolación determinístico inexacto. No obstante, en este caso, no se tienen en cuenta todos los puntos medidos a la vez en el proceso de interpolación, sino que realiza una interpolación por zonas, utilizando los puntos medidos más cercanos entre sí. Al igual que en el caso anterior, también se dispone de varios polinomios.

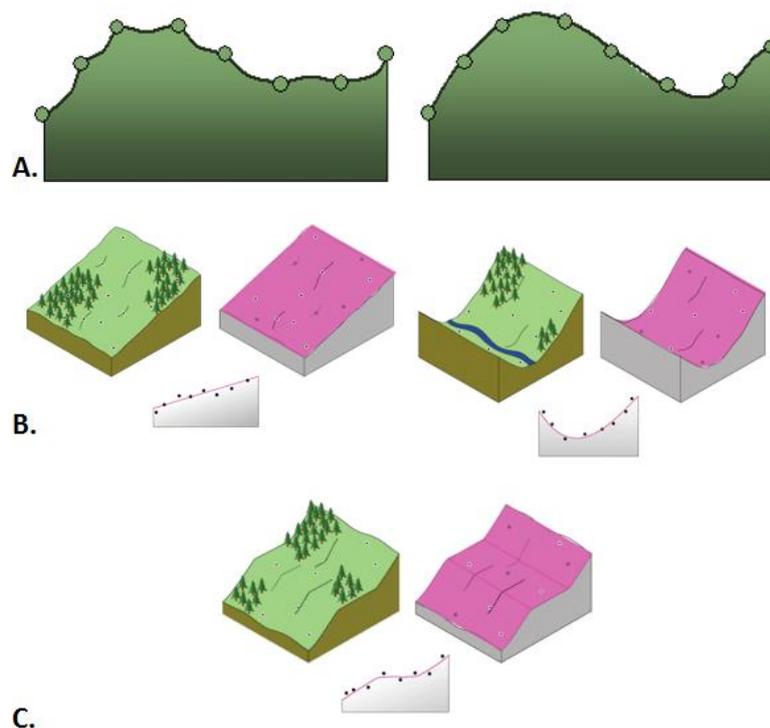


FIGURA 2.7. Diferentes métodos de interpolación determinísticos: (A) comparación entre IDW -a la izquierda- y RBF -a la derecha-; (B) ejemplo de GPI, con polinomio más avanzado hacia la derecha y (C) ejemplo de LPI (ESRI)

El proceso de interpolación fue una tarea muy tediosa que requirió de mucho tiempo y pruebas para determinar qué interpolador -y con qué parámetros de ajuste- era el mejor en cada caso. Una vez se definió esto y se comprobó que los resultados eran

óptimos, se procedió a interpolar cada una de las superficies geológicas para, posteriormente, convertirlas a *ráster* y poder manejarlas correctamente con los SIG. La elección de un determinado método de interpolación y sus variables se explicarán posteriormente, en el apartado de resultados.

Finalmente, cabe destacar que la parte de la zona de estudio correspondiente a la parte submarina no se incluyó en la modelización de superficies, al no tener datos de ninguna prospección aguas adentro. En este sentido y teniendo en cuenta que el entorno de la playa de Poniente consiste en una zona muy modificada en cuanto a sus características y valores naturales (Canteras *et al.*, 1995), se definió un límite máximo para la interpolación de superficies geológicas (Figura 2.8), que en la zona de San Lorenzo coincide con la línea de costa.



FIGURA 2.8. Límite (en rojo) para la interpolación de superficies geológicas.

## 2.5 Mecanismos de validación

La interpolación de puntos para obtener superficies geológicas no es un proceso que se realice solamente una vez para cada una de ellas, sino que es necesario probar repetidas veces cada interpolador con el fin de comparar resultados y tomar el mejor de ellos. En este sentido es necesario realizar comprobaciones tanto matemáticas como, fundamentalmente, geológicas, de las interpolaciones obtenidas.

- *Validación matemática*

La comprobación matemática llevada a cabo se denomina “validación cruzada”, una técnica se utiliza a la vez que se realiza una interpolación mediante un SIG. Este procedimiento evalúa los resultados de un análisis estadístico (interpolación) y garantiza que es independiente de la partición entre datos de entrenamiento y prueba. Dicho de otra forma, se trata de calcular el valor de cada punto sin tener en cuenta ese mismo punto, comprobando a posteriori cuánto se aproxima la superficie calculada a todos los puntos medidos. Finalmente, calcula el error medio y la desviación estándar de cada análisis, todo ello acompañado de un diagrama dónde ilustra lo anterior.

- *Validación geológica*

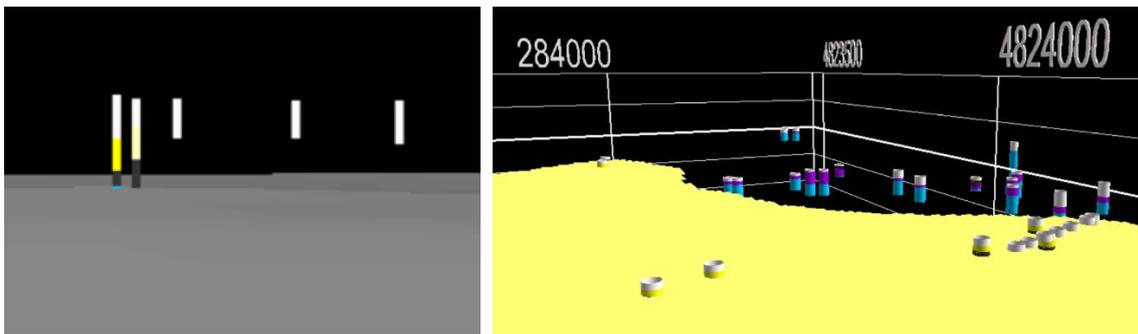
La validación geológica es, como cabe esperar, el proceso de validación más importante en este tipo de trabajos. Se trata de una tarea totalmente subjetiva, basada en la percepción visual y cuyo fundamento es, básicamente, un muy buen conocimiento y una amplia comprensión de la geología de la zona de estudio, así como de su distribución espacial en las tres dimensiones. Este proceso de validación geológica comprende varios análisis que serán detallados a continuación.

En primer lugar, se lleva a cabo una evaluación visual de la superficie obtenida con el interpolador, la cual puede ser una superficie totalmente válida desde el punto de vista matemático, pero no tener ningún sentido desde el punto de vista geológico. En este sentido, se comprueba el rango de elevaciones en el que oscila la superficie -con especial interés en sus máximos y mínimos-. También es necesario fijarse en su geometría en aquellas zonas donde la densidad de datos de partida es menor, pues son zonas más propensas a sufrir errores y, por el contrario, en aquellas zonas donde la densidad de datos es muy elevada, pues la presencia de valores cambiantes en un espacio reducido puede provocar que la superficie no pase exactamente por el punto medido (siempre que se trabaje con interpoladores exactos).

Posteriormente, siempre que la superficie obtenida haya pasado los anteriores “cortes”, se realizan una serie de comprobaciones basándose en los datos de cotas calculados para cada contacto geológico. Una de las comprobaciones consiste en identificar aquellas prospecciones dónde no aparece identificada la superficie interpolada y ver la relación entre ambos. Para ello, se restan las cotas a las que las prospecciones

cortan a una superficie geológica menos las cotas de dicha superficie en el punto de la prospección, pudiendo obtenerse valores negativos (indicativo de que la superficie interpolada corta al sondeo en algún punto de su longitud, algo imposible al tratarse de sondeos sin dicha superficie geológica certificada) o bien valores positivos (indicativo de que dicha superficie se encuentra por debajo de la longitud final del sondeo). Esto segundo es algo que ocurría fundamentalmente en el caso de la Fm. Gijón (Figura 2.9, izquierda), ya que algunos sondeos no llegaban a dicha unidad geológica, no suponiendo problema alguno pues esta era la unidad más antigua a modelizar y, por tanto, no se introducían errores.

Por otro lado, otra de las comprobaciones consiste en asegurarse de que las capas obtenidas tras el proceso de interpolación no contradicen los datos de superficie. Para cerciorarse de ello, basta con representar las superficies en 3D junto con los datos de sondeos y demás prospecciones para realizar un examen visual y comprobar que ambas tipologías de datos no se contradicen (Figura 2.9, derecha).



*FIGURA 2.9. Procedimientos de validación geológica mostrando, a la izquierda, prospecciones sin Fm. Gijón “flotando” sobre la superficie interpolada para el techo de esta; a la derecha prospecciones sin depósitos litorales no incluidos en el techo interpolado para estos (amarillo).*

Otro mecanismo de validación empleado fue el corte geológico del Metrotrén (Ministerio de Fomento, 2001), el cual cruza gran parte de la zona de estudio de este a oeste y fue considerado una fuente muy fiable. Se empleó bajo la conocida premisa de que el tubo construido discurre en la gran mayoría de su recorrido en la parte superior del sustrato rocoso o bien arañando ligeramente la base de los depósitos litorales (Figura 2.10). Debido a esto, su utilización fue fundamental para dar por erróneo un sondeo situado al sureste que no guardaba concordancia con su entorno más próximo, pues originaba una depresión muy grande en el sustrato rocoso que no casaba ni con el contexto geológico local ni con las prospecciones situadas alrededor, las cuales, además, eran numerosas y seguían una tendencia muy similar.



*FIGURA 2.10. Vista inferior del techo de la Fm. Gijón mostrando íntegro el tubo del Metrotrén.*

Todas las comprobaciones realizadas permitieron identificar algunos pequeños errores que, desde un punto de vista matemático, podían resultar coherentes. Para subsanarlas fue necesario añadir numerosos puntos de control manualmente, por ejemplo, para forzar a una superficie a pasar por una determinada cota y, en el caso contrario, eliminar algunas prospecciones como la explicada en el párrafo anterior. Una vez están corregidos todos estos aspectos es necesario realizar nuevas interpolaciones que incluyan esos nuevos puntos de control para obtener, finalmente, las superficies geológicas validadas.

## 2.6 Obtención de superficies geológicas

Los resultados finales del trabajo se basan en la elaboración de superficies geológicas, lo que dará pie a la obtención de los mapas de isobatas e isopacas de cada unidad estratigráfica, así como a la elaboración del mapa geológico de la zona. Esto consiste en un proceso de filtrado, realizado en su totalidad mediante SIG y desarrollado una vez se obtiene -mediante el interpolador- cada superficie geológica y se da por válida. La capa resultante tras realizar la interpolación consiste en un rectángulo cuyos lados están delimitados por los puntos utilizados, dado que no se realizan interpolaciones más allá del último punto de información (en las cuatro direcciones). En este sentido, hay que eliminar aquellas partes dónde la unidad geológica modelizada no está presente o que están fuera del límite marcado por la línea de costa (sin datos). En primer lugar, se trabaja con las bases de cada una; se realizan restas entre las diferentes superficies obtenidas, de manera que se conoce qué parte está cortada por otra más moderna, desde un punto de vista estratigráfico, eliminando dichas partes, para quedarse finalmente con la base real de la cada unidad (Figura 2.11). Por otro lado, es importante mencionar que el techo de la Fm. Gijón y la base de los depósitos litorales son superficies interpoladas y coincidentes en algunos sectores de la zona, tomando como válidas las porciones de aquella superficie con una mayor densidad de datos.

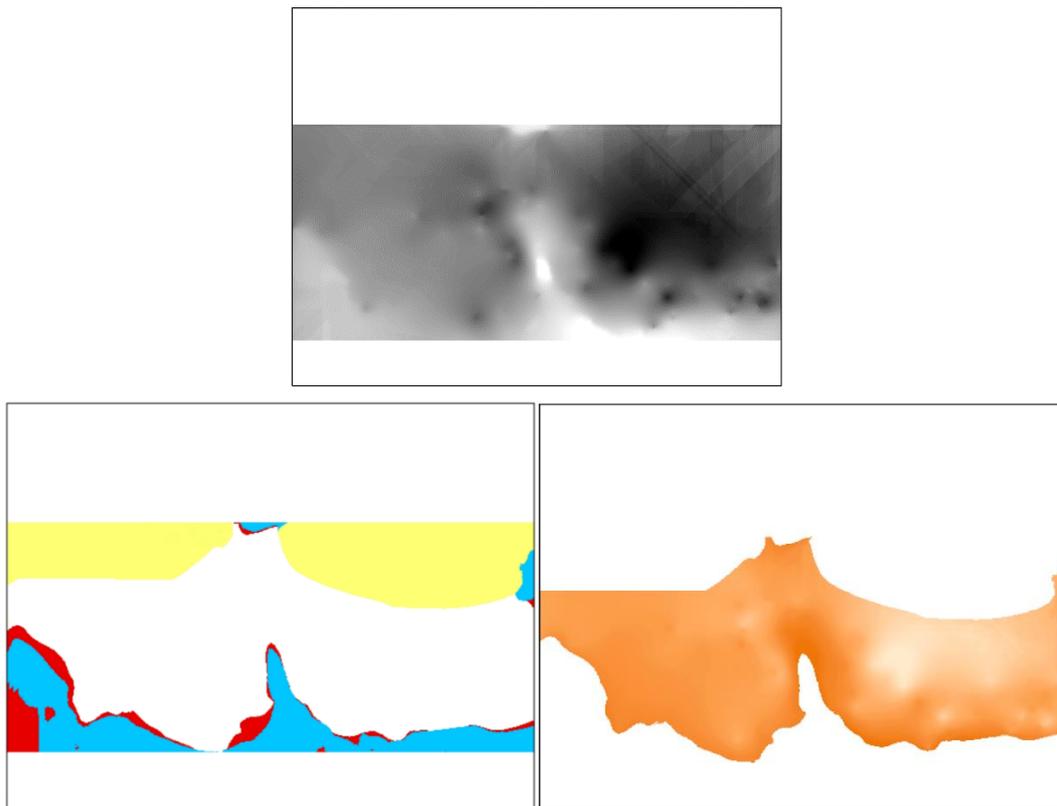
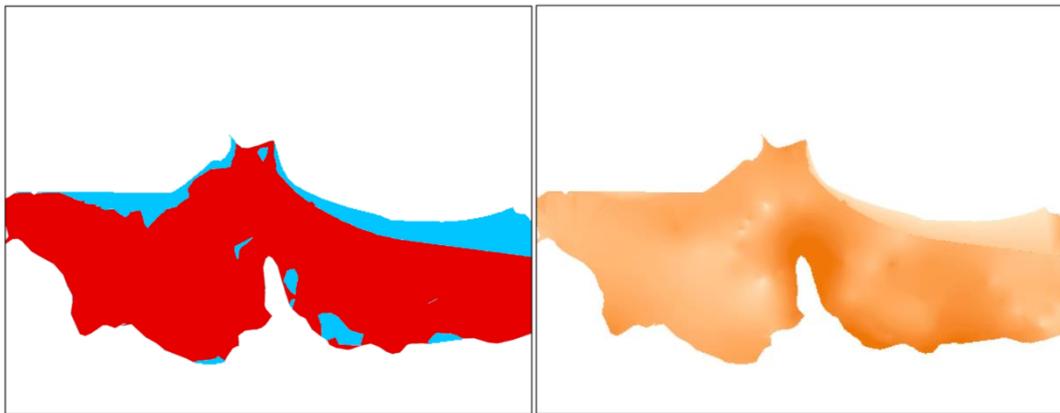


FIGURA 2.11. Proceso de filtrado para la obtención de la base real de cada unidad, en este caso, la base de los depósitos litorales. Arriba la superficie inicial interpolada; abajo izquierda porciones eliminadas tras recorte con línea de costa (amarillo), rellenos antrópicos (rojo) y superficie topográfica (azul); abajo derecha la superficie final obtenida.

