



Universidad de Oviedo
Universidá d'Uviéu
University of Oviedo



CENTRO INTERNACIONAL
DE POSTGRADO
CAMPUS DE EXCELENCIA
INTERNACIONAL

**MÁSTER OFICIAL EN RECURSOS GEOLÓGICOS E INGENIERÍA
GEOLÓGICA
(2015/2017)**

TRABAJO FIN DE MÁSTER

-

**DESARROLLO DE UN MODELO
GEOLÓGICO EN EL CENTRO
URBANO DE OVIEDO (ASTURIAS)**

Pelayo Fernández Álvarez

Junio de 2017



Máster en Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica

Universidad de Oviedo



D. Pelayo Fernández Álvarez, autor del Trabajo Fin de Máster titulado “Desarrollo de un modelo geológico en el centro urbano de Oviedo”, 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 7 de junio de 2017

Fdo. Pelayo Fernández Álvarez

El Dr. Luis A. Pando González, Profesor Titular del Departamento de Geología de la Universidad de Oviedo, confirma que ha tutelado el trabajo “Desarrollo de un modelo geológico en el centro urbano de Oviedo”, realizado por D. Pelayo Fernández Álvarez, 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 7 de junio de 2017

Fdo. Luis A. Pando González



ÍNDICE

| | págs. |
|---|-------|
| Resumen | .1 |
| Abstract | .2 |
| I. INTRODUCCIÓN | .3 |
| I.1. La ciudad | .4 |
| I.1.1. Situación geográfica | .4 |
| I.1.2. Relieve | .6 |
| I.1.3. Evolución urbanística | .8 |
| I.2. Geología urbana | .11 |
| I.3. Marco geológico | .12 |
| I.3.1. Generalidades | .12 |
| I.3.2. Estratigrafía | .13 |
| I.3.3. Estructura | .21 |
| I.3.4. Hidrogeología | .22 |
| I.4. Objetivos | .24 |
| II. METODOLOGÍA | .25 |
| II.1. Obtención de datos | .25 |
| II.2. Base de datos | .26 |
| II.2.1. Recursos cartográficos | .26 |
| II.2.2. Información geológica | .27 |
| II.3. Tratamiento de datos | .29 |
| II.3.1. Consulta y selección de información | .29 |
| II.3.1.1. Información geográfica | .29 |
| II.3.1.2. Información geológica | .33 |
| II.3.2. Mecanismos de interpolación | .38 |



| | |
|--|-----|
| II.4. Mecanismos de validación | .43 |
| II.4.1. Validación cruzada | .43 |
| II.4.2. Consistencia geológica | .44 |
| II.5. Obtención de mapas finales | .48 |
| III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN | .51 |
| III.1. Aportaciones cartográficas | .51 |
| III.2. Mecanismos de interpolación | .57 |
| III.3. Cartografía geológica | .61 |
| III.4. Aportaciones sobre las unidades geológicas | .66 |
| III.4.1. Formaciones superficiales | .66 |
| III.4.2. Paleógeno | .68 |
| III.4.3. Fm. Oviedo | .70 |
| III.4.4. Fm. La Argañosa | .72 |
| III.5. Aportaciones sobre estructura | .73 |
| III.5.1. Fallas | .73 |
| III.5.2. Paleorrelieve meso-terciario | .76 |
| III.6. Modelo 3D | .77 |
| IV. CONCLUSIONES | .81 |
| V. BIBLIOGRAFÍA | .84 |
| VI. AGRADECIMIENTOS | |



Resumen: para la realización de cualquier obra es necesario conocer la estructura y las propiedades físicas del terreno donde esta se va a llevar a cabo. Cuando las obras se desarrollan en un entorno urbano, la rama de la geología encargada de abordar estos conocimientos es la geología urbana. Hasta hace algunos años, esta rama de la geología se reducía a la observación de afloramientos en las ciudades y a la realización de mapas geológicos en base a ellos, pero en los últimos años, se ha comenzado a recopilar toda la información geológica disponible en una ciudad (observaciones, sondeos, etc.), digitalizarla y conservarla de manera ordenada. Una vez que toda la información ha sido recopilada, y está disponible de manera clara, puede ser utilizada para la elaboración de modelos geológicos 3D. Este último paso dentro de la geología urbana permite una visualización rápida y sencilla del conocimiento disponible sobre el subsuelo de una ciudad, haciéndolo accesible a otros profesionales no geólogos y al público en general. Además, a esta información geológica se le puede añadir una representación superficial de la ciudad, haciéndola más atractiva y aún más fácilmente entendible. La obtención de una representación superficial del entorno urbano requiere la recopilación de toda la información topográfica disponible, con el fin de poder obtener una superficie topográfica precisa que será la base del resto del modelo, tanto en superficie como en profundidad. Además de la obtención de una superficie topográfica precisa, es necesario recopilar información referida a edificios, túneles, excavaciones y todo tipo de estructuras presentes tanto en la superficie de la ciudad como bajo ella, con el fin de dotar al modelo geológico de información complementaria y de aumentar su realismo y calidad. En cuanto a la parte geológica del modelo, consiste en el cálculo de superficies geológicas en base a los contactos entre diferentes unidades identificados en sondeos u observaciones. La generación de estas superficies requiere la utilización de mecanismos de interpolación, los cuales permiten transformar la información puntual obtenida en las tareas de reconocimiento del terreno, en propiedades continuas a lo largo de toda una zona. Ante la variedad de estos mecanismos, es necesario decantarse por uno de ellos; en este trabajo se le ha dado importancia al hecho de que las superficies obtenidas a través de la interpolación respeten la posición de los contactos identificados en los sondeos; siendo esta, entre otras, la razón por la que se ha optado por el uso de un mecanismo de interpolación exacto, concretamente RBF. Una vez obtenidas todas las superficies geológicas se puede conocer la geometría de las diferentes unidades a lo largo de toda la zona estudiada. En el caso del centro de la ciudad de Oviedo la parte más superficial del subsuelo está formada por cuatro unidades: las formaciones superficiales (rellenos antrópicos, y suelos aluviales y eluviales) ocupan casi toda la zona, alcanzando espesores de hasta 18 m; por debajo de estas se encuentran materiales paleógenos de litologías muy variadas que pueden presentar hasta 40 m de espesor; a continuación aparecen las unidades cretácicas, siendo la primera de ellas la Fm. Oviedo, constituida por calizas arenosas que pueden alcanzar los 30 m de potencia; la última unidad identificada es la Fm. La Argañosa, una unidad arenosa con tramos arcillosos que presenta espesores entre los 35 m y los 40 m.

Palabras clave: geología urbana; SIG; interpolación; RBF; modelo geológico; 3D; Oviedo.



Abstract: for the development of any construction project, knowledge of the structure and physical properties of the underground is needed. When these projects are placed in an urban area, the part of geology which involves this knowledge is urban geology. Some years ago, urban geology just involved the study of outcrops in the urban areas and the production of geological maps based on them, but in the last years, scientists have started to collect all the available geological information in the cities (outcrops, boreholes, etc.), to digitize and store it orderly. Once all this information has been stored and it is ready to be easily consulted, it can be used to develop 3D geological models. This last step of urban geology enables a faster and easier display for the knowledge of urban underground, allowing other scientists and the general public to use it. Furthermore, a rendering of the urban surface can be added to the model, making it more attractive and easy to understand. Obtaining a superficial representation of the urban environment requires the collection of all available topographic and geographic information. Using this topographic information, an accurate topographic surface can be made and used as the base of the model both in surface and depth. In addition to obtaining an accurate topographic surface, all the geographic information related to buildings, tunnels and other structures must be collected, thereby the model will be given extra information and the realism and quality of the model will rise. Regarding to the geological part of the model consists in calculating geological surfaces based on the geological contacts identified in the boreholes and outcrops. The development of these surfaces requires the use of interpolation methods, which allows transforming the punctual information in continuous information for the whole studied area. Due to the variety of these methods, it is necessary to select one of them. In this project, the fact that the obtained surfaces respect the points extracted from the real data (boreholes and outcrops) has been given importance so this, between others, has been the reason why exact interpolation methods have been chosen, specifically RBF. Once all the surfaces have been built, the geometry of the geological units can be known. In Oviedo, the urban subsurface is formed by four units: the surface formations, made up of anthropogenic deposits and alluvial and eluvial soils, cover the vast majority of the area, and can reach thickness of 18 m; beneath these, appear the Paleogene, made up of very varied lithologies, which can reach thickness of 40 m; then appear the cretaceous units, the first of them is Oviedo Formation, consisting of sandy limestones which can reach 30 m of thickness; the last formation identified in this project is La Argañosa Formation, which is made up of sand and clay and its thickness is between 35 m and 40 m.

Key words: urban geology; GIS; interpolation; RBF; geological model; 3D; Oviedo.



I. INTRODUCCIÓN

Este trabajo es pionero en Asturias, suponiendo el primer contacto con la modelización geológica en un entorno urbano de la región. Este tipo de trabajos han comenzado a extenderse por todo el mundo, hace algunos años se inició su realización en diferentes ciudades europeas como Basilea, Dublín, Glasgow, Hamburgo, Helsinki, Lisboa, Oslo, Viena, etc.; los cuales han sido finalizados en 2016. Por otro lado, a nivel nacional se están realizando modelos 3D del subsuelo en A Coruña y Barcelona. Todo ello hace ver que, este tipo de estudios constituyen la línea de investigación geológico-geotécnica más novedosa.

La importancia que se le está dando en la actualidad a este tipo de estudios integrales del subsuelo y a la realización de modelos 3D, se debe al rápido crecimiento de las ciudades, las cuales cada vez ocupan mayor espacio y necesitan seguir expandiéndose, haciéndose necesario un conocimiento del subsuelo que ayude a determinar las zonas más adecuadas para abordar esta expansión. En la determinación de estas zonas favorables influyen, de forma determinante, tanto los aspectos geomorfológicos y de riesgos externos como las características del sustrato sobre el que se apoyarán los edificios y en el que se realizarán las excavaciones necesarias. Por otro lado, históricamente se han producido importantes problemas en edificios (asientos diferenciales, colapsos estructurales, inundaciones de bajos, etc.), lo que ha puesto de manifiesto la importancia del conocimiento del terreno urbanizable. Además, los edificios cada vez crecen más en altura, tanto hacia arriba como en plantas subterráneas, lo que hace aún más importante un buen conocimiento del subsuelo.