En segundo lugar, ya con las bases reales obtenidas, se calcularon los techos reales de cada unidad. Para ello, se parte de la premisa de que la base de cada unidad ha de ser igual en superficie a su techo. En este sentido, el procedimiento consiste en fusionar cada una de las bases situadas justo por encima de la unidad geológica para la que se quiere obtener su techo o, en el caso de las unidades aflorantes, la superficie topográfica (Figura 2.12). Una vez se obtienen las bases y techos definitivas, se pueden calcular los mapas de isobatas (profundidad a la que se encuentra el techo de una unidad) e isopacas (potencia de cada una de ellas), lo que se consigue realizando restas entre bases, techos y superficie topográfica. Las isolíneas obtenidas requieren, además, otro proceso de refinado, con el fin de hacerlas menos quebradas y que su comprensión sea más sencilla. Finalmente, se elabora el mapa geológico del área de estudio, tomando las bases de aquellas unidades geológicas que cortan en algún momento a la superficie topográfica y fusionándolas.



*FIGURA 2.12. Proceso de filtrado para la obtención del techo real de cada unidad, en este caso, de los depósitos litorales, mostrando (izquierda) la parte coincidente con la base de los rellenos (rojo) y con la superficie topográfica (azul) y, por otro lado, la superficie final (derecha).*

Por otro lado, es necesario mencionar que la interpolación de las superficies de las turbas fue un proceso ligeramente diferente al resto, pues, al considerarlas una unidad independiente, se interpoló tanto el techo como la base, además de una superficie media entre estos que sirvió para suavizar los bordes de cada depósito de manera que la terminación no estuviera sujeta exclusivamente a la existencia de datos.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Aspectos geográficos

Los principales resultados en lo que a aspectos geográficos se refiere tienen que ver fundamentalmente con dos temas: la orografía o relieve de la ciudad y, por otro lado, la denominada cartografía urbana, que incluye una representación mediante polígonos y líneas de las edificaciones, calles, zonas verdes y demás elementos urbanos de la ciudad. La elaboración de ambos modelos se llevó a cabo siguiendo el tratamiento de datos explicado en el apartado de metodología y, cuyos resultados se exponen a continuación.

##### 3.1.1 Modelo Digital de Elevaciones

La preparación de un Modelo Digital de Elevaciones apropiado de la zona de estudio es, a la vez, el primer paso y resultado del trabajo, pues será la referencia geográfica para la posterior elaboración de las diferentes superficies geográficas y geológicas. Como es bien conocido, la elaboración del MDE de una zona urbana acarrea muchas más complicaciones que si de una zona sin urbanizar se tratase. Es importante destacar que el MDE de la zona de estudio se elaboró en dos partes posteriormente fusionadas: por un lado la parte terrestre y por otro la parte submarina.

Para la construcción de la parte terrestre del mismo se tuvieron en cuenta las fuentes de datos topográficos más detalladas de las citadas en la metodología: curvas de nivel y puntos acotados del IGN (1:25.000), curvas de nivel del SITPA (1:5.000) así como la nube de puntos LIDAR (resolución de 0,2 m en planta) y el MDT05 a escala 1:5.000, obtenido también del IGN. Sin embargo, pese a disponer variadas fuentes de datos a la hora de construir el MDE definitivo de la ciudad, fue necesario recurrir a varias de ellas. Esto es debido a que, en algunas zonas, incluían datos erróneos o poco fiables los cuales hubo que suprimir y complementar. Además, la línea de costa, cuya correcta definición se consideró muy importante, presentaba diferencias entre las diferentes fuentes de datos.

El MDE obtenido con los puntos LIDAR (Figura 3.1, izquierda) presentaba mucha precisión y, pese a invertir un gran tiempo en ello, no se logró eliminar el impacto que las edificaciones y otros elementos urbanos como automóviles o árboles producían sobre la superficie topográfica real. Por lo tanto, se descartó este modelo como base topográfica del proyecto. Por su parte, el modelo obtenido de los archivos MDT05 (Figura 3.1, derecha), pese a presentar una escala mayor al LIDAR, compartía muchas deficiencias con él, pues representaba también anomalías debidas a edificaciones y, al igual que en el caso anterior, se descartó. Finalmente, las curvas de nivel del SITPA se consideraron válidas, pero no pueden constituir el modelo final por si solas dado que no precisan el nivel de detalle que se requiere. Por lo tanto, ninguna de las fuentes topográficas de las que se disponía se consideró totalmente válida como para constituir el MDE final por sí sola, siendo necesario un tratamiento de la información que integre datos de cada uno de los modelos para lograr un modelo final válido.

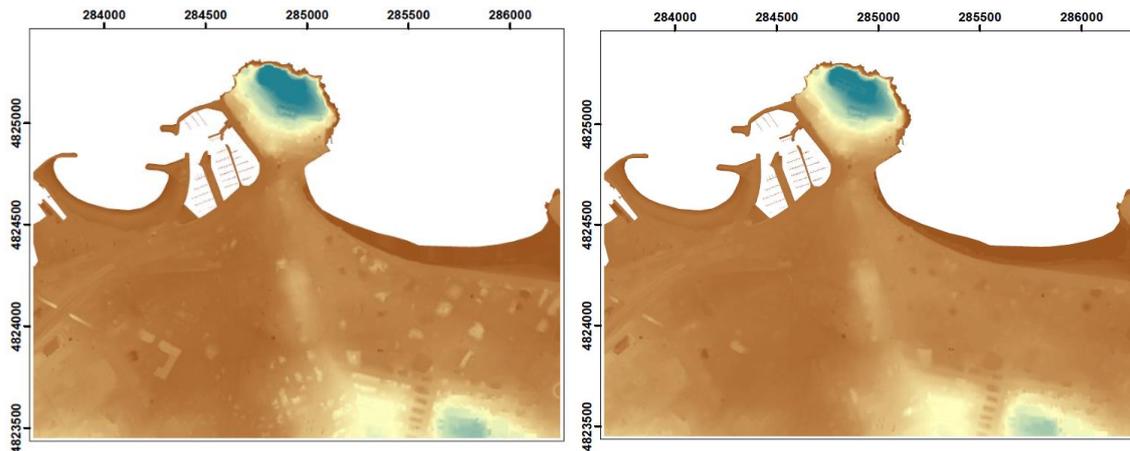


FIGURA 3.1. MDE obtenidos a partir de datos LIDAR -resolución 1 m- (izquierda) y MDT05 -resolución 5 m- (derecha).

En este sentido, se partió de las curvas de nivel del SITPA como base, las cuales sirvieron para modelar el paisaje de la ciudad en las zonas de orografía más acusada (Cerro de Santa Catalina y parte sur de la zona de estudio). A continuación, se añadieron los puntos acotados obtenidos del IGN así como otros obtenidos del Ayuntamiento de Gijón, los cuales sirvieron para modelar la parte central de la zona de estudio, la cual se corresponde con la región más plana y difícil de otorgar detalle. Pese a que la cantidad de puntos acotados añadidos fue notoria, se decidió ampliar la información para dotar a la superficie del mayor detalle posible, por lo que se añadieron más puntos acotados manualmente, cuya cota fue obtenida a partir del modelo anterior elaborado mediante la nube de datos LIDAR, tomando solamente puntos en el centro de calles o zonas verdes donde no existe interferencia alguna por edificios que pudiese dar un valor erróneo de elevación. Además de utilizar estos puntos en la zona centro, se añadieron varias decenas a la zona de Cimadevilla, para destacar la irregular orografía entre las curvas de nivel ya representadas. Finalmente, se añadieron otros tres grupos de puntos acotados manualmente; uno de ellos en la playa y paseo de Poniente, otro grupo, junto con líneas de cota, a lo largo del paseo de San Lorenzo, de manera que se le otorgó una superficie plana, como es en realidad, que no se lograba sin esta información añadida y, finalmente, otro conjunto de líneas acotadas a lo largo del perímetro de los embarcaderos del puerto. Con toda esta información integrada se obtuvo finalmente un modelo detallado de la parte terrestre de la zona de estudio.

La construcción del MDE de la parte submarina no fue tan laboriosa como el de la parte terrestre, pues no era necesario lograr tanta precisión. Se trabajó con la información proporcionada por el servidor web NAVIONICS, el cual pone a disposición pública la batimetría de varios mares y océanos. En el caso de la costa gijonesa la resolución vertical de la batimetría es de 0,1 m y está integrada tanto por curvas de nivel como por puntos acotados. Esta resolución se considera más que suficiente para los objetivos del trabajo, por lo que se georreferenció y digitalizó dicha información para

posteriormente generar el MDE de la parte submarina, el cual, unido al de la parte terrestre, constituirá el Modelo Digital de Elevaciones final con un tamaño de celda de un metro (Figura 3.2).

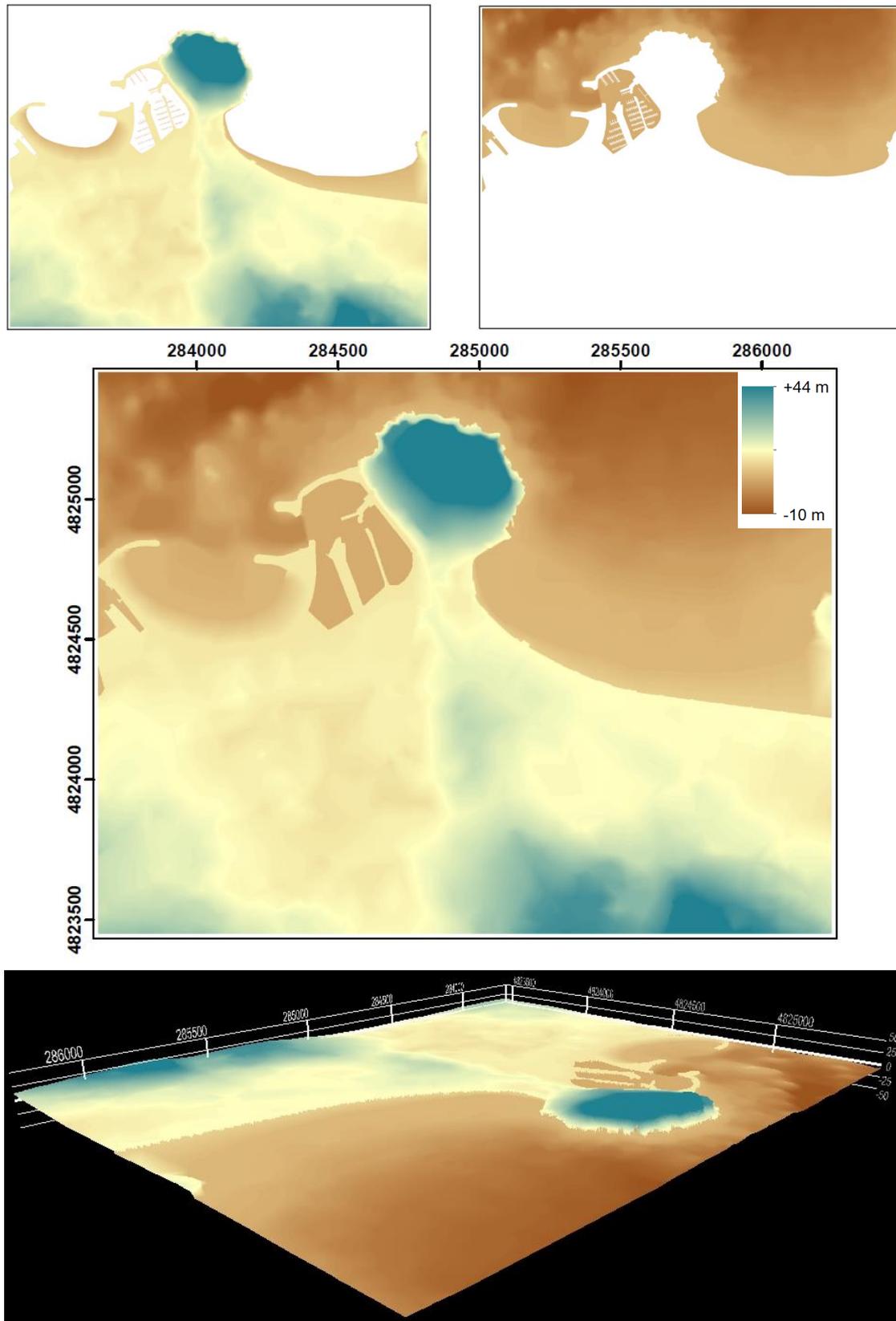


FIGURA 3.2. MDE de la parte terrestre, submarina y conjunto, así como vista en 3D (realce x2).

Finalmente, a partir de la información obtenida, se elaboró el mapa de pendientes de la zona de estudio (Figura 3.3), el cual proporciona otro punto de vista de la orografía de la ciudad, destacando, como era de esperar, la zona del Cerro de Santa Catalina y la parte SE de la zona de estudio. Además, se puede comprobar tanto en el MDE como en el mapa de pendientes, como estas dos zonas de relieve positivo están “unidas” entre sí, correlación que se sigue mar adentro, dividiendo la ciudad en dos partes (al este y al oeste), las cuales constituyen los dominios morfológicos comentados en la introducción.