Con la realización de este trabajo, se permite una visualización mucho mejor de los datos geológicos disponibles y se consigue que, esos datos puntuales, se conviertan en datos extrapolables a toda la zona mediante la utilización de diferentes procesos matemáticos para la interpolación con un Sistema de Información Geográfica (SIG). Esta extrapolación fiable de los datos permite la obtención de mapas geológicos más precisos y cuya utilización puede servir como orientación y como base bibliográfica para futuras campañas geotécnicas, ayudando a paliar la baja calidad de los informes geotécnicos realizados en obras de edificación. Además, se pueden incluir datos hidrogeológicos que permitan realizar un modelo hidrogeológico de la zona, lo cual tiene una importancia notoria ya que las aguas subterráneas son uno de los principales problemas de las obras, provocando inundaciones en excavaciones, subpresiones bajo las estructuras, afecciones al hormigón estructural por la presencia de sulfatos y otros muchos problemas que pueden afectar gravemente a la integridad de las estructuras.



I.1. La ciudad

En este apartado se hará referencia a todos los rasgos geográficos de la zona de estudio, incluyendo una situación geográfica detallada y referenciada, una descripción del relieve lo más detallada posible y un resumen de cómo ha ido expandiéndose la ciudad dentro de la zona, detallando cuáles han sido las zonas urbanizadas a lo largo del tiempo, ya que esto condiciona de manera importante los avances en el conocimiento del subsuelo.

I.1.1. Situación geográfica

La zona de estudio está definida por un rectángulo orientado en dirección E-O cuyos lados miden 1,9 km y 1,7 km respectivamente, cubriendo una extensión de 3,23 km² en el centro de la ciudad de Oviedo, un núcleo urbano de unos 220.000 habitantes, capital de la Comunidad Autónoma del Principado de Asturias, situada en el noroeste de España (Fig. I.1). Para mayor precisión en la definición de la zona las coordenadas de sus vértices son: 268200 – 4805700; 270100 – 4805700; 270100 - 4804000 y 268200 - 4804000, según coordenadas UTM referidas al sistema de referencia ETRS89 y huso 30. Estos límites engloban la zona central del caso urbano de la ciudad, incluyendo una superficie poco mayor que la limitada por las principales vías de comunicación, como son la calle Independencia, la avenida de Santander, las calles General Elorza y Adelantado de la Florida, la Ronda Sur, las calles Muñoz Degraín y González Besada, la avenida del Padre Vinjoy y las calles Hermanos Menéndez Pidal y Real Oviedo. Siendo la zona limitada por estas calles el principal objetivo a estudiar en este trabajo.

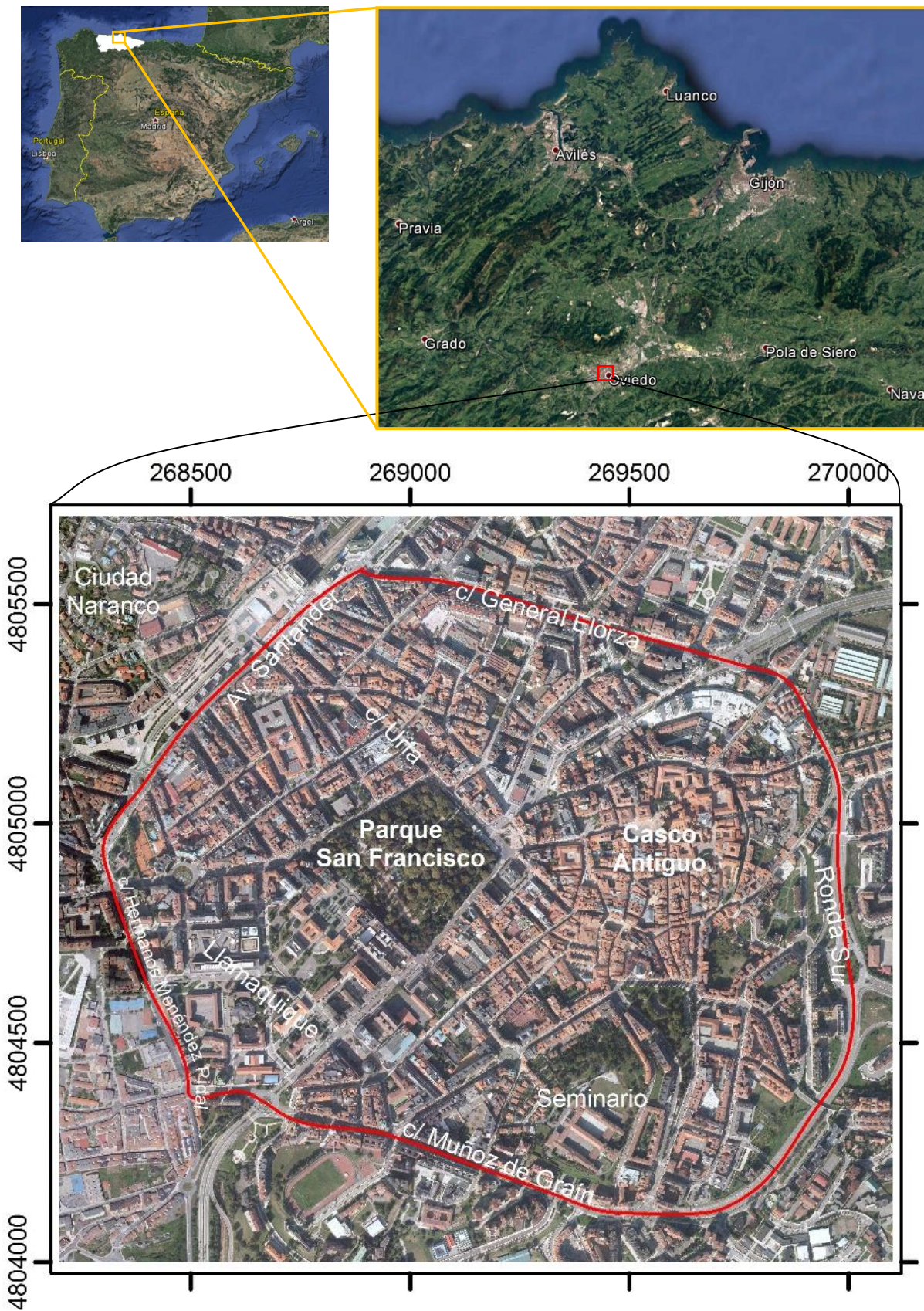


Figura I.1 – Situación geográfica de la zona de estudio con una ortofoto aérea de detalle.



I.1.2. Relieve

El relieve de esta zona es suave (Fig. I.2), las máximas altitudes se encuentran en la zona del Seminario Metropolitano, con una altitud de 268 m. También representan zonas elevadas la zona de Ciudad Naranco, con una altitud máxima dentro de la zona de estudio de 260 m, y el casco antiguo de la ciudad, con una altitud de 237 m. Los puntos más deprimidos de esta área se encuentran en los extremos sur y este, siendo 183 m la cota más baja. Estas escasas diferencias entre las cotas más altas y las más deprimidas, hacen que las pendientes dominantes sean bajas, con una inclinación media de 4°; según el Modelo Digital de Elevaciones elaborado a partir de datos topográficos proporcionados por el Ayuntamiento de Oviedo (1:1.000). En cuanto a las orientaciones de las laderas de esta zona, la predominante es hacia el SE, siendo habituales las orientaciones E y NE.

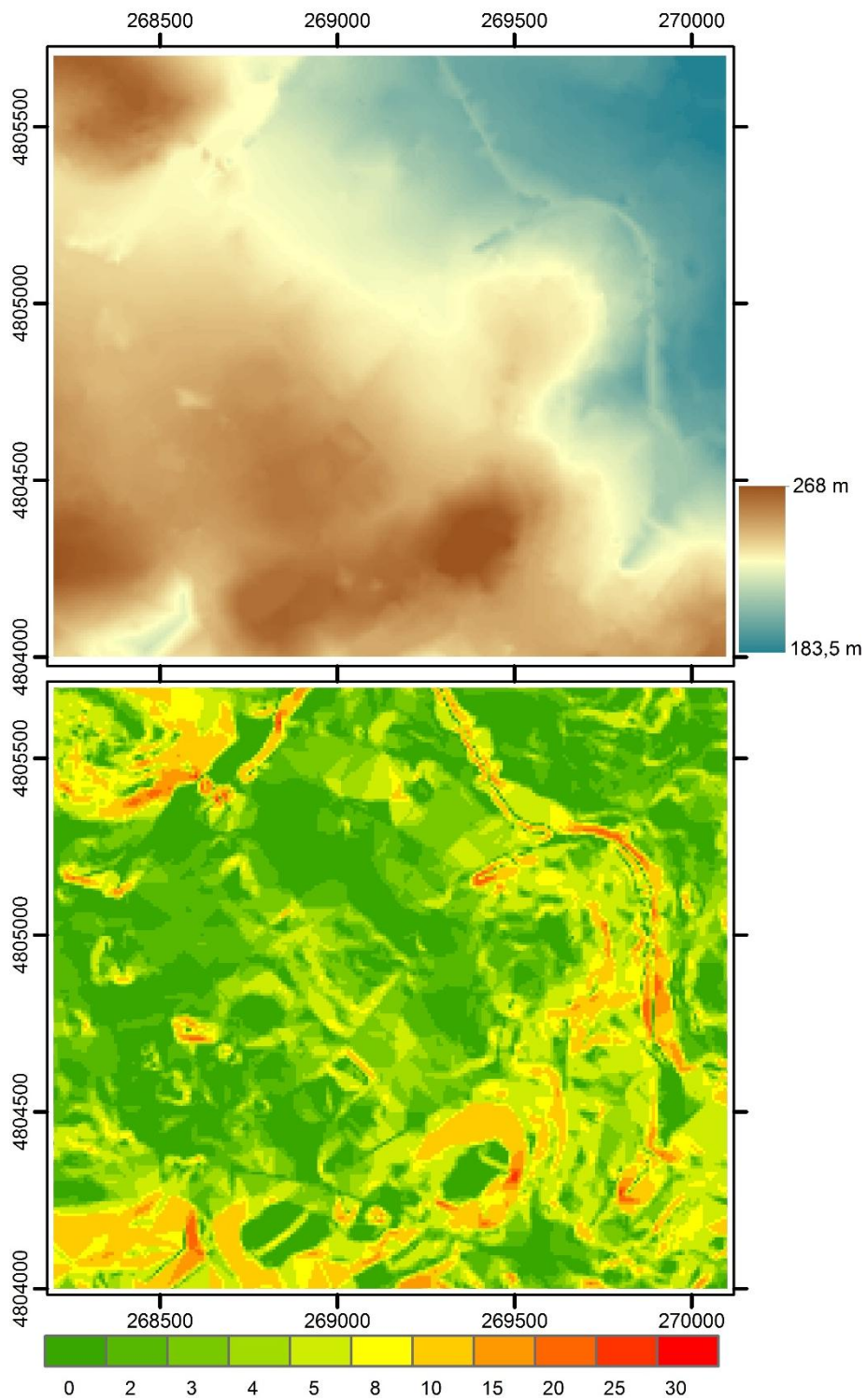


Figura 1.2 – Modelo Digital de Elevaciones de la zona de estudio (arriba) y mapa de pendientes expresadas en grados (abajo).



I.1.3. Evolución urbanística

Tal y como reflejan Calleja et al. (2015), la historia de Oviedo como ciudad comienza en el s. VIII, con el asentamiento de una residencia de los reyes astures. En el s. IX se ordena la construcción de un conjunto monumental y una muralla (Fig. I.3A) sobre la colina de Oviedo. Durante toda la Edad Media y hasta mediados del s. XIX la ciudad crece lentamente, extendiéndose poco más allá de la muralla medieval todavía en 1870 (Fig. I.3B). Es en este momento cuando la ciudad comienza a crecer fuera de la fortificación medieval de manera definitiva. En 1850 se había aprobado el plan urbanístico del “Ensanche de Uría”, cuya ejecución culminó en 1874 con la inauguración de la Estación del Norte y de la propia calle Uría. El crecimiento se acelera a finales del s. XIX y principios del s. XX, cuando se inauguran algunas de las importantes vías de comunicación utilizadas como límites de la zona de estudio de este trabajo, como la calle General Elorza (1887), que incluía la actual Avenida Santander, para comunicar la Fábrica de Armas de la Vega con la recién inaugurada Estación del Norte; también se abrieron en esta época la avenida del Padre Vinjoy (1917), la calle Muñoz Degraín (1925) y la calle Hermanos Menéndez Pidal (década de 1930), que iniciaron la urbanización de las zonas sur y oeste de la ciudad y su expansión en estas direcciones. De todos modos, la mayor expansión urbanística del actual centro de la ciudad tiene lugar a mediados del s. XX, cuando la expansión de la ciudad se acelera de manera importante, quedando totalmente urbanizada la zona de estudio en 1985 (Fig. I.3C). Durante este periodo se finalizan las principales vías de comunicación que rodean el centro de la ciudad, como son la calle Real Oviedo (antigua calle División Azul) (1963) y la Ronda Sur (1984), que unió la carretera de castilla con la calle General Elorza circunvalando la ciudad. Desde esta fecha hasta la actualidad, la zona ha sufrido algunas modificaciones (Fig. I.3D). Entre las modificaciones acometidas en los últimos 30 años destacan, la eliminación del “cinturón de hierro” (línea de FEVE que bordeaba la ciudad por el este) en 1997; esta actuación consistió en la eliminación de dicha línea ferroviaria y de las infraestructuras asociadas a ella, como la estación y los talleres de “El Vasco”. La otra modificación importante que sufrió esta zona fue la construcción de la losa para el soterramiento de la “Estación del Norte” en 2003. Ambas actuaciones dejaron disponibles las últimas parcelas para la edificación en esta zona, las cuales ya han sido ocupadas en la actualidad. Esto implica que, actualmente, la zona de estudio se encuentre totalmente urbanizada y edificada.

El crecimiento de la ciudad, y las fases en las que este se produce, son el principal condicionante para el conocimiento del subsuelo sobre el que esta se asienta. Esto implica que, en la actualidad, con toda la zona urbanizada, todos los datos que se pueden obtener están restringidos a algunos sondeos de investigación para futuras obras subterráneas o a



las escasas excavaciones abiertas durante la reconstrucción de edificios. Ante esta dificultad para obtener datos, se recurre a datos que hayan sido recogidos durante anteriores etapas de crecimiento de la ciudad.

A partir de mediados del s. XX, durante el periodo en el que la mayor parte de la zona era urbanizada y se abrían excavaciones para la construcción de edificios, geólogos como M. G. Claverol, M. Torres Alonso, J. Truyols o M. Julivert, pudieron realizar observaciones que fueron recogidas en publicaciones y han llegado a nuestros días, aportando información sobre el subsuelo de esas zonas que en la actualidad sería imposible de obtener. Posteriormente, a finales del s. XX, la construcción de edificios comenzó a ir acompañada de campañas de reconocimiento geológico-geotécnicas en las que se incluía la realización de sondeos, por lo que en las zonas que fueron edificadas más recientemente el volumen de datos es mayor.



I. INTRODUCCIÓN

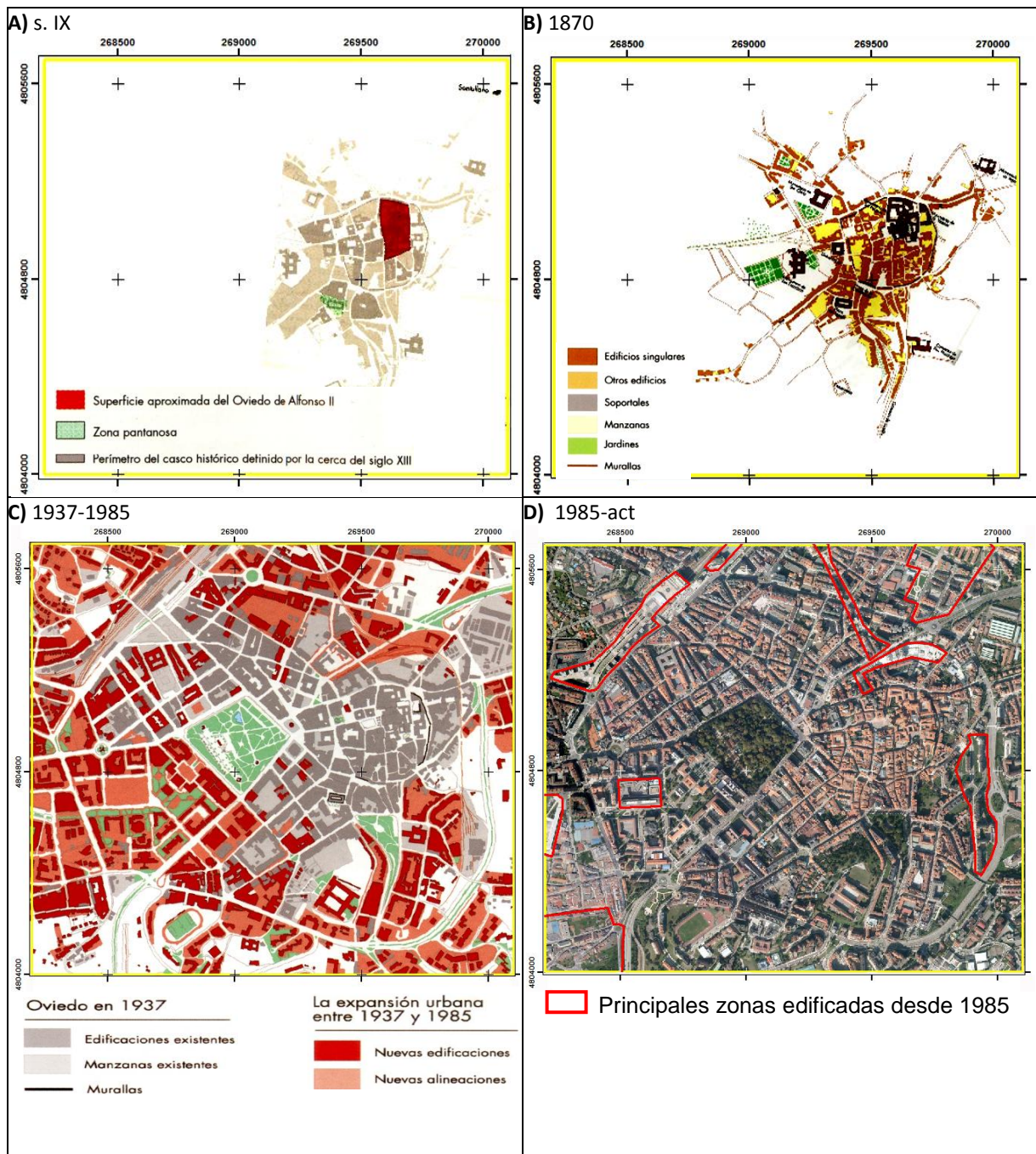


Figura I.3 – La zona de estudio en diferentes momentos de su historia (planos tomados de Calleja et al., 2015).



I.2. Geología urbana

El campo de la geología urbana es una especialidad de la geología que ha sufrido un avance muy significativo en los últimos años y actualmente se encuentra en plena expansión. Los primeros avances en este campo tuvieron lugar cuando se comenzó la recogida de datos geológicos en las ciudades (descripción de afloramientos y medidas estructurales en excavaciones, medidas piezométricas en pozos, etc.) y la utilización de los mismos para la elaboración de mapas geológicos y de modelos hidrogeológicos.

En la década de los 60 fue cuando comenzó a verse la importancia de la geología urbana, y la conveniencia de su integración en los planes de expansión urbanística. Especialmente a partir del año 1960, cuando el Dr. William J. Wayne dio una conferencia ante la Asociación Americana para el Avance de la Ciencia (AAAC) defendiendo la importancia de la geología urbana y su desarrollo como una disciplina independiente. A raíz de esto, los científicos empezaban a darse cuenta de cómo las características del sustrato sobre el que se asientan las ciudades, y los riesgos a los que estas están expuestas, condicionan la seguridad de los ciudadanos. Esta nueva mentalidad llevó a comenzar una recogida de datos geológico-geotécnicos mucho más detallada y sistemática, y a la realización de mapas geológico-geotécnicos y de riesgos de cada ciudad.

Con el tiempo, la concienciación sobre la importancia de la geología urbana ha ido en aumento, lo que ha hecho que en muchas ciudades occidentales se hayan acumulado gran cantidad de datos geológico-geotécnicos, tanto en superficie (observación de excavaciones) como en profundidad (sondeos). Esto lleva a que el siguiente paso en la geología urbana consista en la recopilación de todos estos datos, su ordenación y su conservación. Una vez que todos los datos disponibles están recopilados y ordenados, se puede abordar el último paso en lo que a geología urbana se refiere: la implementación de los mismos en bases de datos digitales y su posterior uso para obtener diferentes mapas geológico-geotécnicos detallados y modelos geológicos e hidrogeológicos 3D del subsuelo.