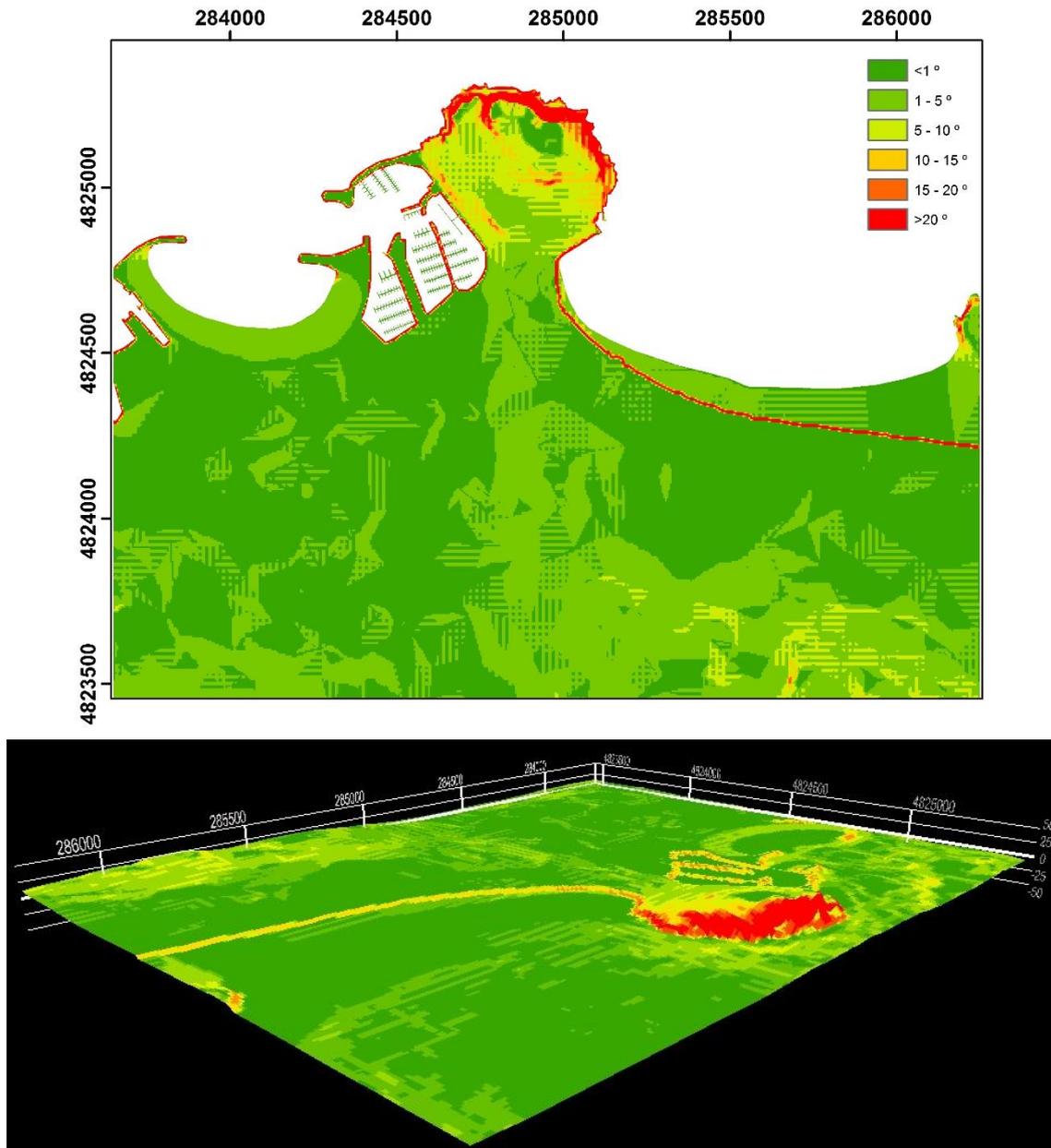
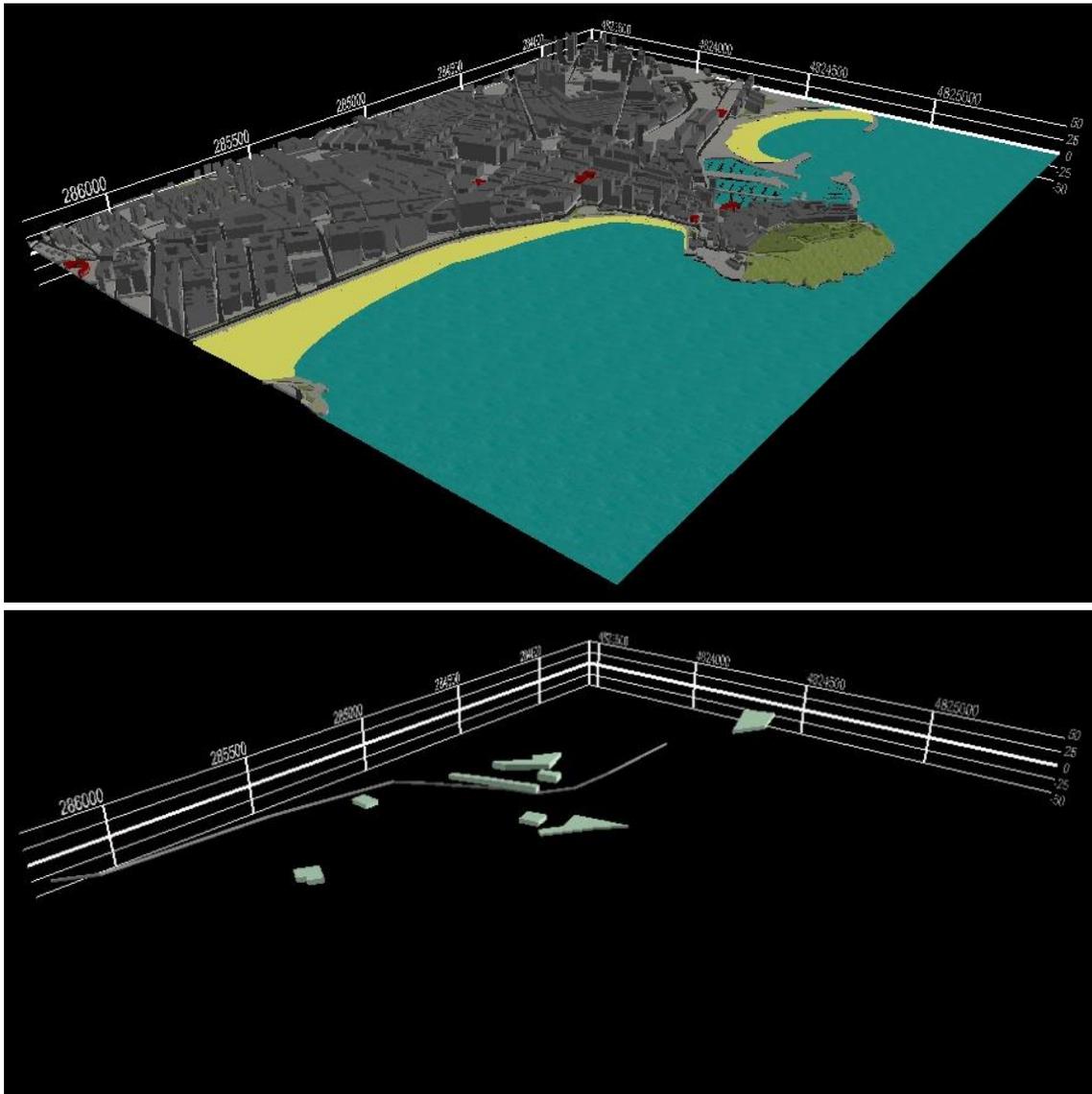


FIGURA 3.3. Mapa de pendientes (en grados) de la zona de estudio y vista en 3D (realce x2).

### *3.1.2 Cartografía urbana*

La cartografía urbana de la zona de estudio se elaboró con el objetivo de otorgar una mejor referencia espacial y visual al modelo final, logrando de esta manera que la representación de cada calle, edificio o zona verde de la ciudad permitiese una rápida y sencilla ubicación al visualizar el modelo en 3D. Se elaboró teniendo en cuenta todas las fuentes de datos cartográficos citadas en la metodología, incluyendo los edificios de nueva construcción y las modificaciones urbanas no incluidas en anteriores mapas. Además, con el objetivo de facilitar aún más la ubicación dentro de la zona de estudio, se decidió remarcar en color rojo una serie de edificios singulares de la ciudad, como son: la Torre del Reloj, la Plaza de Toros, el Palacio de Revillagigedo, la biblioteca y el instituto Jovellanos, el Museo del Ferrocarril, la Parroquia de San Lorenzo y el Ayuntamiento. Finalmente, la cartografía en 2D se integró en ArcScene, ajustando su base al Modelo Digital de Elevaciones obtenido y extruyendo cada tipología (manzanas de edificios, fuentes, parkings o zonas verdes) según su altura y/o profundidad, logrando un resultado final aún más realista (Figura 3.4).



*FIGURA 3.4. Vista de los elementos urbanos subaéreos (arriba) y subterráneos (abajo) en 3D.*

### 3.2 Interpolación

La obtención de la gran mayoría de los resultados de este trabajo requirió, en algún momento, de la utilización de uno o varios de los mecanismos de interpolación ofrecidos por los programas SIG. En este sentido, es necesario, antes de presentar los resultados geológicos finales, explicar qué criterios se han llevado a cabo para decantarse por un mecanismo u otro. En primer lugar, está bien recordar que tal como se comentó en el apartado de metodología, todas las interpolaciones se llevaron a cabo mediante ArcGIS, pues el otro de los SIG empleados, QGIS, solamente contaba con el IDW como mecanismo de interpolación. Así mismo, se realizó una comparativa entre ambos programas, probando a obtener una superficie con los mismos datos de partida y con igual tamaño de celda deseado, con el fin de demostrar que la utilización de un programa u otro no fuese un condicionante para el resultado final del trabajo. Las pruebas realizadas mostraron que, utilizando también los mismos parámetros de ajuste, se llega a obtener resultados muy similares. Sin embargo, la interfaz de ArcGIS permite realizar más ajustes a la hora de preparar la interpolación, por lo que se descartó definitivamente la utilización de QGIS en este proceso.

Los mecanismos de interpolación utilizados fueron en su totalidad métodos determinísticos, ya que los métodos geoestadísticos y aquellos que permiten la utilización de barreras requieren un proceso de ajuste y presentan una complejidad que hacen que sus ventajas sean difícilmente aprovechables en un trabajo como este. En este sentido, se pasó a comparar los métodos determinísticos para ver cual ofrecía mejores resultados en cada caso.

En primer lugar, se trabajó con los métodos inexactos, GPI y LPI. Las pruebas realizadas mediante GPI, no fueron muy satisfactorias, pues el hecho de que no trabajase por vecindades unido a que se trata de un método inexacto, hacía que, en ocasiones, pasase por alto alguna depresión o pico marcado por uno o dos puntos de muestreo, alejando la superficie interpolada varios metros del punto real. Esto podría enfocarse de manera opuesta y pensar que el hecho de obtener superficies inexactas permitiría suavizar las superficies geológicas dotándolas de un aspecto más realista. Sin embargo, el hecho de que las capas a modelizar fuesen depósitos cuaternarios y un paleorrelieve rocoso, fue fundamental a la hora de descartar este método, pues se trata de unidades geológicas cuyos techos y bases son bastante irregulares y no siguen ninguna tendencia general. Por su parte, los resultados obtenidos mediante LPI, un método inexacto pero local, no fueron tampoco muy satisfactorios. Si bien es cierto que el hecho de trabajar por vecindades supuso un avance -pues se obtenían más detalles de las superficies que con el GPI no se lograban- el resultado final no fue del todo convincente, pues seguía habiendo zonas donde la superficie interpolada se alejaba varios metros del punto medido, algo que iba contra la idea general del trabajo y que hizo que se descartasen finalmente los métodos de interpolación inexactos.

Posteriormente, se trabajó con los métodos exactos, IDW y RBF, obteniendo mejores resultados que con los inexactos, tanto desde un punto de vista matemático como desde un punto de vista geológico. El primero que se evaluó fue el IDW, el cual, como se explicó en la metodología, no calcula valores por encima del valor máximo medido ni por debajo del mínimo. Los resultados obtenidos con este interpolador fueron muy aceptables en el apartado matemático, pues los errores obtenidos eran mínimos. Sin embargo, a la hora de valorar las superficies obtenidas según criterios geológicos, aparecían los problemas, pues, aunque se ajustaran los parámetros de manera que cada punto medido no tuviera tanta “fuerza”, el resultado obtenido mostraba numerosos puntos de concentración formando los denominados “ojos de buey” en torno a los puntos muestrales. Finalmente, se trabajó con el RBF, concluyendo que se trata del mejor interpolador para obtener este tipo de superficies (Figura 3.5) debido, fundamentalmente, a dos apuntes:

- El hecho de calcular valores por debajo del mínimo medido y por encima del máximo dota a las superficies geológicas de mucho más realismo, pues es muy difícil que una prospección corte a una superficie en su punto máximo y/o mínimo.
- La interfaz, los parámetros de ajuste y, la existencia de numerosas funciones kernel, hacen que la obtención de una superficie realista y sin errores se logre de una manera mucho más sencilla que con el resto de los interpoladores, teniendo en cuenta además que se trata de un interpolador exacto, lo que dificulta el proceso de suavizado.



FIGURA 3.5. Comparación entre IDW (izquierda) mostrando “ojos de buey” y RBF (derecha) para la obtención del techo de la Fm. Gijón.

Finalmente, una vez se concluye que el RBF es el método ideal para este tipo de interpolaciones, es necesario desglosarlo más detalladamente y explicar qué parámetros se utilizaron en cada caso. La función kernel o función de base radial empleada fue en todos los casos la *Multiquadric* o “Multicuadrícula”, al ser considerada la mejor una vez se comparó con el resto de las funciones. Además, se empleó un círculo de vecindad dividido en ocho sectores, de manera que los diferentes ajustes estuvieron enfocados al

parámetro kernel (valor de suavizado) y al radio del área de vecindad, la cual se consideró siempre circular -y no elíptica- al no presentar tendencia alguna las superficies a interpolar. Por un lado, el valor de suavizado fue siempre 0 o muy próximo a este, lo que permitía obtener superficies más suavizadas y dotadas de mayor sentido geológico. Por su parte, el valor de la longitud del semieje se estableció en función del tipo de superficie geológica a interpolar; en superficies a priori más irregulares -como los rellenos y los fangos- se utilizaría un semieje menor, pues la varianza de datos es mayor en un menor radio y viceversa. Además, la densidad de datos también condicionó la longitud del semieje, pues a mayor separación entre puntos, se requiere una mayor longitud de este (Tabla I).

<b>Superficie a interpolar</b>	<b>Semieje (m)</b>
Base de rellenos antrópicos	50
Base y techo de turbas	75
Base de depósitos litorales	200
Techo Fm. Gijón	300
Nivel piezométrico	250

*Tabla I. Parámetros utilizados en la interpolación de superficies mediante RBF.*

### 3.3 Cartografía geológica

La elaboración del mapa geológico de la zona estudio está motivada por el hecho de obtener la cartografía geológica más actualizada del centro de la urbe. Esto se ha logrado, fundamentalmente, debido a la disponibilidad de un importante número de nuevos de datos o prospecciones que los autores de los mapas anteriores no disponían y que han permitido aumentar el grado de conocimiento del lugar, partiendo de la realización del mapa de afloramientos comentado en el apartado de metodología. Todo ello, además, se ha obtenido mediante el proceso de interpolación, el cual permite definir de una manera mucho más precisa las delimitaciones de los afloramientos y, en ocasiones, descubrir otros de pequeña entidad en zonas dónde anteriormente no se conocía con certeza la unidad más superficial. Los mapas geológicos tomados como base bibliográfica fueron el publicado por Martínez Largo (2014) en su Trabajo Fin de Máster, a escala 1:25.000, y el elaborado por el IGME dentro del PLAN GEODE (2004), a escala 1:50.000. El primero de ellos se tiene en consideración por tratarse de la referencia más actualizada y, el segundo, por tratarse de la cartografía oficial (Figura 3.6). Así mismo, se consultó el elaborado por Gutiérrez Claverol *et al.* (2002), por contar con un elevado grado de detalle y estar fundamentado en un importante volumen de documentación.

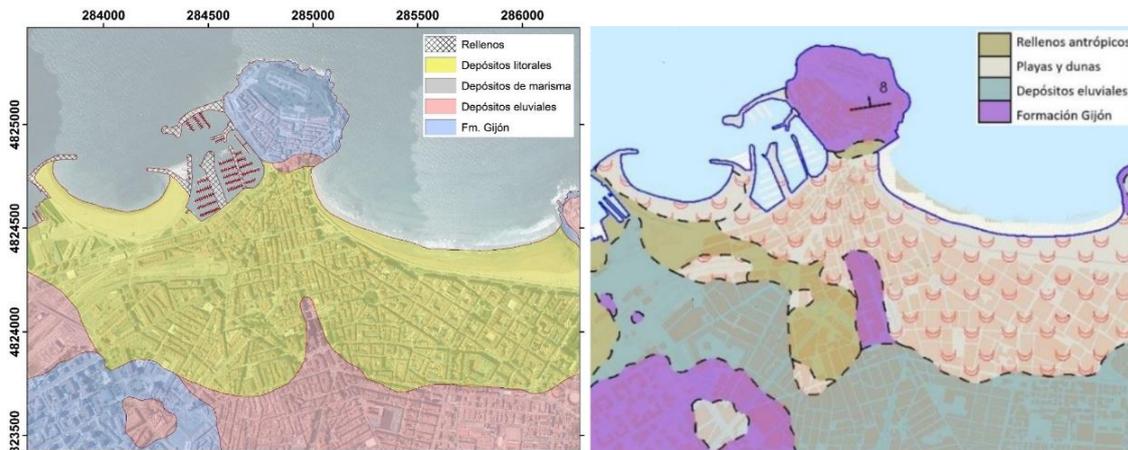


FIGURA 3.6. Mapas geológicos de la zona de estudio. A la izquierda, el modificado de Martínez Largo (2014) y, a la derecha, el tomado del PLAN GEODE (2004).

La primera comparativa entre ambos mapas refleja mayor similitud en la parte este de la ciudad que en la oeste. La zona oriental es muy parecida, difiriendo solamente y de manera muy sutil en la terminación sur de los depósitos litorales, etiquetados como de playas y dunas en el mapa tomado del GEODE. Por el contrario, la zona occidental es algo más dispar, aun obviando los rellenos antrópicos reflejados en la versión del IGME. La principal reside en el citado límite entre los depósitos litorales y los eluviales, el cual, se sitúa bastante más al sur en la versión de Martínez Largo, llegando las arenas a limitar con el afloramiento de Fm. Gijón, este último coincidente en ambas cartografías. Además,

el entrante de Begoña ausente de depósitos litorales está cubierto de depósitos eluviales en una de las versiones, mientras que en la otra la unidad aflorante es directamente el sustrato rocoso.

El mapa geológico final propuesto en este trabajo es, en líneas generales, muy similar a los dos citados anteriormente. Sin embargo, como se detallará a continuación, existen algunas diferencias (Figura 3.7).

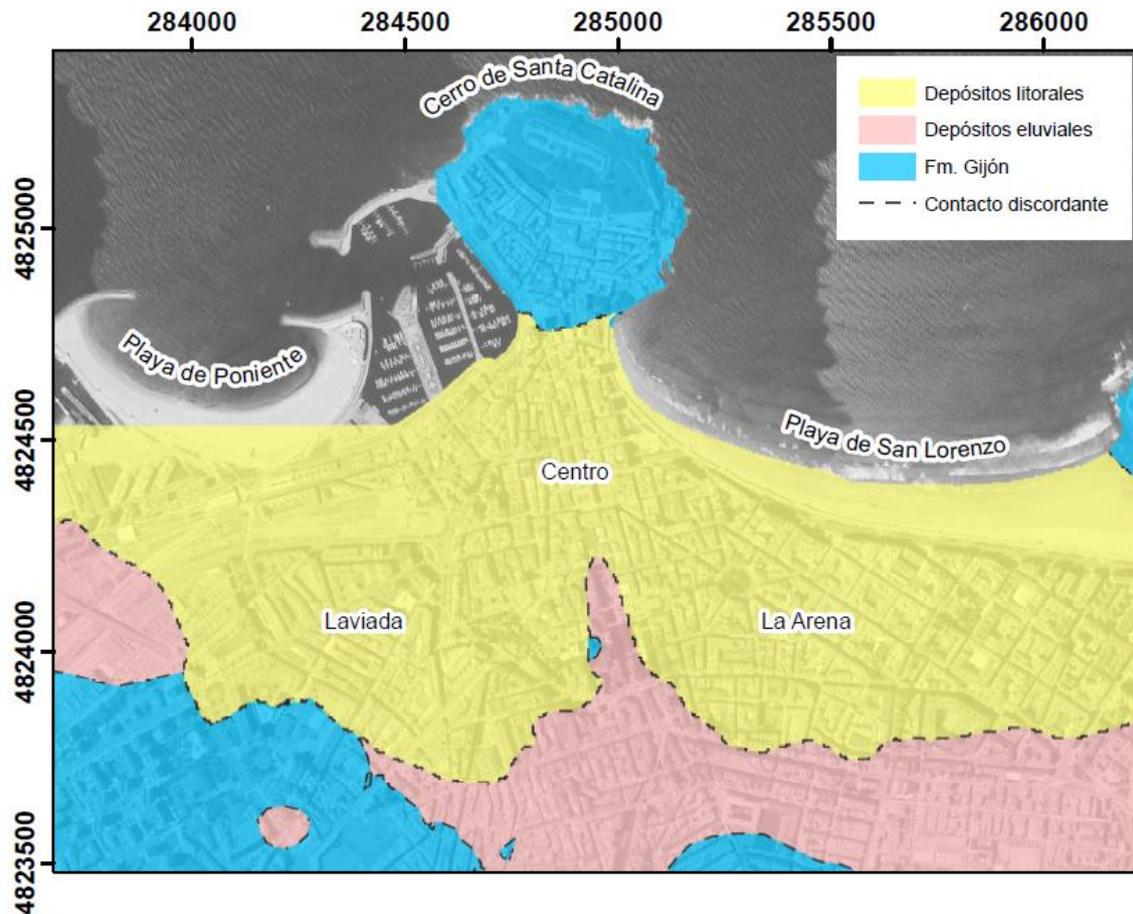


FIGURA 3.7. Mapa geológico propuesto en base al proceso de interpolación (1:15.000).

La diferencia más notable es la existencia de un afloramiento del sustrato rocoso al sureste de la zona de estudio, cortado por el límite sur de la misma y que podría seguir una traza que lo lleve a unirse con el situado más al oeste. Este último, ya contemplado en las anteriores cartografías, también ve modificada su forma, extendiéndose más hacia el este, lo que supone un punto a favor para la citada hipótesis de que ambos afloramientos pueden llegar a unirse más al sur. Además de este, han sido interpretados otros dos afloramientos en la zona central, pero de mucha menor entidad; uno de ellos, próximo al límite sur y, el otro, en el famoso entrante de Begoña, limitado al oeste por depósitos litorales y al este por eluviales.

En segundo lugar, cabe destacar la ligera modificación que sufre la terminación de los depósitos litorales, cuyo límite sur se vuelve más curvo, sobre todo en la parte este. Dicho límite, que en la zona de Begoña también sufre pequeñas modificaciones, está definido con un elevadísimo grado de detalle, pues eran muchas las prospecciones situadas en torno al mismo.

En tercer lugar, hacer notoria la ausencia de depósitos eluviales en la zona del istmo de Cimadevilla, representados en la última cartografía. Si bien es cierto que no se contaba con ningún punto de información justo en esa zona, los sondeos situados en las inmediaciones no intuían la presencia de un espesor cartografiable de depósitos eluviales tan al norte.

Finalmente, como ya se ha podido deducir, no se han representado los rellenos antrópicos, pues, de hacerlo, serían prácticamente los únicos protagonistas de este, ya que se extienden por la práctica totalidad de la zona de estudio, cubriendo el 81 % de la parte terrestre de la misma. Siguiendo con porcentajes y a modo de resumen, los depósitos litorales copan más de la mitad del mapa geológico, con un 56 %, frente al 23 % de los depósitos eluviales y al 21 % del sustrato rocoso.

### 3.4 Unidades geológicas

En este apartado se describirán, por separado, los diferentes resultados obtenidos para cada unidad geológica diferenciada: rellenos antrópicos, materiales cuaternarios de dominio litoral (depósitos litorales y turbas), sedimentos de dominio continental (depósitos eluviales) y sustrato rocoso (Fm. Gijón). Además, como paso previo a la presentación del modelo final, se acompañan de los mapas de isobatas e isopacas de cada superficie geológica de muro y techo.

#### 3.4.1 Rellenos antrópicos

Los rellenos antrópicos se extienden por la práctica totalidad del área urbana, con potencias muy cambiantes, dada su morfología irregular en planta y superficie. Se presenta su cartografía, atendiendo al espesor mínimo cartografiado que se ha tomado para esta unidad, el cual es de 1 m (Figura 3.8) y en la que tiene particular importancia la isolínea de 3 m, pues según el CTE (Código Técnico de la Edificación) supone un cambio en la clasificación del terreno a efectos de planificación de prospecciones.

Los espesores máximos obtenidos se encuentran al suroeste de la zona de estudio, donde superan los 8 m. Así mismo, destacan otras acumulaciones importantes, como la situada bajo el Colegio Román de Campoamor, donde se alcanzan 7 m de rellenos o las acumulaciones localizadas al Oeste del Museo del Ferrocarril y bajo el Colegio Inmaculada, con 6 m de materiales antrópicos. Cabe destacar la presencia de rellenos en la zona del puerto, formando parte de los muelles, rompeolas y demás elementos totalmente antrópicos, así como bajo el arenal de la playa de Poniente. Sin embargo, pese a que la potencia en estos casos es muy superior al metro, no se han representado isolíneas sobre ellos al no contar con sondeos ni datos fiables que permitan hacerlo.

Los rellenos antrópicos han sido tratados junto con la tierra vegetal, esto es debido a que la representatividad de la tierra vegetal en la zona de estudio es mínima como para ser considerada como una unidad geológica independiente. Los suelos vegetales están reconocidos en un total de 27 prospecciones -frente a las 271 que incluyen rellenos antrópicos puros- con potencias muy bajas, que oscilan entre los 0,2 y los 1,5 m, con una media de 0,5 m. Observaciones realizadas en el Cerro y en otras zonas verdes de la ciudad no hacen más que reafirmar la escasa importancia de estos materiales en el contexto general del trabajo.

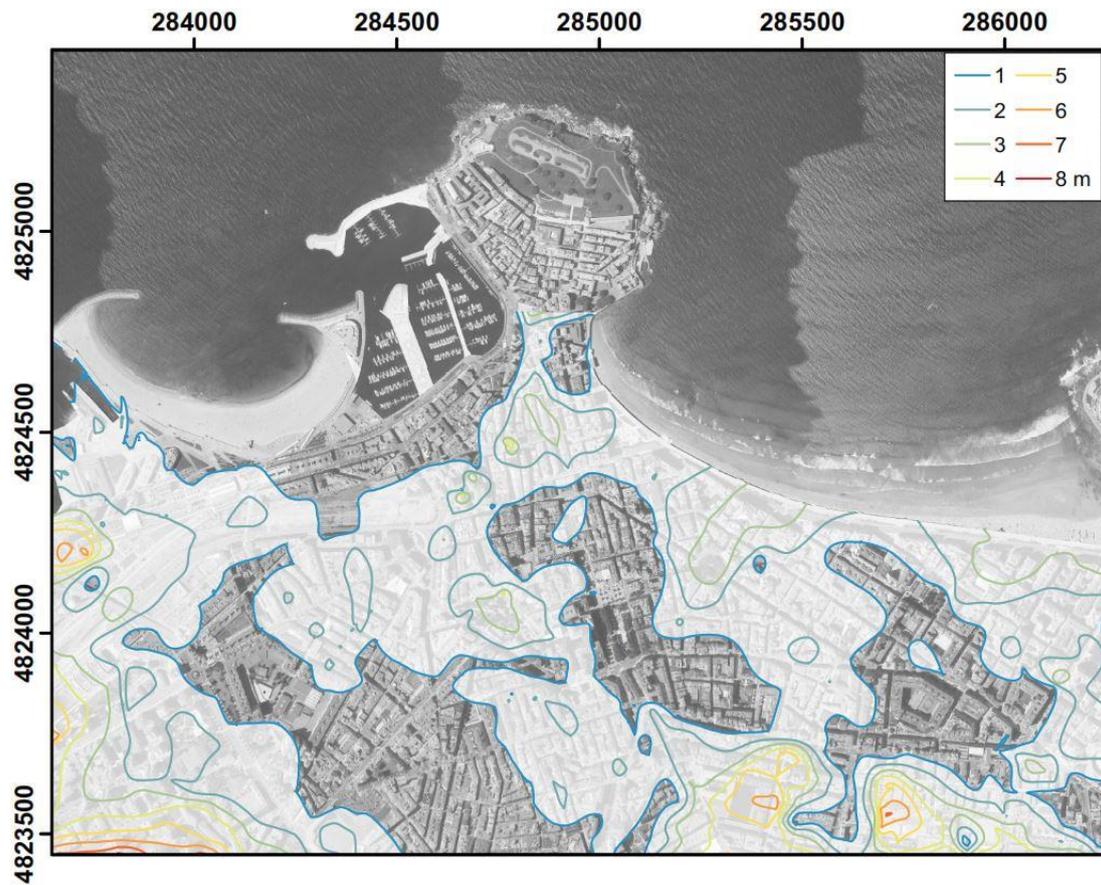


FIGURA 3.8. Mapa de isopacas mostrando las áreas con más de un metro de rellenos antrópicos.

### 3.4.2 Depósitos litorales

Los depósitos litorales, fundamentalmente materiales arenosos y, en menor medida, gravas y depósitos de marisma, constituyen la unidad geológica más importante del trabajo. Esto es debido a que se trata de una unidad presente en la mayoría de la zona de estudio, con mayor importancia en la parte este, bajo el barrio de La Arena -al que da nombre- y sus inmediaciones. Estos depósitos han provocado que el diseño de cimentaciones a lo largo de la historia de la ciudad fuese una ardua tarea, acarreando numerosos problemas de fallo estructural y/o subsidencia, como en el caso de la “Manzana reseca”, en la zona de El Humedal (López Gayarre *et al.*, 2009).

Los citados materiales se extienden por la práctica totalidad de la zona de estudio, ocupando aproximadamente 1,7 km<sup>2</sup> de área, sin tener en cuenta su presencia también bajo la lámina de agua. En este sentido, solo el Cerro de Santa Catalina y la franja sur del área de estudio están ausentes de depósitos litorales, sin olvidarse de la zona del Paseo de Begoña, cuya morfología es característica de los mapas geológicos de la urbe.