Este trabajo se enmarca en este último avance dentro de la geología urbana, el cual se encuentra en pleno desarrollo en toda Europa con proyectos como SUB-URBAN (<http://sub-urban.squarespace.com>). Este proyecto busca crear una red europea de trabajo y de intercambio de conocimientos sobre el subsuelo de las ciudades mediante la cooperación de los institutos o servicios geológicos de diferentes países, las administraciones locales y las entidades universitarias, para así, avanzar en el estudio de los materiales que sustentan las ciudades y planear de manera más eficiente su crecimiento. Este proyecto se enmarca dentro del proyecto COST (European Cooperation in Science and Technology), el cual engloba proyectos novedosos de diferentes áreas de conocimiento de toda Europa.



I.3. Marco geológico

I.3.1. Generalidades

Este trabajo se sitúa, desde un punto de vista geológico, en la Cuenca de Oviedo, extremo suroccidental de la denominada “Depresión mesoterciaria central” (Gutiérrez Claverol, 1973) (Fig. I.4). En esta cuenca se encuentran sedimentos cretácicos y paleógenos acumulados en una cuenca formada sobre un basamento paleozoico afectado por la orogenia varisca. Este basamento paleozoico no aflora dentro de la zona de estudio, ni ha sido cortado por ningún sondeo de los utilizados en este trabajo, por lo que no se entrará a describirlo detalladamente, centrándose en la descripción de los materiales cretácicos y paleógenos presentes en el subsuelo de la ciudad.

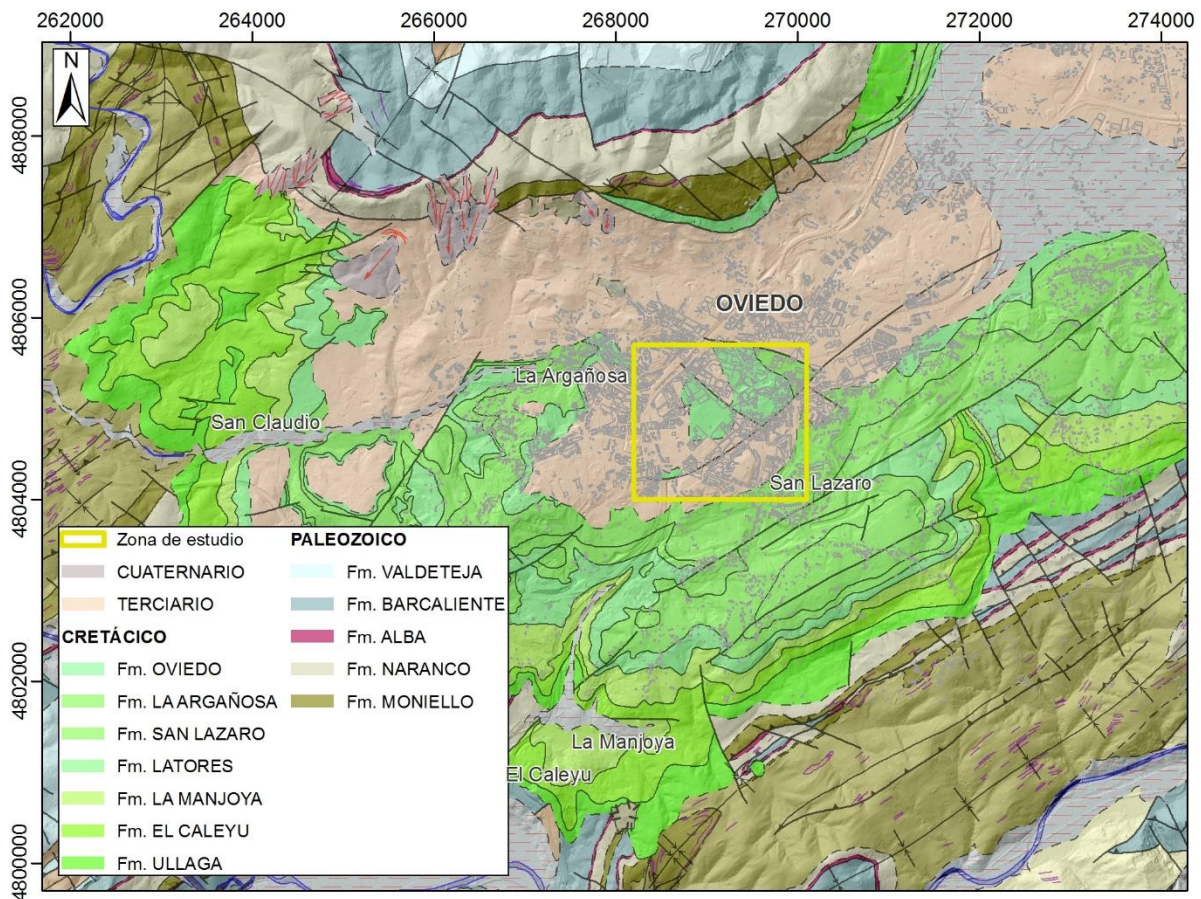


Figura I.4 – Mapa geológico de la “Cuenca de Oviedo”, extremo suroccidental de la “Depresión mesoterciaria central”. La zona de estudio aparece limitada por un rectángulo rojo (tomado de GEODE, IGME, 2004).

La sucesión cretácica asturiana ha sido ampliamente estudiada desde finales del siglo XIX por diversos autores que, gracias a la realización de estudios multidisciplinarios, han conseguido realizar una descripción detallada de los diferentes tramos, asignarles edades más o menos concretas y agruparlos en formaciones litoestratigráficas aplicables a toda la



cuenca de la manera más ordenada y sencilla posible. En este trabajo se va a considerar la división estratigráfica realizada por González Fernández et al. (2004), en la cual, se recopilan los principales trabajos realizados hasta ese momento sobre el Cretácico asturiano, y se reinterpretan para realizar una división más sencilla aplicable a todo el sector occidental de la cuenca cretácica. Esta división establece 10 formaciones litoestratigráficas para el cretácico asturiano, comprendiendo sedimentos con edades entre el Barremiense – Aptiense Inferior y el Coniaciense – Santoniense, es decir, desde hace unos 125 M.a. (Cretácico Inferior) hasta unos 86 M.a. (Cretácico Superior). Las 10 formaciones que se diferencian en esta publicación son: Peñaferruz, Antromero, Pola de Siero, Ullaga, El Caleyú, La Manjoja, Latores, San Lázaro, Argañosa y Oviedo. De estas 10 formaciones, las que tienen interés para este trabajo son las tres últimas, San Lázaro, Argañosa y Oviedo, ya que son las identificadas en los sondeos realizados en la zona a estudiar.

Además de estas formaciones cretácicas, bajo las calles del centro de la ciudad también se encuentran sedimentos cenozoicos, del Paleógeno, los cuales son más difíciles de estudiar debido a los múltiples cambios laterales de facies que presentan y a la escasez de niveles guía. Por encima del Paleógeno se encuentran sedimentos cuaternarios de origen aluvial y eluvial, pudiendo alcanzar los primeros espesores importantes. Además, como cabe esperar en cualquier casco urbano, abundan los rellenos antrópicos, los cuales se intentarán localizar y dimensionar de manera precisa en este trabajo. Debido a la escasez de depósitos cuaternarios en la zona y a su presencia localizada, en el modelo se han representado junto con los rellenos, agrupándolos como formaciones superficiales.

I.3.2. Estratigrafía

En este apartado se describirán más detalladamente las litologías presentes en las formaciones involucradas en este trabajo, sus características estratigráficas (espesores, continuidad lateral, cambios laterales de facies, etc.) y algunas características geotécnicas relevantes.

CRETÁCICO

- **Fm. San Lázaro:** se trata de una formación predominantemente carbonatada que alcanza los 42 m de espesor, con algunas intercalaciones detríticas. Debido a la heterogeneidad presente a lo largo de estos 42 m de serie estratigráfica, esta formación ha sido dividida en tres miembros, pudiendo no estar presentes todos ellos en algunas zonas de la cuenca.

- *Miembro Inferior:* en su estratotipo presenta un espesor de 18 m formados por alternancias de lutitas y limos grises, que pueden alcanzar espesores de 2 a 3 m y presentan estratificación lenticular u ondulante, con capas calcáreas de tonos grises y



un espesor no superior al medio metro. Las capas carbonatadas más abundantes son las margas calcáreas y las calizas arcillosas, es decir, las facies mudstone y wackstone, aunque también aparecen facies packstone y grainstone hacia el techo del miembro. En este miembro son abundantes los bivalvos y gasterópodos. Estas calizas del miembro inferior de la formación San Lázaro son las conocidas en el mundo de la construcción y las rocas ornamentales como caliza de Piedramuelle, la cual ha sido utilizada como piedra de sillería en la Catedral de Oviedo y en otros muchos edificios nobles de la ciudad.

- *Miembro Medio:* alcanza los 14 m de espesor y está compuesto por capas de calizas nodulosas glauconíticas de tonos grises con espesores entre 0,5 m y 1 m (Fig. I.5, izq.), intercaladas con capas de limos, arcillas o margas de 30 a 60 cm de espesor y tonos grises oscuros. Las calizas están formadas por facies wackstone y packstone y son muy abundantes los fósiles de gasterópodos, bivalvos, briozoos, anélidos, ostrácodos, equínidos y microfauna, además de algas calcáreas.
- *Miembro Superior:* formado por 10 m de calizas nodulosas pardo-amarillentas con abundante glauconita en bancos de 0,5 m a 1 m. Entre estos bancos de calizas se intercalan capas de lutitas pardo-verdosas con espesores de hasta 0,5 m. Las calizas son principalmente wackstone y packstone (biomicritas), y en menor proporción grainstone con abundantes gasterópodos y fauna similar a la del Miembro Medio. En general presenta laminación ondulante y ocasionalmente estratificaciones cruzadas. El techo de este miembro está formado por limos pardo-amarillentos muy enriquecidos en glauconita que pasan a areniscas de grano fino hacia el techo, lo que supone un paso gradual a la siguiente formación, La Argañosa. Además, este Miembro Superior se caracteriza por una abundante karstificación (Fig. I.5, dcha.) que conlleva la abundancia de geodas tapizadas de calcita.

El techo del Miembro Superior es el que se ha descrito en los sondeos más profundos de los que se dispone en este trabajo, por lo que el contacto entre este y la Fm. La Argañosa será el horizonte más bajo que se representará en el modelo.



Figura 1.5 – Aspecto de campo del Miembro Medio de la Fm. San Lázaro (izq.). Estratotipo de los miembros Medio y Superior de esta formación en la ronda exterior de Oviedo, A-66 (dcha.), (tomada de González Fernández et al., 2004).