Las acumulaciones son máximas bajo el barrio de La Arena, llegando a superar los 22 m de potencia unos 100 m al este de la Plaza San Miguel (Figura 3.9, superior). En esta zona, los depósitos arenosos rellenan, junto con los eluviales, un paleorrelieve excavado en la Fm. Gijón, bordeado por zonas donde el sustrato rocoso alcanza cotas superiores. En la parte oeste de la ciudad, las acumulaciones arenosas son mucho menores, llegando a los 12 m de potencia bajo la Plaza de El Humedal. Más hacia el este y al sur de la Playa de Poniente, los espesores no superan en ningún caso los 8 m.

Respecto al mapa de isobatas (Figura 3.9, inferior), dado que se trata de la unidad no antrópica más moderna, aflora en todas aquellas partes de la ciudad en las que está presente, viéndose estos afloramientos interrumpidos únicamente por la presencia de rellenos antrópicos. En este sentido, la profundidad media a la que se encuentra el techo de las arenas oscila generalmente entre 1 y 2 m, nunca superando los 5 m.

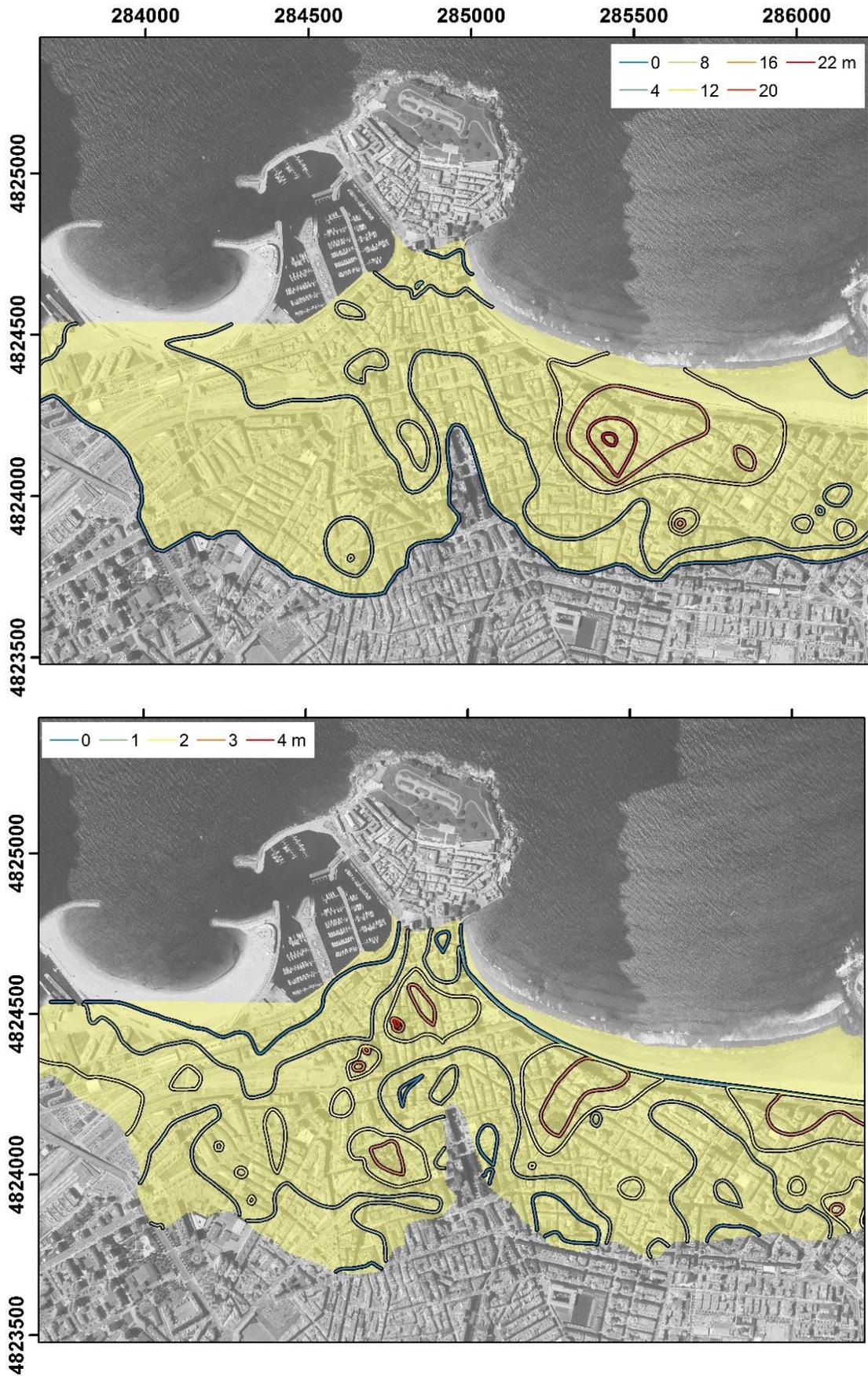


FIGURA 3.9. Mapa de isopacas (arriba) e isobatas (abajo) de los depósitos litorales.

### 3.4.3 Fangos organógenos y turbas

Los depósitos de fangos organógenos se encuentran en tres áreas dentro de la zona de estudio, dos de ellas de mucha mayor entidad que la tercera en lo que a extensión lateral y potencia se refiere (Figura 3.10, superior). Estos materiales se encuentran formando dos o más pequeños horizontes o bien de forma diseminada dentro de los depósitos litorales de menor tamaño de grano, lo que unido a su irregularidad tanto en la vertical como en la horizontal hacen que su modelización fuese una tarea complicada.

La acumulación de fangos organógenos más importante se encuentra sobre el paleovalle de El Humedal, presenta una extensión de 30 ha y está limitada al este por la zona de Begoña, ausente de depósitos litorales y, hacia el sur, por la franja que marca la terminación de las arenas, dando paso a los depósitos de dominio continental. En esta zona, los fangos presentan potencias que alcanzan los 4,7 m, llegando a espesores que superan los 4 m en tres zonas: bajo la Plaza 6 de agosto, bajo la Plaza Estación de Langreo y bajo el cruce entre la avenida Schulz y la calle Mieres.

La otra gran acumulación de fangos está limitada también por Begoña, pero en este caso actuando de límite oeste, extendiéndose también hacia el sur dentro de la zona de presencia de depósitos litorales. Esta acumulación de turba y fangos organógenos se extiende a lo largo de 37 ha y la potencia máxima es de 4 m. Se trata de un depósito bastante homogéneo, con una potencia media en torno a los 2 m, logrando su mayor desarrollo hacia la parte este de la misma, bajo el cruce entre las calles Ezcurdia y Piles.

Por otro lado, ha sido identificada en 7 sondeos un pequeño depósito aislado de fangos situado al oeste de la ciudad, al sur de la playa de Poniente y próximo a la línea de costa. Presenta un área de 2 ha y una potencia media de 1 m, con máximos de 2 m. Finalmente, cabe mencionar la existencia de otro depósito aislado en la desembocadura del río Piles, de potencia ligeramente superior a 1 m, pero que fue identificado solamente en dos sondeos situados en el límite este de la zona de estudio, por lo que no se modelizó.

Respecto a la profundidad a la que se encuentran estos depósitos, está totalmente condicionada por la cota del sustrato rocoso, ya que las turbas están inmersas en los términos más profundos de los depósitos litorales, por lo que normalmente se encuentran sobre los depósitos de alteración profunda, llegando en ocasiones a estar “apoyados” directamente sobre la propia roca. Según esto, las dos grandes acumulaciones de turbas se encuentran a profundidades variables, mostrando una ligera tendencia de profundización hacia el norte, condicionada, como se citó anteriormente, por la misma disposición de los depósitos litorales sobre la Formación Gijón (Figura 3.10, inferior).

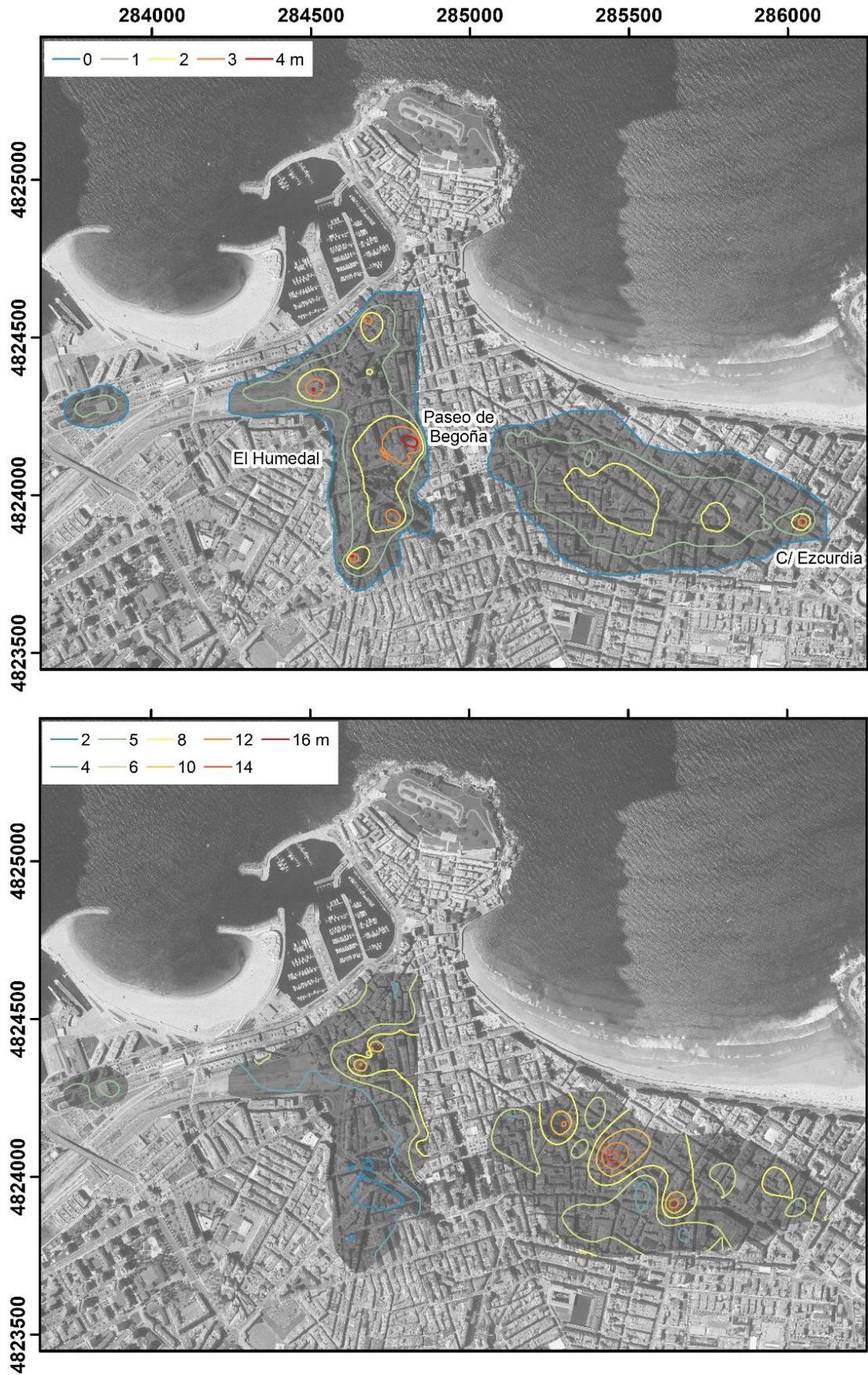


FIGURA 3.10. Mapa de isopacas (arriba) e isobatas (abajo) de los depósitos de fangos.

#### *3.4.4 Depósitos eluviales*

Los depósitos de alteración constituyen la unidad cuaternaria más profunda, pues se encuentran inmediatamente por encima del sustrato rocoso de cuya decarbonatación proceden, y por debajo de los depósitos arenosos y de turbas. Están presentes en la práctica totalidad de la zona este de la ciudad, pero son menos importantes en la parte oeste, donde la Formación Gijón alcanza cotas más elevadas y el desarrollo de los materiales de alteración es mucho menor (Figura 3.11, superior). En este sentido, las mayores acumulaciones se encuentran hacia el sureste de la zona de estudio, donde alcanzan los 12 m de potencia, habiendo además acumulaciones importantes en otras zonas, como, por ejemplo, bajo el cruce entre la avenida del Llano y la avenida Pablo Iglesias, donde se superan los 8 m de espesor.

Estos materiales afloran en el sector meridional de la zona de estudio, donde ya no llegan los depósitos litorales, estando cubiertos únicamente por los rellenos antrópicos. En el resto de la ciudad se encuentran a profundidades variables (Figura 3.11, inferior), con profundización hacia el norte, sobre todo en la parte este de la ciudad, lo que está totalmente condicionado por la tendencia del techo de la Fm. Gijón.

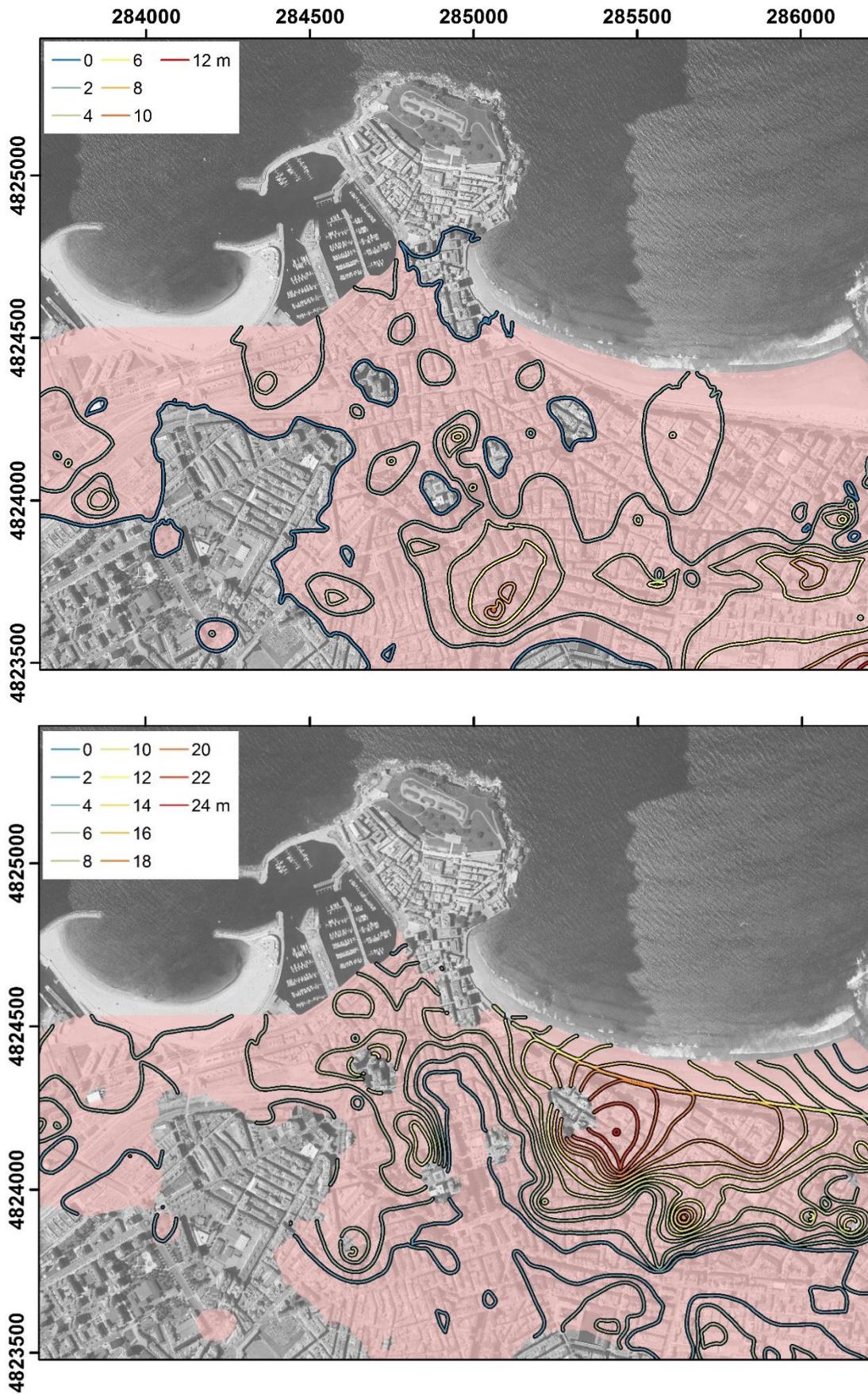


FIGURA 3.11. Mapa de isopacas (arriba) e isobatas (abajo) de los depósitos eluviales.

### 3.4.5 *Sustrato rocoso*

La superficie geológica modelizada más antigua es el techo de la Formación Gijón, la cual supone el límite entre los depósitos cuaternarios y el sustrato rocoso. Dicha unidad litológica está presente en toda el área de estudio, constituyendo la base del modelo al no identificarse en ninguna prospección otra formación más antigua bajo esta.

Estos materiales afloran, principalmente, en dos zonas de la ciudad; de manera muy visual en el Cerro de Santa Catalina y, por otro lado, en la parte suroeste de la zona de estudio, donde aparecen rodeados -en planta- de sedimentos cuaternarios. En el resto de la ciudad, el techo de la citada formación varía notablemente de profundidad (Figura 3.12); destacan como zonas más elevadas la parte sureste en torno al afloramiento citado anteriormente y, por otro lado, la zona del paseo de Begoña, donde la profundidad del sustrato rocoso es en ocasiones inferior a los dos metros ocupados estos por depósitos de alteración.

La geometría obtenida muestra el área urbana dividida en dos dominios morfológicos claramente diferenciados, uno al Este y otro al Oeste, separados por la alineación de relieve positivo que forman de norte a sur, el Cerro de Santa Catalina y el entorno de Begoña, prolongándose en dirección sureste por el límite inferior de la zona de estudio. Esta disposición del sustrato rocoso es similar a la ya comentada en el modelo de elevaciones, por lo que se concluye que la morfología del paleorrelieve de la Fm. Gijón condiciona el relieve de la ciudad, al menos, en la zona de estudio.

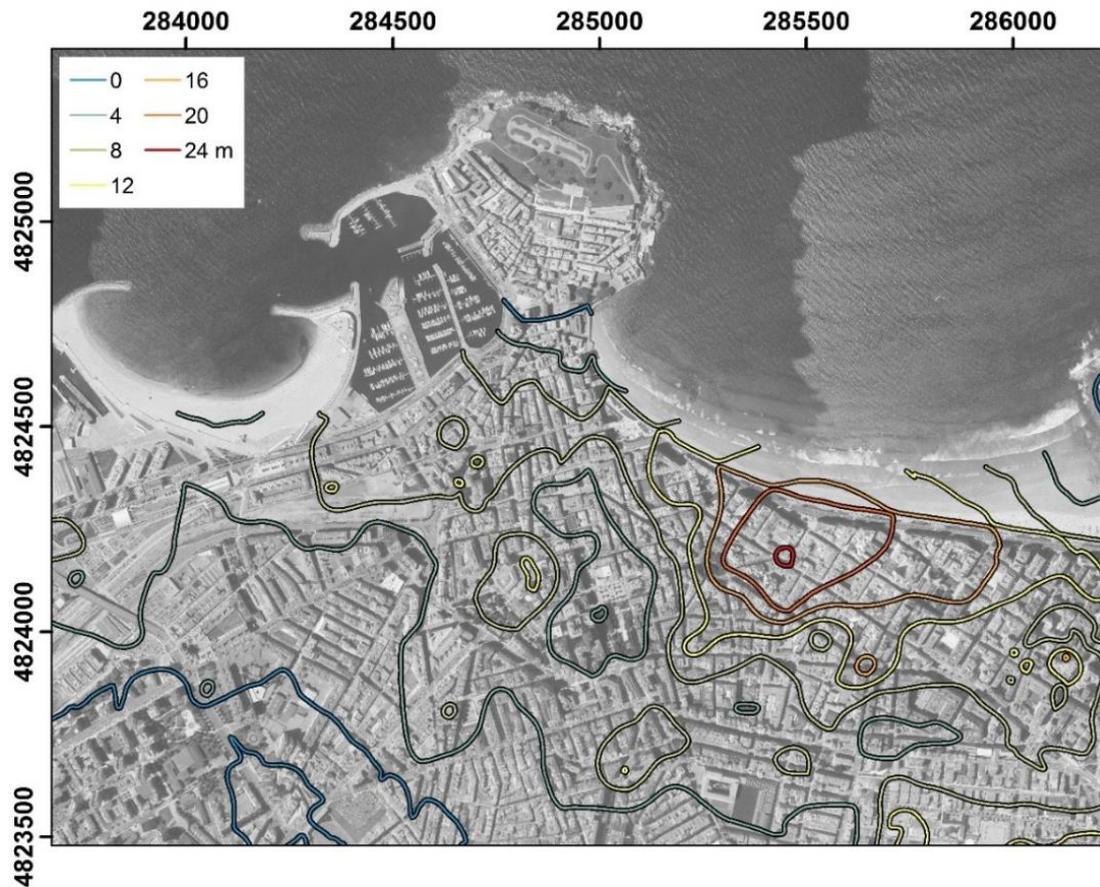


FIGURA 3.12. Mapa de isobatas del techo de la Fm. Gijón o de isopacas del relleno cuaternario.

Al igual que en los anteriores mapas de isopacas de las diferentes unidades que conforman el relleno cuaternario, la zona que más destaca es la zona de unión entre el barrio de La Arena y el distrito Centro, donde se llegan a superar los 24 m de materiales no consolidados, lo que tiene unas importantes implicaciones geotécnicas (Figura 3.13). La citada figura refleja perfectamente cómo la morfología del sustrato rocoso condiciona el espesor del relleno cuaternario y, la coloración de fondo, resalta muy bien la existencia de una cubeta bajo los edificios de primera línea de playa situados en la zona central del Paseo de San Lorenzo.

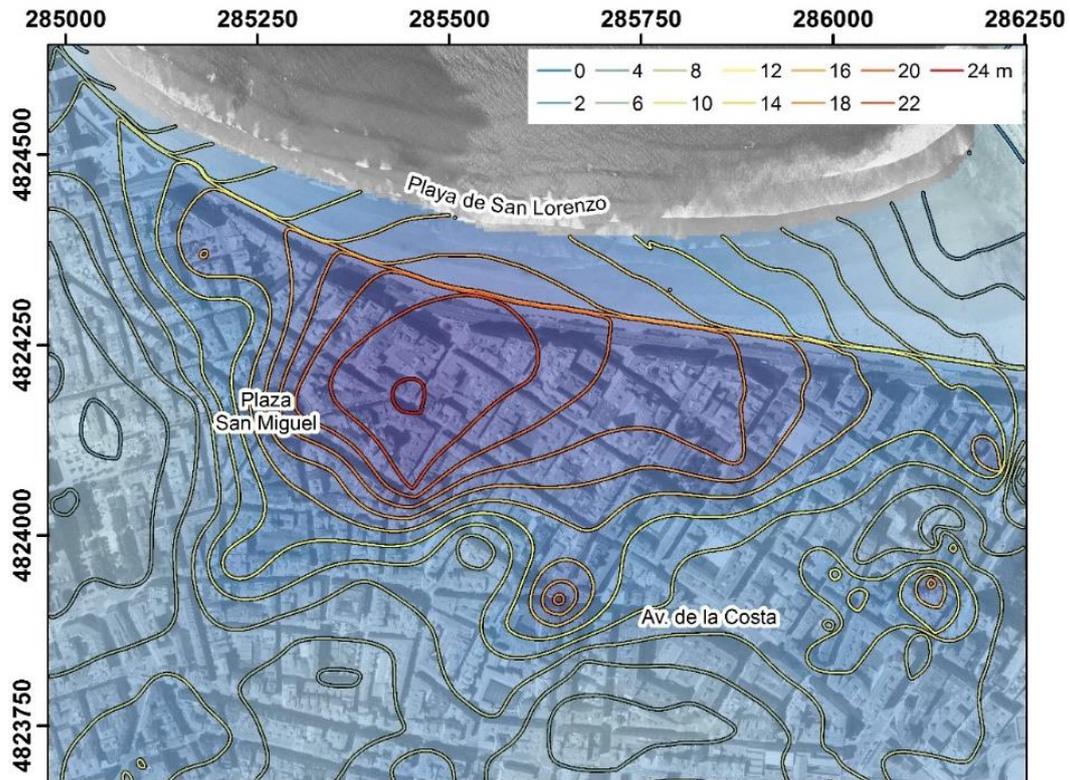


FIGURA 3.13. Detalle de las isopacas del relleno cuaternario.

Finalmente, con el objetivo de mostrar de otra forma la magnitud de los depósitos arenosos, se presenta una vista en 3D de parte del barrio de La Arena y del distrito Centro (Figura 3.14) junto con la base de los depósitos litorales. En ella se puede comprobar cómo el espesor de estos depósitos es, en muchas ocasiones, comparable e incluso superior a la altura de los edificios situados inmediatamente encima.

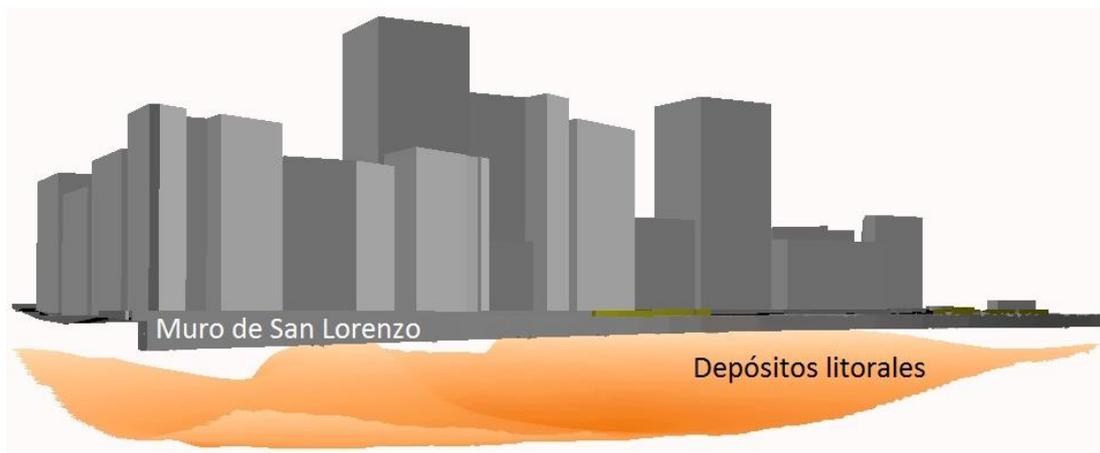


FIGURA 3.14. Vista 3D de la base de los depósitos litorales al noreste de la ciudad (realce x3).

### 3.5 Hidrogeología

La información hidrogeológica obtenida hace referencia exclusivamente al acuífero cuaternario de la ciudad, pues el 84 % de las lecturas piezométricas se correspondían con dicha acumulación acuosa, frente al 16 % que se ubicaban en el sustrato rocoso, referentes al acuífero del miembro superior de la Fm. Gijón. En este sentido, las 163 lecturas del acuífero cuaternario fueron utilizadas para analizar su techo, el cual parece situarse a una cota máxima de unos 6 m, con máximos en la parte sur de los depósitos arenosos, disminuyendo progresivamente hacia la línea de costa hasta conectar con el mar, por lo que el sentido de las líneas de flujo es, como cabía esperar, de sur a norte (Figura 3.15, superior). Dado que la modelización se realizó para el acuífero cuaternario, el sombreado gris de las figuras indica aquellas zonas donde los depósitos litorales no están presentes y, por tanto, no entran en la interpretación.

Por otro lado, el mapa profundidad de la lámina de agua (Figura 3.15, inferior) refleja, como cabía esperar, una tendencia menos lineal. En varias zonas, como el sureste de la ciudad, el norte del Paseo de Begoña o al sur de la playa de Poniente, esta superficie se encuentra más profunda, situándose por encima de los 6 m. En el resto de la zona de estudio, el techo del acuífero presenta variaciones, oscilando generalmente entre los 2 y los 4 m de profundidad, destacando la parte suroeste del acuífero, en torno a la avenida Pérez de Ayala, donde el nivel freático se localiza muy próximo a la superficie topográfica, en la parte superior de los rellenos antrópicos. Esto tendrá importantes implicaciones a la hora de llevar a cabo excavaciones de cualquier tipo si se tiene como objetivo garantizar la estanqueidad de la obra.

Dado que no se dispone de la fecha en la que se realizaron las lecturas, no es posible separar aquellas que se tomaron durante la época de lluvias de las que se hicieron en los periodos de estiaje, existiendo ligeras oscilaciones del nivel piezométrico entre ambas partes del año. Esto, naturalmente, condiciona el modelo de isopiezas obtenido cuyo propósito es meramente orientativo, siendo casi con total seguridad la causa de las pequeñas depresiones o resaltos que generan algunos sondeos y que desentonan con la tónica general. Por otro lado, hay que tener en cuenta las oscilaciones ligadas a las mareas, de mucho menor periodo que las anteriores.