- **Fm. La Argañosa:** se trata de una formación detrítica que puede alcanzar los 40 m de espesor, aunque en algunas zonas de la cuenca este espesor puede bajar hasta los 30 m. Está compuesta por areniscas de grano fino a muy grueso con tonos blanquecinos y muy poco cementadas, entre las que se intercalan tramos de gravas silíceas en las que abundan los cantos de cuarzo anaranjados (Fig. 1.6). Además de estos niveles de gravas, también aparecen intercalados en las areniscas, niveles arcillosos que habitualmente presentan una coloración rosácea, aunque este color puede variar. Las micas son abundantes a lo largo de toda la unidad y son frecuentes los hilillos de materia orgánica. Por último, las areniscas pueden presentar laminación y estratificación cruzada.



Figura 1.6 – Aspecto de campo de la Fm. La Argañosa (izq.) y detalle de un nivel microconglomerático de dicha formación (dcha.). Ambas fotos están tomadas en la zona de Pin de la Quinta por G.M. Claverol.

Esta formación es la única sobre la que se ha realizado un estudio geotécnico exhaustivo, en el que se han revisado datos de multitud de prospecciones, ensayos mecánicos e hidrogeológicos in situ y resultados de ensayos de laboratorio (Pando, 2012). La recopilación de toda esta información permitió realizar una caracterización geotécnica general de la



formación, concluyendo que está constituida mayoritariamente por suelos arenosos (SC, SM y SP) y arcillosos (CL, ML, CH y MH), que pueden ser desde muy blandos a muy duros según el grado de compacidad y consistencia. Además de estos suelos, puntualmente pueden aparecer zonas constituidas por rocas blandas. Estas rocas blandas son areniscas calcáreas, formadas por la precipitación de cemento carbonatado entre los granos de las arenas. Estas zonas más competentes son más abundantes hacia el techo, en las zonas en las que la formación carbonatada suprayacente (Fm. Oviedo) aflora, lo que permite una mayor percolación de aguas meteóricas por las fisuras de esta y la llegada de gran cantidad de carbonato a las arenas, que son cementadas cuando este carbonato precipita.

- **Fm. Oviedo:** esta es una formación completamente carbonatada, constituida por calizas beige claro, que pueden presentar tonos más amarillentos por oxidación (Fig. 1.7). Son calizas ricas en fósiles, entre los que destacan las algas, foraminíferos, rudistas y otros bivalvos, briozoos, equinodermos y gasterópodos. Además de toda esta fauna, en estas calizas abunda la glauconita y son frecuentes las geodas. En la localidad tipo de esta formación se han podido dividir tres tramos:

- *Tramo Inferior:* calizas *grainstone* bioclásticas formadas por restos de algas, foraminíferos, moluscos, briozoos, ostrácodos y *Pithonella*; entre las que se intercalan calizas arenosas con estratificación cruzada tabular.
- *Tramo Medio:* calizas nodulosas masivas *wackstone-packstone* bioclásticas con cuarzo que, puntualmente, pueden adquirir tonalidades rosáceas por oxidación. Los bioclastos son principalmente foraminíferos, moluscos, ostrácodos y *Pithonella*. Hacia el techo abundan los rudistas, pudiendo aparecer en posición de vida.
- *Tramo Superior:* calizas *packstone* y *grainstone* formadas principalmente por algas, aunque también se encuentran moluscos y crinoideos, además de macrofauna de rudistas. Las facies *grainstone* pueden llegar a presentar estratificaciones cruzadas.

Una característica típica de esta formación es la importante karstificación que sufre desde el techo, la cual se evidencia por la presencia de grandes dolinas con hasta 10-15 m de diámetro, cuya presencia es especialmente importante en la zona este de la ciudad de Oviedo (Gutiérrez Claverol et al., 2004a). Además de esta karstificación, es habitual que las calizas aparezcan arenizadas por procesos de descalcificación, pudiendo llegar a ser confundidos los afloramientos de estas zonas descalcificadas con otras formaciones detríticas. Estos procesos de arenización son relevantes desde el punto de vista geotécnico ya que, dependiendo de la escala que alcancen (hasta 7 m de espesor en la zona este de Oviedo), pueden suponer un problema a la hora de planificar la cimentación de un edificio o de cualquier estructura (Gutiérrez Claverol et al., 2008).



Por último, la Fm. Oviedo presenta una buena continuidad lateral, pero la intensa karstificación descrita anteriormente, unida a una importante erosión que generó un paleorelieve bastante acusado y a la presencia de fallas, provocan importantes cambios laterales de espesor. Por ejemplo, en la zona del estadio Nuevo Carlos Tartiere (Oviedo) presenta un espesor mínimo de 5 m; en el casco urbano de Oviedo se han descrito hasta 25 m de esta formación y en Colloto (E de Oviedo) alcanza los 40 m; incluso en algunas zonas se observa que desaparece completamente y los depósitos del Paleógeno se disponen sobre la Fm. La Argañosa.



Figura 1.7 – Contacto entre la Fm. La Argañosa y la Fm. Oviedo en los taludes del Nuevo Carlos Tartiere. Se aprecia un cambio lateral de espesor en la Fm. Oviedo debido a una falla y una karstificación rellena de arenas (resultado de descalcificación) en el techo (tomada de González Fernández et al., 2004).

Antes de pasar a describir con mayor detalle los materiales paleógenos de la Cuenca de Oviedo, cabe pararse a analizar la superficie de contacto entre el techo del Cretácico y estos materiales. Tal y como observaron Martínez Álvarez y Torres Alonso (1968), el techo de las calizas de la Fm. Oviedo presenta irregularidades: un paleo-lapiaz ampliamente desarrollado, tinciones resultado de la alteración meteórica, cavidades kársticas colmatadas por depósitos arenosos y arcillosos, y los primeros depósitos paleógenos consisten en un conglomerado calcáreo que se dispone irregularmente y de manera localizada sobre las rocas cretácicas. Todo ello evidencia que se trata de un contacto disconforme. Teniendo en cuenta la edad de las calizas de la Fm. Oviedo (Turoniense) y la edad estimada para estos primeros depósitos paleógenos (Bartoniense), se puede asegurar que entre estas dos edades la cuenca cretácica fue exhumada y estuvo sometida a la erosión subaérea durante unos 50 M.a.

Julivert y Truyols (1969) realizaron múltiples observaciones en diversas excavaciones abiertas en la ciudad, que se encontraba en plena expansión. Aprovechando estas



observaciones levantaron columnas estratigráficas detalladas que consiguieron correlacionar a media escala (100-200 m), lo que les permitió realizar cortes geológicos detallados en el centro de la ciudad. Teniendo en cuenta todas sus observaciones, Julivert y Truyols llegaron a conclusiones más concretas sobre la discordancia entre el Cretácico y el Paleógeno en el subsuelo de Oviedo. Concluyeron que la discordancia es eminentemente disconforme, aunque puntualmente pueda apreciarse cierto ángulo entre los sedimentos de ambas edades. Por otro lado, demuestran claramente que los sedimentos del Paleógeno se depositaron sobre un suave paleorelieve que genera variaciones en su espesor, las cuales no son debidas a la presencia de fallas, y una variabilidad muy importante en los sedimentos basales del Paleógeno (Fig. 1.8); además de otras observaciones paleoambientales que no se detallarán en este trabajo.

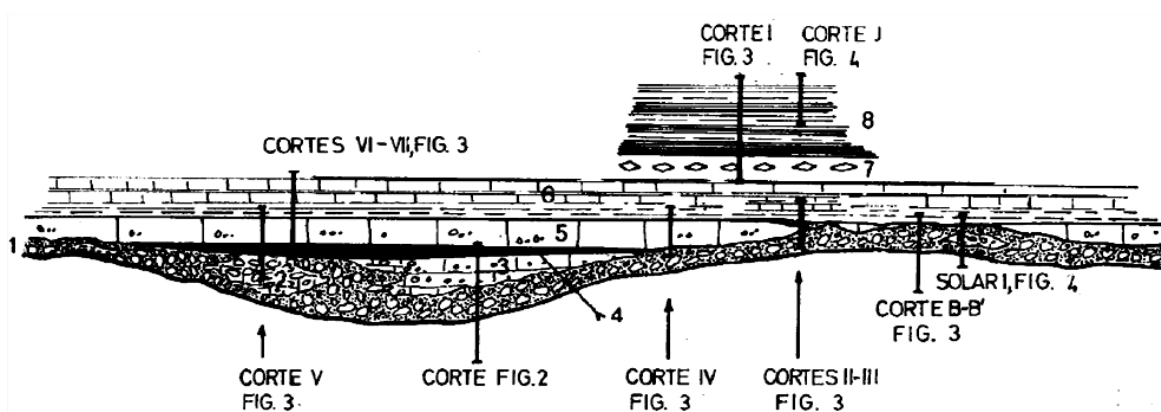


Figura 1.8 – Corte esquemático en el que se evidencia el carácter disconforme de este contacto y se aprecian los cambios de espesor y variabilidad lateral generados por el paleorelieve desarrollado en el techo del Cretácico (tomado de Julivert y Truyols, 1969).

PALEÓGENO

Uno de los estudios más detallados llevados a cabo sobre el Paleógeno de los alrededores de Oviedo fue el realizado por Truyols et al. (1991). Según estos autores los materiales paleógenos tienen una edad Bartonense (Eoceno Superior) y presentan un espesor variable que puede alcanzar los 175 m; estableciendo una subdivisión de tres conjuntos para estos materiales. Posteriormente, Gutiérrez Claverol y Torres Alonso (1995) abordan de nuevo el estudio de esta unidad y proponen una división muy similar, la cual se describe a continuación:

- *Conjunto Inferior*: como ya se explicó anteriormente, la base de este conjunto es disconforme sobre el Cretácico y las primeras capas consisten en conglomerados calcáreos de matriz arcillosa rojiza cuyo espesor varía lateralmente, debido a su disposición rellenando el paleorelieve mencionado anteriormente. Por encima de estos conglomerados, este conjunto inferior consta de 45-50 m de una sucesión heterogénea



formada por calizas margosas blancas (Fig. I.9, izq.) y rosadas, en capas decimétricas y de hasta 3 m, intercaladas con margas de colores variados (rosadas, verdes, grises, pardo-amarillentas o violetas), dentro de las cuales se encuentran algunos niveles de yesos. En estos niveles de yesos aparecieron los fósiles de mamíferos de Llamaquique, los cuales permitieron otorgar con seguridad a estos materiales la edad eocena y así, separarlos de los materiales cretácicos. Desde un punto de vista geotécnico, hay que tener en cuenta de forma especial la presencia de estos depósitos yesíferos, debido a su posible afección a las estructuras de hormigón (Pando et al., 2004). Aunque los yesos presentes en estas zonas aparecen en forma de cristales aislados dentro de las calizas, es necesario tener en cuenta su presencia por posibles lixiviaciones que provoquen afecciones al hormigón estructural.