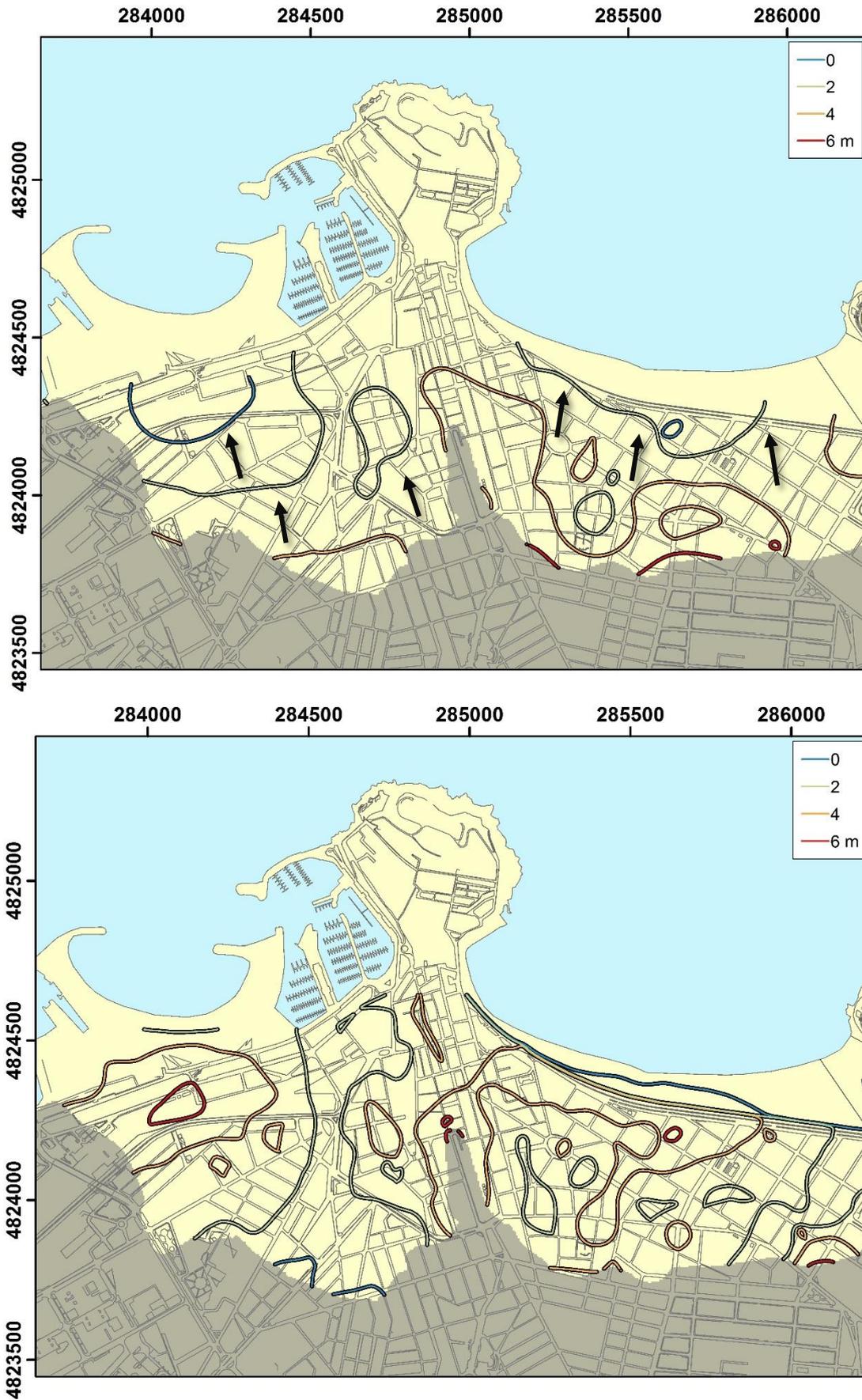


FIGURA 3.15. Isopiezas (arriba) y mapa de profundidad de la lámina de agua (abajo).

### 3.6 Estructura

Las aportaciones referentes a la estructura de la zona de estudio están enfocadas a la interpretación de posibles fallas en el sustrato rocoso que subyace al centro urbano. Se ha indicado previamente que el municipio está afectado por dos sistemas de fallas (NE-SO y NO-SE) así como por varios sistemas de diaclasas. Sin embargo, el extenso recubrimiento cuaternario y la escasez de afloramientos provoca que la cartografía de estas estructuras sea una tarea compleja, algo que se puede comprobar en los mapas geológicos existentes. En este sentido, las fracturas más relevantes han sido identificadas gracias a diferentes prospecciones y reflejadas en algunos de los cortes geológicos publicados.

El proceso llevado a cabo para la detección de estructuras en este trabajo consistió en la generación del Modelo Digital de Pendientes (MDP) de dos de las superficies de interpolación generadas: el techo de la Formación Gijón y la base de los depósitos litorales. Esto se ha realizado con vistas a investigar aquellas zonas donde el paleorrelieve rocoso es más acusado o muestra alguna tendencia lineal, lo cual puede estar ligado a la existencia de fracturas que le afecten. El hecho de tener en cuenta la base de los depósitos litorales es debido a que, bajo dichos materiales, se sitúan los depósitos eluviales que formaron parte del paleorrelieve rocoso en algún momento del pasado.

Los resultados obtenidos reflejan importantes pendientes en varias zonas de la ciudad, algunas altamente correlacionables con los puntos donde se identificaron fallas en alguna prospección. A partir de ello se han interpretado un total de siete potenciales fallas, tres de ellas con trazado aproximado NO-SE y, cuatro, con trazado NE-SO (Figura 3.16). Entre ellas, destacan las situadas a ambos lados del Paseo de Begoña, las cuales limitarían el promontorio que supone tanto orográficamente como geológicamente esa zona de la ciudad. Además, ambas parecen guardar relación con otras fracturas identificadas en sus proximidades, pero de dirección diferente. Por otro lado, destacar que dichas estructuras parecen cobrar más importancia en la zona este de la ciudad, donde bordean al barrio de La Arena y serían potencialmente causantes de la mayor depresión de la ciudad colmatada por sedimentos cuaternarios. Finalmente, hay que mencionar que las elevadas pendientes del Cerro de Santa Catalina no se ha podido concluir que sean debidas a fallas, pues no se dispone de datos de la continuidad del sustrato rocoso mar adentro.

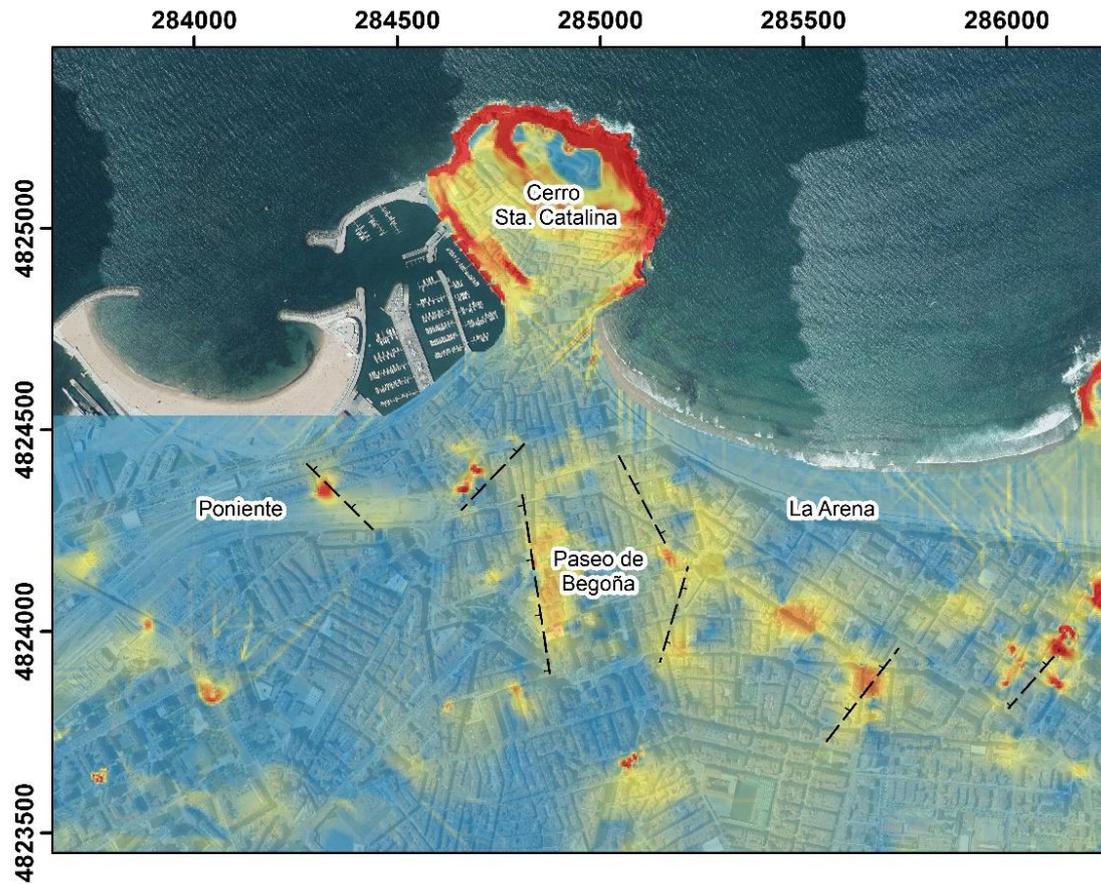
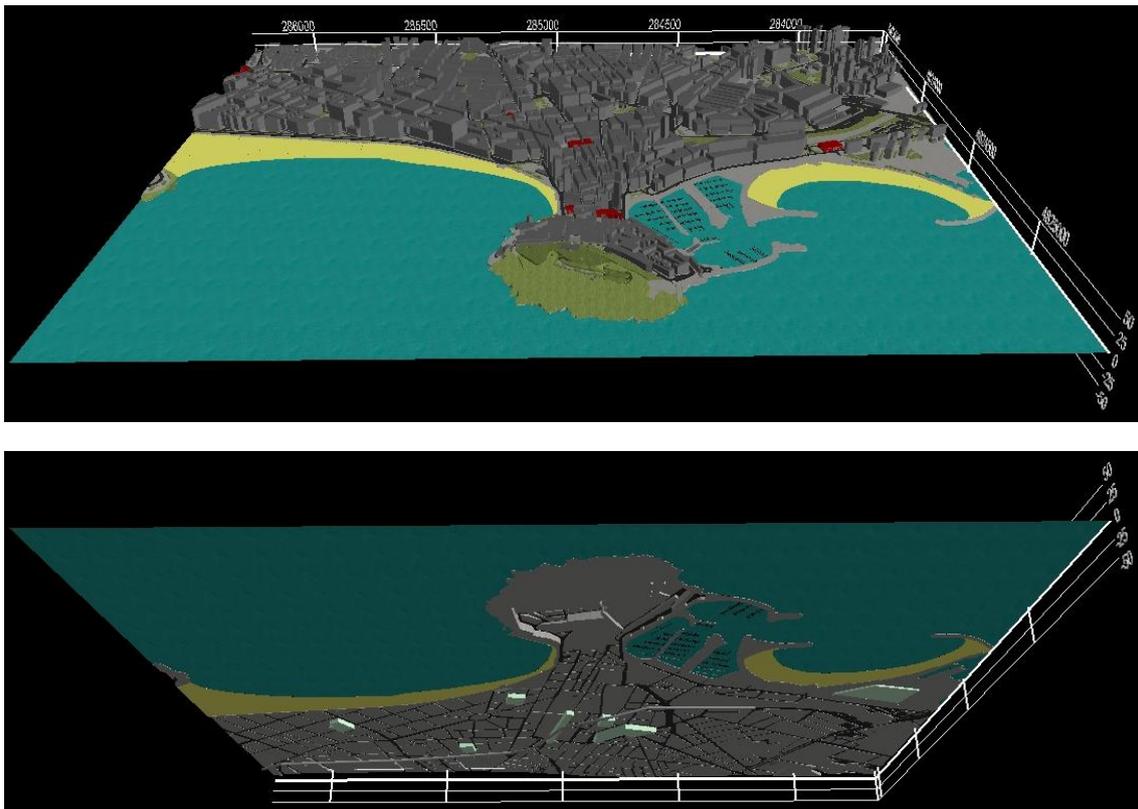


FIGURA 3.16. Posibles fallas (con indicación de bloque hundido) en la zona de estudio.

### 3.7 Modelo 3D final

El modelo 3D final, visualizado mediante el módulo 3D de ArcGIS, presenta numerosas capas divididas en dos grupos de datos. Por un lado, está el que aglutina los elementos geográficos (Figura 3.17), que incluye a su vez tres subgrupos de elementos; los terrestres subaéreos (superficie terrestre, edificios, calles, zonas verdes, fuentes, aceras y playas), los terrestres subterráneos (aparcamientos públicos y tubo del Metrotrén) y los marinos (superficie del fondo marino y superficie del mar a cota 0). No obstante, cabe mencionar que la representación de los elementos geográficos no debe enmascarar el resultado principal del trabajo, es decir, la representación de las unidades geológicas.



*FIGURA 3.17. Modelo geográfico visto desde arriba y desde abajo (realce x2).*

Por otro lado, está el grupo de capas que incluye las superficies geológicas (Figura 3.18), las cuales son de más superficial a más profunda: base de los rellenos antrópicos, base de los depósitos litorales y techo de la Fm. Gijón, que actúa también de base de los depósitos eluviales siempre que estos estén presentes. Además, en este segundo grupo, se incluye también la base y el techo de las turbas, intercaladas dentro de los depósitos litorales.

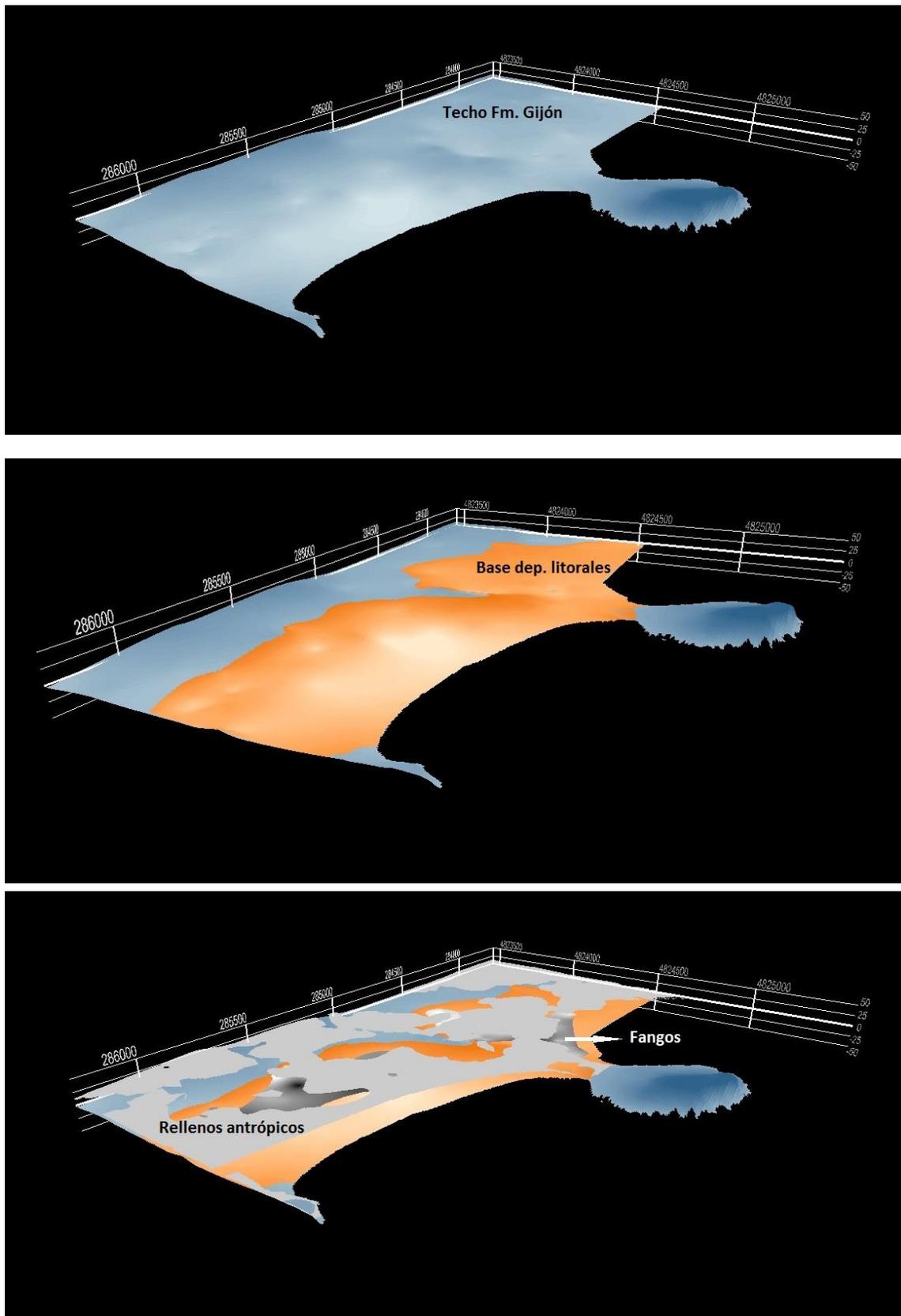


FIGURA 3.18. Diferentes vistas del modelo geológico en 3D (realce x2).

#### 4. CONCLUSIONES

De la metodología desarrollada durante la elaboración del presente trabajo y los resultados derivados de la misma, pueden extraerse las siguientes conclusiones:

- La construcción del MDE es un paso fundamental en un trabajo de esta índole, pues constituye una referencia indispensable para la generación de las superficies geológicas, más aun tratándose de una zona urbana con pequeñas oscilaciones de cota. El MDE final (con resolución de 1 m) está integrado por dos partes; la emergida (elaborada a partir de diversas fuentes de datos) y la submarina (a partir de un visor online de batimetría). En el modelo completo obtenido, con máximo de 43,96 m y -10 m, destaca la alineación de relieve positivo existente entre el Cerro de Santa Catalina, el Paseo de Begoña y la parte SE de la zona de estudio, dividiendo la ciudad en dos dominios morfológicos.
- La preparación del soporte cartográfico urbano para el modelo mediante un software SIG es una tarea que requiere dedicación. El proceso supuso trabajar con capas vectoriales que permitieron representar diferentes elementos del entramado urbano (calles, edificios, zonas verdes, playas, fuentes, etcétera) con el objetivo último de crear entidades que pueden ser dotadas de apariencia 3D. El hecho de realizar esta representación en planta de una forma minuciosa, así como el haber tenido en cuenta la altura estimada de cada manzana o edificio, implica que la posterior representación tridimensional otorgue un aspecto final al modelo muy atractivo para el observador, mejorando las referencias espaciales y visuales.
- En lo referente a los mecanismos de interpolación, se concluye que el software empleado permitió cumplir los objetivos marcados. Se ha comprobado que los métodos determinísticos permiten obtener buenos resultados -en lo que a generación de superficies geológicas se refiere- con una complejidad menor a la que presentan los métodos geoestadísticos. Dentro del conjunto de métodos determinísticos el mecanismo más adecuado resultó ser la función de base radial (RBF) denominada “Multiquadric”, pues se trata de un interpolador exacto (a diferencia de GPI y LPI) que dota de sentido matemático y, fundamentalmente geológico, a las superficies obtenidas en esta investigación, a diferencia del IDW el cual genera superficies más quebradas e irregulares. Para lograr los mejores resultados, además de utilizar un valor de suavizado muy próximo a 0 es importante variar la longitud del semieje en función de la irregularidad de la superficie a modelizar (a mayor irregularidad, menor longitud) y de la densidad de puntos medidos (a mayor densidad, menor longitud).

- El mapa geológico elaborado guarda buena sintonía con las anteriores referencias bibliográficas si bien presenta unas ligeras modificaciones; entre ellas la existencia de un afloramiento del sustrato rocoso al sureste de la zona de estudio. Además, se ha interpretado otros dos pequeños afloramientos rocosos en la parte central y, por otro lado, la línea que marca la terminación de los depósitos litorales hacia el sur se ve ligeramente modificada, sobre todo en el entorno del paseo de Begoña. Con todo esto, el mapa geológico de la ciudad está dominado por los materiales de origen litoral, que copan un 56 % del área estudiada, seguidos por los depósitos eluviales (23 %) y el sustrato rocoso (21 %). Por otro lado, los rellenos antrópicos ocuparían más del 80 % de la zona de estudio.
  
- La obtención de las superficies geológicas permitió generar los diferentes mapas de isobatas e isopacas. La superficie modelizada más moderna fue la base de los rellenos antrópicos, extendidos por el 81 % de la zona de estudio con una potencia máxima de 8 m al SE. Respecto a los depósitos litorales, destaca la gran acumulación que subyace el barrio de La Arena, donde se superan los 22 m de potencia. En relación con los depósitos litorales, se identificaron, intercalados en la parte baja de estos, dos grandes acumulaciones de fangos organógenos y otro de menor entidad en la zona de Poniente. Respecto a los dos primeros, se trata de depósitos irregulares tanto en profundidad como en planta con potencias máximas del orden de 4 m, uno a cada lado de la ciudad separados por el Paseo de Begoña. Finalmente, el horizonte modelizado más profundo fue el techo de la Fm. Gijón, que actúa también de base de los depósitos eluviales, los cuales alcanzan potencias superiores a 10 m en la zona SE. Por su parte, el techo del sustrato rocoso, situado hasta a 24 m bajo la superficie, refleja la gran envergadura del relleno cuaternario y guarda relación con el relieve de la ciudad, pues presenta la misma alineación de orografía positiva N-SE observada en el MDE.
  
- La disponibilidad de 163 lecturas del nivel piezómetro correspondientes al acuífero cuaternario, formado en su gran mayoría por depósitos de origen litoral, permitió la elaboración de un mapa orientativo de isopiezas y profundidad de la lámina de agua. Por un lado, se concluye que el sentido de las líneas de flujo es de sur a norte, dada la progresiva disminución de las cotas de las isopiezas desde un máximo de 6 m en la parte sur de la zona de estudio hasta conectar con el mar. Por otro lado, el nivel piezométrico varía ligeramente su profundidad, oscilando generalmente entre los 2 y los 4 m y nunca por debajo de los 8 m, destacando la parte suroeste del acuífero, en torno a la avenida Pérez de Ayala, donde dicho nivel se encuentra muy próximo a la superficie topográfica, a menos de 1 m de profundidad.

- Respecto a las aportaciones sobre la estructura del sustrato, el trabajo se centró en la identificación de posibles fracturas que atraviesan el basamento rocoso. Fueron interpretadas un total de siete potenciales fallas, tres de ellas con trazado aproximado NO-SE y, cuatro con trazado NE-SO. Destacan las situadas a ambos lados del paseo de Begoña y las que bordean la depresión de La Arena. Esto fue posible mediante la obtención del MDP del techo de la Fm. Gijón y de la base de los depósitos litorales.
  
- El producto final de este trabajo de investigación es, como cita su título, el modelo geológico (tridimensional) de la zona de estudio. Esta recreación, que está sustentada por los elementos urbanos –tanto subaéreos como subterráneos- está compuesta por varios horizontes geológicos que, de más antiguo a más moderno son: techo de la Fm. Gijón -coincidente con la base de depósitos eluviales-, base de los depósitos litorales, base y techo de los depósitos de fangos y, finalmente la base de los rellenos antrópicos. La combinación de ambas tipologías de elementos mejora la referencia espacial y visual del modelo, facilitando la interpretación del mismo y formando un conjunto de significativo impacto visual que facilita entender la configuración del subsuelo que subyace al centro urbano gijonés.

## 5. BIBLIOGRAFÍA

- ÁLVAREZ ALONSO, P. (2017): Introducción a las propiedades geotécnicas de la Fm. Gijón en el entorno de la ciudad de Gijón (Asturias). Trabajo Fin de Máster, Departamento de Geología, Universidad de Oviedo.
- GARCÍA RAMOS, J.C. Y GUTIÉRREZ CLAVEROL, M. (1995): La cobertera mesozoico-terciaria. Geología de Asturias F. Bastida y C. Aramburu, eds.). Ed. Trea, 81-94 pp., Gijón.
- CANTERAS, J.C., PÉREZ, L., CANTERA, E., SOLER, M., CARRALIMOS, C.I. (1995): Impacto ambiental de regeneración de playas: La playa de Poniente (Gijón). Ingeniería del Agua. Vol. 2 Núm. Extraordinario (abril 1995) 223-243 pp.
- CONTROL DE HORMIGONES Y SUELOS S.A. (1985): Estudio geotécnico del proyecto de confederación hidrográfica del Cantábrico de los colectores del arrenal de San Lorenzo y del coto San Nicolás.
- FERNÁNDEZ ÁLVAREZ, P. (2017): Desarrollo de un modelo geológico en el centro urbano de Oviedo (Asturias). Trabajo Fin de Máster, Departamento de Geología, Universidad de Oviedo, 91 pp.
- FERNÁNDEZ CUESTA, G. (2016): La construcción histórica de la ciudad de Gijón. VRBE II, Universidad de Oviedo. Ed. Ediuno.
- FLOR, G. Y LHARTI, S. (2008): Estratigrafía y sedimentología del recubrimiento costero de la ciudad de Gijón. Trabajos de Geología, 30: 12-17 pp., Oviedo.
- GONZÁLEZ FERNÁNDEZ, B., MENÉDEZ CASARES, E., GUTIÉRREZ CLAVEROL, M. Y GARCÍA-RAMOS, J.C. (2004): Subunidades litoestratigráficas de la Formación Gijón en Asturias. Actas VI Congreso Geológico de España, Zaragoza, Geo-Temas, 6 (2): 71-74 pp.
- GONZÁLEZ QUIRÓS, A. (2011): Modelización hidrogeológica de los acuíferos carbonatados de la masa de agua 012.005 en el entorno de la ciudad de Gijón. Trabajo Fin de Máster, Departamento de Geología, Universidad de Oviedo, 122 pp.
- GUTIÉRREZ CLAVEROL, M., TORRES ALONSO, M. Y LUQUE CABAL, C. (2002): El subsuelo de Gijón. Aspectos Geológicos. Ed. Cervantes, 462 pp.
- IGME (1981): Climatología general de Asturias. Investigación hidrogeológica de la Cuenca Norte de España (Asturias). Ministerio de Industria y Energía, Madrid.

- INGE (2014): Estudio geológico-geotécnico para el depósito de aguas de tormenta en el Parque de los Hermanos Castro (Gijón).
- ISRM (1981): Rock Characterization, Testing and Monitoring. Brown, E.T. (eds.). ISRM Suggested Methods, Pergamon Press, Oxford, 1-211 pp.
- JULIVERT, M., FONTBOTÉ, J.M., RIBEIRO, A., CONDE, L. (1972): Mapa Tectónico de la Península Ibérica y Baleares. Escala 1:1.000.000. Instituto Geológico y Minero de España.
- LACOTEC (2014): Estudio geotécnico relativo al proyecto de construcción del aparcamiento subterráneo del Parque de la Serena de Gijón (Asturias).
- LOTZE, F. (1945): Zur Gliederung der Variszden der Iberischen Meseta. Geotekt Forsch. 6: 78-92 pp.
- LÓPEZ FERNÁNDEZ, C., PANDO, L., GUTIÉRREZ CLAVEROL, M. Y TORRES ALONSO, M. (2006): Propiedades geotécnicas de las arcillas de descalcificación de Gijón y áreas limítrofes (Asturias). Ingeniería Civil, 141: 49-61 pp, Madrid.
- LÓPEZ GAYARRE, F., GONZÁLEZ NICIEZA, C., ÁLVAREZ FERNÁNDEZ, M.I. Y ÁLVAREZ VIGIL, A.E. (2010): Forensic analysis of a pile foundation failure (Gijón). Engineering Failure Analysis, 17: 486-497 pp.
- MARTÍNEZ LARGO, J.A. (2014): Desarrollo de una base de datos geológico-geotécnica en la ciudad de Gijón y su implementación en SIG. Trabajo Fin de Máster, Departamento de Geología, Universidad de Oviedo, 85 pp.
- MENÉNDEZ, E., GONZÁLEZ, B., GUTIÉRREZ, M., Y GARCÍA-RAMOS, J.C. (2004): Precisiones sobre los acuíferos de la cuenca jurásica asturiana (NO de España), Trabajos de Geología, 24: 119-126 pp.
- MINISTERIO DE FOMENTO (2001): Estudio geotécnico del nuevo trazado subterráneo del ferrocarril en Gijón. Documento resumen. Dirección General de Ferrocarriles, 24 pp.
- PANDO, L., FLOR BLANCO, G., FLOR, G. Y LÓPEZ FERNÁNDEZ, C. (2012): Propiedades geotécnicas del recubrimiento cuaternario costero en el área urbana de Gijón (NO de España). Actas 7º Simposio sobre el Margen Ibérico Atlántico, Lisboa, 205-210 pp.
- TORRES ALONSO, M. (1984): Características geológico-geotécnicas de los materiales arcillosos de la zona urbana de Gijón (Asturias). Boletín de Ciencias de la Naturaleza, IDEA, 33: 139-155 pp.

TORRES ALONSO, M., GUTIÉRREZ CLAVEROL, M. Y RODRÍGUEZ BOUZO, L. (1998): Problemática geológica y geotécnica de una urbe marítima singular: la ciudad de Gijón (NO de España). Actas X Congreso Latinoamericano de Geología y VI Congreso Nacional de Geología Económica, Buenos Aires, 1: 359-364 pp.

VALENZUELA, M., GARCÍA RAMOS, J.C. Y SUÁREZ DE CENTI, C. (1986): The Jurassic sedimentation in Asturias (N Spain). Trabajos de Geología, Universidad de Oviedo, 16: 121-132 pp.

**Portales web consultados:**

- Ayuntamiento de Gijón: [www.gijon.es](http://www.gijon.es)
- Centro de descargas del CNIG: [www.centrodedescargas.cnig.es](http://www.centrodedescargas.cnig.es)
- Servicio WMS del Catastro: [www.catastro.minhap.gob.es](http://www.catastro.minhap.gob.es)
- Visor cartográfico del IGME: [www.info.igme.es/visorweb/](http://www.info.igme.es/visorweb/)
- Visor de batimetría: [www.navionics.com](http://www.navionics.com)