- *Conjunto Intermedio*: su espesor es difícil de cuantificar, aunque se estima en unos 50 m, constituidos por margas y arcillas con arenas en menor proporción, todas ellas con tonalidades pardo-amarillentas y rojizas (Fig. I.9, dcha.). Puntualmente, aparecen cantos silíceos de pequeño tamaño y paleocanales de dirección N-S rellenos por arenas blancas.
- *Conjunto Superior*: su espesor estimado es de unos 75 m y está constituido por alternancias de arenas calcáreas beige y rosas con gradación normal y estratificación cruzada de media escala; margas o margas limo-arenosas rojizas o anaranjadas; conglomerados de cantos silíceos con cemento carbonatado; calizas blanquecinas con abundantes filamentos de algas; calizas margosas rosadas o pardo-amarillentas con textura nodulosa o brechoide y algunos niveles de caliche. Todas estas capas presentan escasa continuidad lateral debido a su carácter canaliforme, especialmente de los términos arenosos.

Debido a la escasa continuidad de las capas, ya citada por estos autores, las correlaciones a media o gran escala son complicadas, por otro lado, esta división no es aceptada por todos los autores y hay otras propuestas alternativas. Además, considerar estas divisiones haría el modelo demasiado complejo. Por todo ello, los materiales del Paleógeno serán considerados como un conjunto en este trabajo.



Figura 1.9 – Aspecto de campo de las calizas del conjunto inferior del Paleógeno (izq.) y talud en el que se observan las alternancias de margas y arcillas rojizas y pardo-amarillentas típicas del conjunto medio (dcha.).

RELLENOS ANTRÓPICOS

El estudio más completo y detallado realizado hasta el momento sobre los rellenos antrópicos en la ciudad de Oviedo fue el de Pando et al. (2016). En este estudio se tuvieron en cuenta 950 sondeos testificados, según los cuales, los rellenos antrópicos del casco urbano de Oviedo presentan un espesor medio de 1,9 m, con un máximo de 25 m. Además de esta cuantificación general, se modelizaron mediante SIG (Sistemas de Información Geográfica) cambios en la topografía urbana a lo largo del tiempo. En base a estos cambios topográficos, se localizaron zonas en las que se habían realizado movimientos de tierras, y se dividieron según fueran para la urbanización de zonas de expansión de la ciudad, debidos a alguna obra de ingeniería civil, resultado de actividades mineras y rellenos de escombrera (Fig. 1.10). Es importante conocer el origen de los rellenos ya que, en función del mismo, las propiedades geotécnicas varían. El citado trabajo realiza cuantificaciones de algunos rellenos puntuales a modo de ejemplo de la metodología a seguir. En este trabajo se tratará de identificar todos los rellenos presentes en la zona, dimensionarlos de forma precisa y, además, integrarlo con el resto de la geología de la zona.

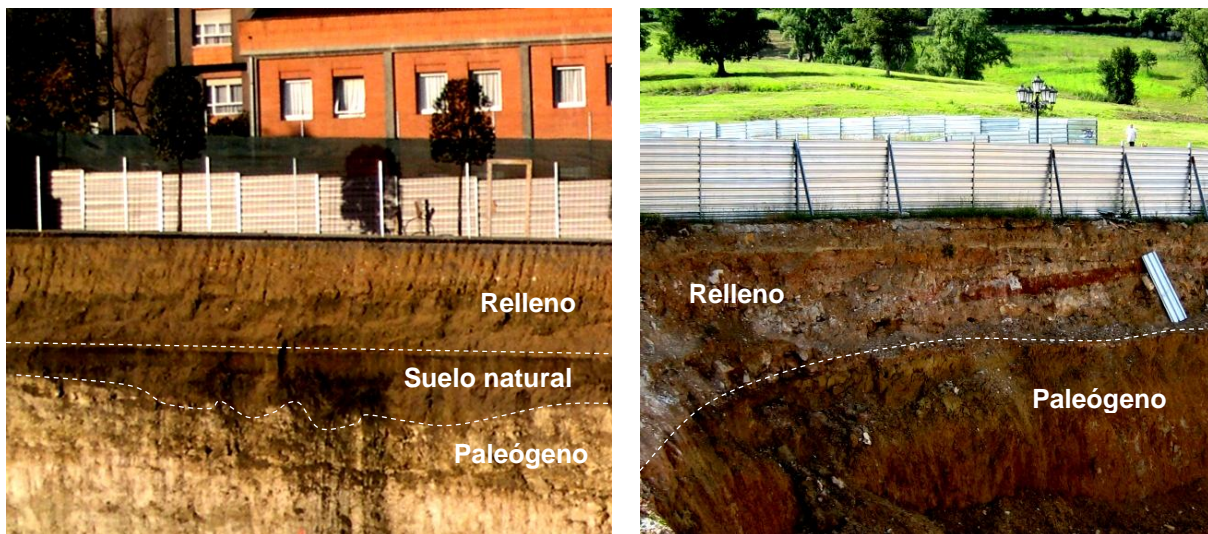


Figura I.10 – Ejemplos de rellenos antrópicos realizados durante las labores de urbanización: zona de Buenavista (izq.) y relleno de escombrera en la zona de Prados de la Fuente (dcha.).

I.3.3. Estructura

La cuenca de Oviedo es una cuenca extensional cretácica desarrollada sobre un basamento paleozoico intensamente plegado y fracturado. Posteriormente, durante el Paleógeno, la cuenca sufre un proceso de inversión tectónica relacionada con el periodo activo de la orogenia alpina en esta zona, lo que convirtió la cuenca extensional, en una pequeña cuenca de antepaís (Pulgar et al., 1999) (Fig. I.12). Esta inversión le da a la cuenca su disposición final, que consiste en un gran sinclinal abierto cuyo eje se dispone en dirección ENE-ONO hundiéndose hacia el ENE. El flanco sur de este sinclinal tiende a la horizontal, buzando siempre menos de 20° al norte, lo que genera una discordancia angular entre los materiales cretácicos y el basamento paleozoico subyacente; por otro lado, el flanco norte está verticalizado, presentado buzamientos fuertes hacia el sur. Por último, la superposición de diferentes etapas tectónicas hace que toda la sucesión cretácica y paleógena esté afectada por numerosas fallas verticales (Fig. I.4), las cuales se agrupan en varios sistemas atendiendo a su rumbo: NE-SO, NO-SE, NNO-SSE y E-O.

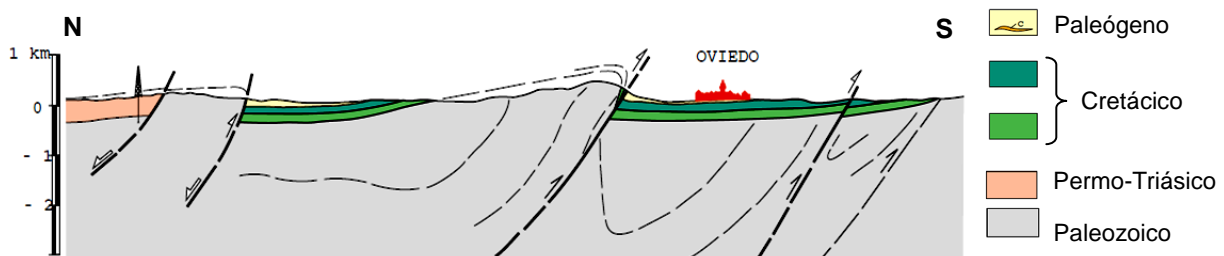


Figura I.12 – Corte geológico esquemático de la Cuenca de Oviedo (tomado de Pulgar et al., 1999).



I.3.4. Hidrogeología

En el subsuelo de Oviedo se diferencian varios niveles potencialmente acuíferos. El más superficial se encuentra en los rellenos antrópicos y sedimentos cuaternarios cuando estos están saturados (Gutiérrez Claverol y Pando, 2008), constituyendo siempre un acuífero libre. En la zona implicada en este trabajo la presencia de depósitos aluviales cuaternarios es muy escasa, por lo que este nivel se reduciría a los rellenos antrópicos. Por debajo de este, aparece la sucesión paleógena, que constituye un nivel de muy baja permeabilidad en general, independizando este acuífero superficial del acuífero que forman los materiales cretácicos (Pendás Fernández y González Fernández, 2003). Este acuífero cretácico está constituido por el miembro superior de la Fm. San Lázaro, la Fm. La Argañosa, la Fm. Oviedo y los conglomerados calcáreos de la base del Paleógeno. El miembro superior de la Fm. San Lázaro constituye un acuífero por karstificación y fisuración; la Fm. La Argañosa es un acuífero poroso multicapa, compartimentado por la alternancia de niveles muy arcillosos que actúan como acuitardos, y los niveles arenosos que actúan como acuíferos; por último, la Fm. Oviedo constituye un acuífero por karstificación y fisuración (Fig. I.13, izq.), al igual que los conglomerados basales del Paleógeno (González Fernández et al., 2005). Además, estas tres formaciones cretácicas pueden estar conectadas por fallas con el nivel yesífero del miembro inferior del Paleógeno, pudiendo constituir este, eventualmente, un nivel acuífero con alta transmisividad cuando llegan a él aguas del acuífero cretácico que provocan su karstificación (Fig. I.13, dcha.). Este acuífero inferior puede aparecer como libre en las zonas donde aflora la sucesión cretácica, o como confinado cuando está cubierto por el Paleógeno.

Esta configuración del subsuelo de la ciudad, con varios niveles acuíferos y uno de ellos multicapa, hace necesaria una buena caracterización hidrogeológica, especialmente en las zonas en las que los niveles yesíferos están conectados con el acuífero cretácico. Esta configuración hidrogeológica hace que no solo sea importante conocer la presencia de agua, sino que es importante conocer las conexiones entre los yesos y el acuífero inferior, ya que esto puede suponer la karstificación del nivel yesífero y los consiguientes problemas de subsidencias, además de la aparición de aguas sulfurosas que pueden afectar al hormigón (Gutiérrez Claverol et al., 2004b; Pando et al., 2013).

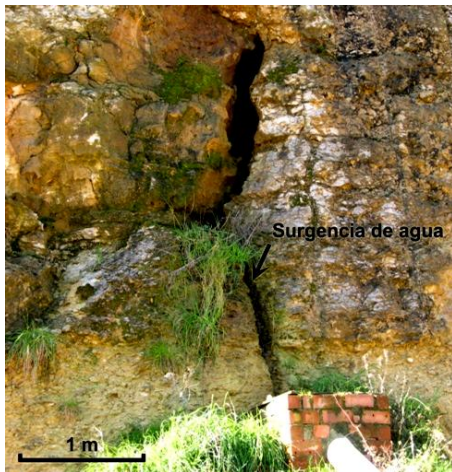


Figura I.13 – Surgencia a través de una fisura en las calizas de la Fm. Oviedo (izq.), y excavación anegada al alcanzar el nivel piezométrico dentro del Paleógeno, ejemplo de la comunicación entre el acuífero cretácico y los niveles yesíferos del Paleógeno (dcha.). Ambas imágenes fueron tomadas por M.G. Claverol.



I.4. Objetivos

Los principales objetivos de este trabajo son:

- Abordar el aprovechamiento de datos geológicos recopilados en un banco de datos implementado en un Sistema de Información Geográfica. Se trata concretamente de la base de datos desarrollada previamente para la ciudad de Oviedo, generada en su mayor parte con información procedente de estudios geotécnicos (prospecciones, resultados de pruebas de campo y ensayos de laboratorio, etc.) así como observaciones in situ distribuidas por el área urbana.
- Investigar la utilidad de diversos procedimientos de interpolación para la modelización de superficies geológicas en una zona urbana. Se busca comparar sus ventajas e inconvenientes, a fin de seleccionar el procedimiento y parámetros de configuración más adecuados en cada caso para obtener, mediante análisis espacial, contactos entre unidades en profundidad a partir de datos puntuales.
- Realizar aportaciones específicas al conocimiento geológico sobre el centro urbano de Oviedo. En concreto se pretende: a) mejorar la cartografía geológica de superficie; b) estudiar la geometría de las unidades del subsuelo, tanto la profundidad a que se encuentran como su espesor; c) investigar el paleorrelieve excavado en el techo de la sucesión cretácica; d) investigar el trazado de potenciales fallas.
- Integrar los resultados de la investigación en un entorno tridimensional que facilite su interpretación y visualización. Para ello se recreará la superficie topográfica y elementos tanto subaéreos (edificaciones) como subterráneos (túneles y grandes excavaciones) del centro urbano.



II. METODOLOGÍA

II.1. Obtención de datos

El proceso de obtención de datos es la base de cualquier trabajo. En este caso es necesario obtener información geográfica y geológica lo más detallada y actualizada posible, para así, conseguir un modelo preciso y ajustado a la configuración topográfica y urbanística actual de la zona. Además, en este trabajo se han tomado datos fuera de la zona de estudio, es decir, se ha trabajado con una zona ampliada, la cual se extiende, en todas direcciones, 100 m más que la zona descrita anteriormente. La información geográfica incluye todos los recursos cartográficos necesarios, y puede obtenerse sin coste en servicios como el portal de descargas del Instituto Geográfico Nacional, el equivalente del Principado de Asturias o a través del Ayuntamiento de Oviedo

La información geológica se obtiene, en primer lugar, a través de la bibliografía existente. Se utilizan todas las publicaciones anteriores que involucren a la zona de estudio y que contribuyan a su descripción geológica y geotécnica. De estas publicaciones se obtienen todos los datos básicos y que dan una idea general de la geología de la zona. La siguiente fuente de información a la que se acude, es a informes geológico-geotécnicos realizados por las administraciones públicas o por empresas privadas dentro del área a estudiar, en los que se recogen datos de sondeos y de otras testificaciones. Estos informes aportarán información inédita, permitiendo aumentar la exactitud de los mapas obtenidos respecto a trabajos anteriores y, además, proporcionan datos en profundidad, lo que permite la realización de un modelo 3D. Estos datos de campañas geológico-geotécnicas son cedidos, desinteresadamente, por las administraciones públicas y por empresas privadas para su uso con fines puramente investigadores o académicos. Además de la recopilación de informes geotécnicos, una fuente de información muy importante son las observaciones en superficie. Al tratarse de una zona urbana completamente edificada, estas son difíciles de realizar, siendo necesario aprovechar la apertura de excavaciones para la rehabilitación o reconstrucción de algún edificio o para la construcción de aparcamientos subterráneos, e incluso las zanjas abiertas en las calles para reparación de conducciones.



II.2. Base de datos

II.2.1. Recursos cartográficos

En este trabajo, debido a su ubicación en una zona urbana importante, se dispone de gran cantidad de información geográfica. En las páginas webs de las instituciones mencionadas anteriormente pueden obtenerse imágenes aéreas y planos de la ciudad, tanto recientes como históricos y, además, datos topográficos de diferentes fechas y a diferentes escalas, todos ellos georreferenciados. En este trabajo se han utilizado las ortofotos del PNOA (Plan Nacional de Ortofotografía Aérea) del año 2009. Además, para el plano de la zona, se han utilizado los datos recogidos en los archivos DGN del Principado de Asturias (1:5.000) (Fig. II.1), ya que son los más actuales y en ellos aparecen representadas calles, edificios, instalaciones deportivas, carreteras, ferrocarriles, puntos de agua e incluso árboles. En cuanto a los datos topográficos se dispone de tres fuentes de información: puntos acotados del Ayuntamiento de Oviedo (1:1.000) (1997), puntos acotados y curvas de nivel del Principado de Asturias (1:5.000) (1999) y nube de puntos topográficos LIDAR (Laser Imaging Detection and Ranging) recogidos dentro del plan PNOA-LIDAR (2012), con una precisión altimétrica de 20 cm. Todos estos datos requieren un tratamiento. En el caso de los datos recogidos en los archivos DGN, requieren un tratamiento para hacer su visualización más sencilla; mientras que los datos topográficos, al disponer de varias fuentes de información, se debe elegir una de ellas para, posteriormente, llevar a cabo un tratamiento de la misma y que sea lo más precisa posible (los tratamientos de todos los datos y los criterios de selección para los datos topográficos se describen en el apartado II.3).

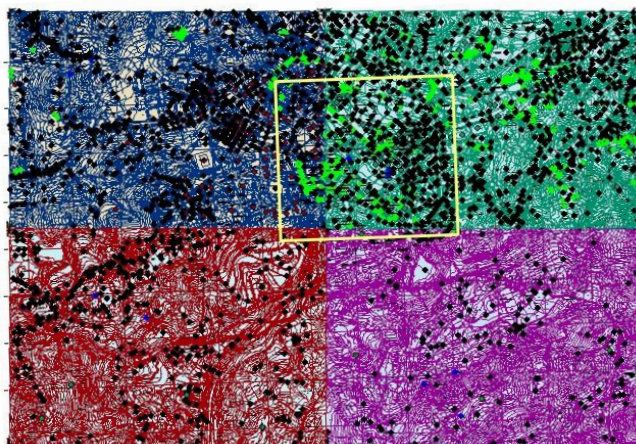


Figura II.1 – Archivos DGN del Principado de Asturias (1999) (1:5.000) en bruto.



II.2.2. Información geológica

La recogida de información geológica comienza con la revisión bibliográfica en busca de las descripciones más detalladas y más recientes de la geología de la zona y con la recopilación de los diferentes mapas geológicos realizados hasta la fecha para tomar el más reciente y más preciso como referencia para el modelo a realizar. Tras llevar a cabo esta revisión, se seleccionan las publicaciones más relevantes y útiles a la hora de proporcionar una visión detallada de la geología de la zona. En este caso, estas publicaciones son las referenciadas en el apartado I.2. Mientras que, en cuanto a los mapas, se toman el más moderno y el más preciso como referencias, en este caso son, el realizado por el IGME dentro del PLAN GEODE (2004) (Fig. I.4) y el realizado por Gutiérrez Claverol y Torres Alonso (1995), respectivamente.

En cuanto a la información recogida en informes geológico-geotécnicos, una vez ha sido ordenada y clasificada, debe implementarse en una base de datos digital. En este caso, los datos estaban recogidos en una base de datos construida con un Sistema de Información Geográfica. Esta base de datos fue creada previamente por el Dr. Luis Pando, quien durante la realización de su tesis doctoral acumuló gran cantidad de información geológica y geotécnica sobre la ciudad de Oviedo y, posteriormente, procedió a su digitalización y análisis (Pando et al., 2014). En concreto, para la zona estudiada en este Trabajo Fin de Máster esta información incluye 505 sondeos testificados y 445 observaciones en superficie. La información contenida en esta base de datos consta, en el caso de los sondeos, de: coordenadas exactas (X, Y, Z), profundidad total y espesor identificado de cada unidad; por otro lado, en las observaciones superficiales se detalla la unidad aflorante y en algunas de ellas se dispone de una pequeña descripción del afloramiento con espesores de los materiales diferenciados. Durante la realización de este trabajo se añadieron a esta base de datos 2 informes geológicos en los que se incluyen 2 sondeos testificados y 2 nuevas observaciones superficiales (Fig. II.2). Esto hace que el total de sondeos utilizados representen 7.352,35 m de subsuelo testificado.

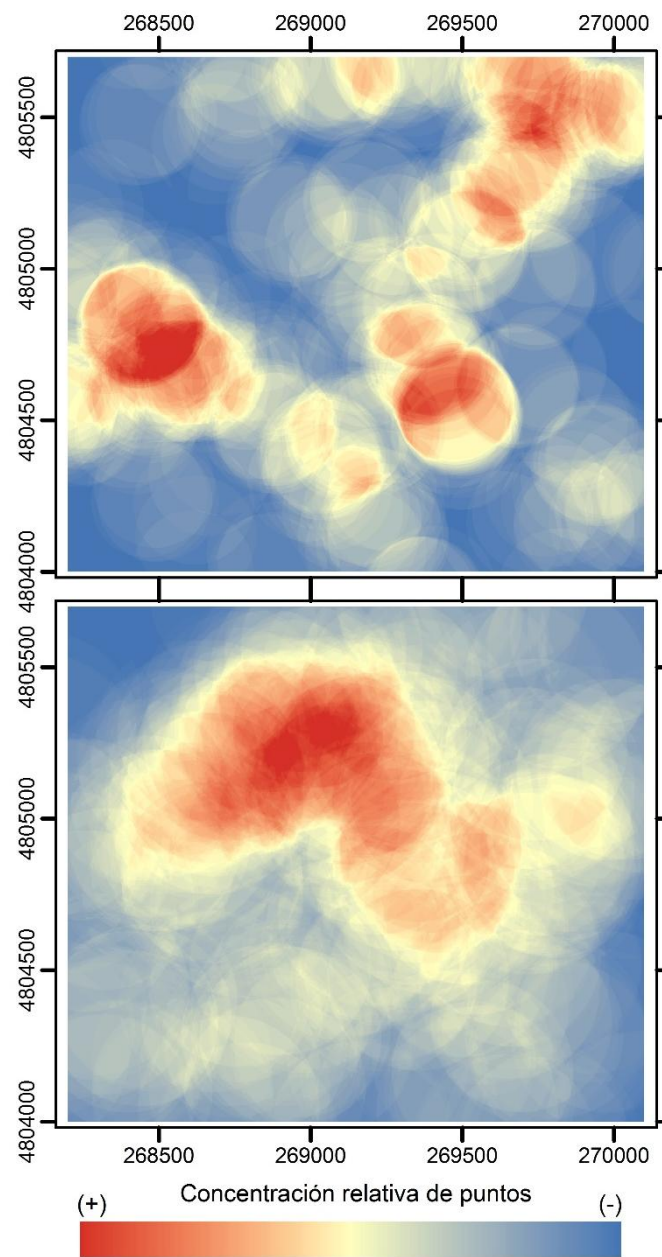


Figura II.2 – Mapas de concentración de: sondeos (arriba) y observaciones superficiales (abajo).



II.3. Tratamiento de datos

El tratamiento de los datos se realizó mediante un SIG (Sistema de Información Geográfica), en este caso el programa ArcGIS de ESRI. Este programa permite la representación de información geográfica y geológica, georreferenciada, de manera clara y ordenada. Una vez que todos los datos detallados en el apartado anterior son representados digitalmente, se llevan a cabo determinados procedimientos que facilitan su visualización y consulta (véase II.3.1), permitiendo seleccionar los datos más útiles, mejorar su visualización y eliminar posibles errores o información innecesaria.

II.3.1. Consulta y selección de Información

II.3.1.1. Información geográfica

El primer procedimiento, y más sencillo, para la representación de la información geográfica disponible, fue la obtención de la ortofoto de la zona, basada en las fotografías aéreas del PNOA del año 2009. Esto requirió un pequeño proceso de tratamiento de imágenes, ya que, en las ortofotos originales disponibles en la página web del Principado de Asturias, la zona de estudio aparece dividida en dos; el sector occidental pertenece a la hoja 28 y el sector oriental a la hoja 29. Por lo tanto, fue necesario fusionar ambas imágenes y, posteriormente, recortar la parte de la foto que ocupa la zona de trabajo. Este proceso de fusión y recorte permite trabajar con una ortofoto que incluye, únicamente, la zona de trabajo, evitando información innecesaria. Una vez obtenida la ortofoto, se procede a la clasificación de la información contenida en los archivos DGN (1:5.000) obtenidos del servicio cartográfico del Principado de Asturias. El primer paso en el tratamiento estos archivos es igual al llevado a cabo para la ortofoto. Los archivos CAD (1:5.000) originales del Principado están divididos en hojas de 28x18 km, quedando la zona de estudio repartida en cuatro de ellas (28, 29, 52 y 53). Al igual que en el caso de la ortofoto, se deben fusionar las cuatro hojas y recortar el área ocupada por la zona de estudio, con el mismo objetivo que antes, reducir el volumen de información contenido en la base de datos. Como ya se ha explicado en el apartado II.2.1, estos archivos contienen una gran cantidad de información geográfica, cuya visualización en bruto es muy caótica. Para mejorar esto, se procedió a la extracción de los datos, a su clasificación y agrupación en categorías (carreteras, edificios, curvas de nivel, etc.) y a su representación de una forma mucho más clara mediante la asignación de una simbología propia para cada categoría (Fig. II.3).

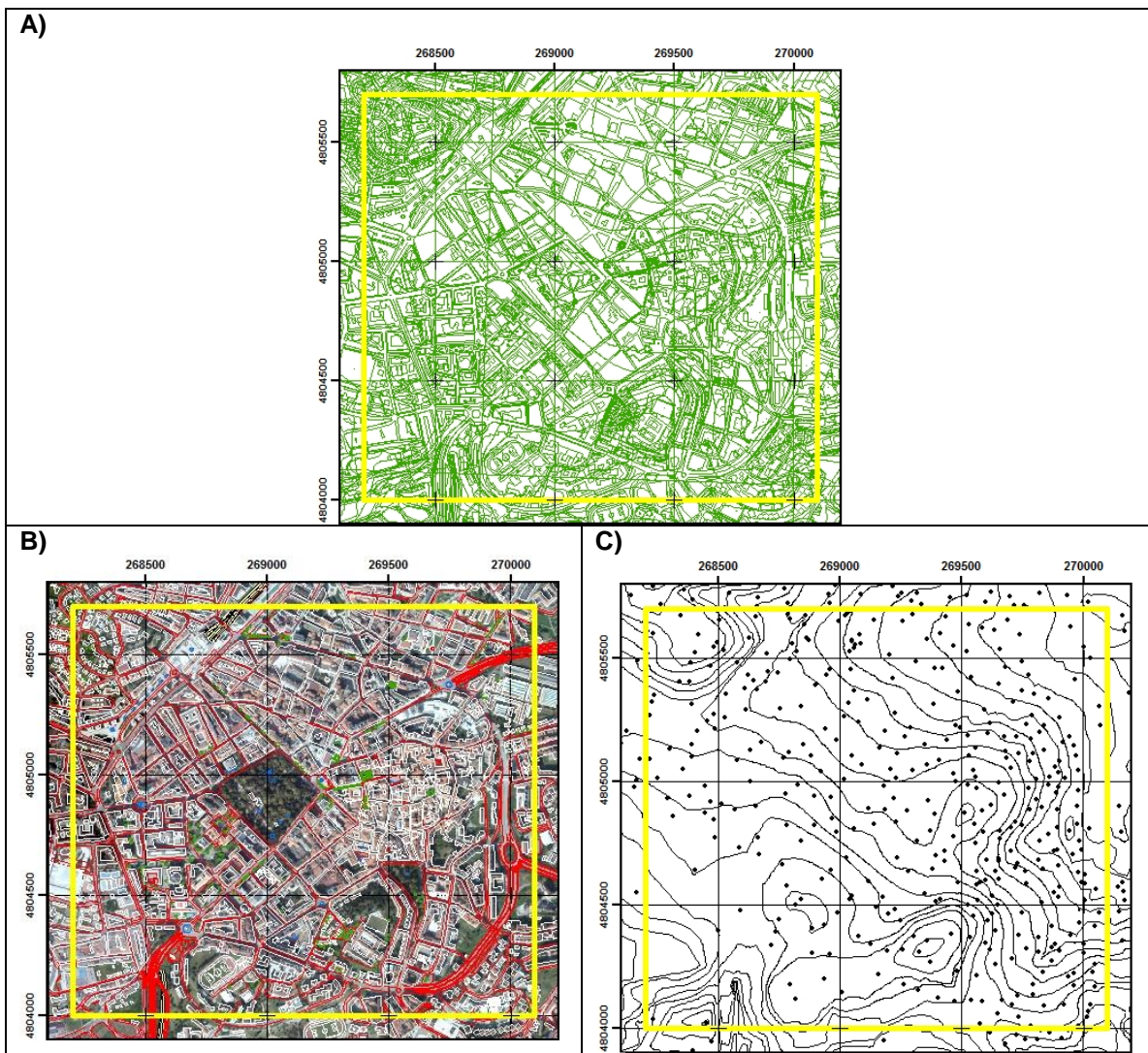


Figura II.3 – Procedimiento para el tratamiento de los archivos DGN: A) aspecto de las cuatro hojas una vez fusionadas y recortadas (ver Fig. II.1); B) plano de la zona de estudio obtenido después de clasificar la información y superimponerla a la ortofoto; C) datos topográficos extraídos de los archivos DGN.

Esta información contenida en los archivos CAD se encuentra en forma de líneas. Para poder utilizar esta información en la elaboración de un modelo 3D de la ciudad (Fig. II.4), en el que se incluyan los edificios y otras estructuras con sus respectivas alturas, es necesario convertir estos archivos de líneas en archivos de polígonos, los cuales se pueden visualizar en 3D en el módulo ArcScene que integra ArcGIS. El paso de un archivo de líneas a uno de polígonos es sencillo, pero en este caso presentó bastantes problemas debido a que muchos de los polígonos obtenidos de las líneas originales no estaban bien delimitados o se encontraban desplazados respecto a la posición real de los edificios. Esto supuso la necesidad de una revisión exhaustiva de las líneas hasta asegurarse de su correcta delimitación y ubicación. Para asegurar una mayor precisión en la ubicación de los edificios



se recurrió a la web del catastro a través de su servicio de mapas WMS de acceso remoto; en él se encuentran perfectamente delimitados los edificios y todos los elementos que componen el casco urbano. Para dotar al modelo de mayor realismo se delimitaron los patios interiores y se estableció una simbología diferente según el uso de cada edificio (privado, público, educativo, centro comercial, etc.). Una vez que se obtuvieron todos los polígonos de los edificios, se procedió a delimitar los polígonos de las zonas verdes, zonas peatonales y fuentes basándose en las líneas contenidas en los DGNs y recurriendo, también, a los datos del catastro para asegurar su representatividad. Por último, los espacios que aún estaban libres fueron asignados a las calles. La elaboración de la losa requirió un tratamiento por separado que permitiera su correcta visualización en 3D, generando un polígono que representara la superficie de la misma, con sus zonas peatonales, sus zonas verdes y sus jardines y unos límites que cierren el espacio lateralmente, dejando las vías ocultas en el interior. Todo este procedimiento de elaboración del modelo del casco urbano se llevó a cabo mediante la generación y resta de polígonos. A estos polígonos obtenidos en base a las líneas recogidas en los archivos DGN, se les añadieron polígonos que representan las principales excavaciones subterráneas presentes en la zona, mayoritariamente vinculadas a aparcamiento subterráneos. Por último, se añadieron las líneas de ferrocarril presentes en la zona; la principal es la línea de RENFE bajo la losa de la Estación del Norte y todo su trazado hacia el este y hacia el sur, incluyendo el túnel del Fresno, también se representa la línea de FEVE que se dirige hacia el oeste desde la Estación del Norte y el antiguo túnel de FEVE que pasa bajo la Ronda Sur (ver III.1).

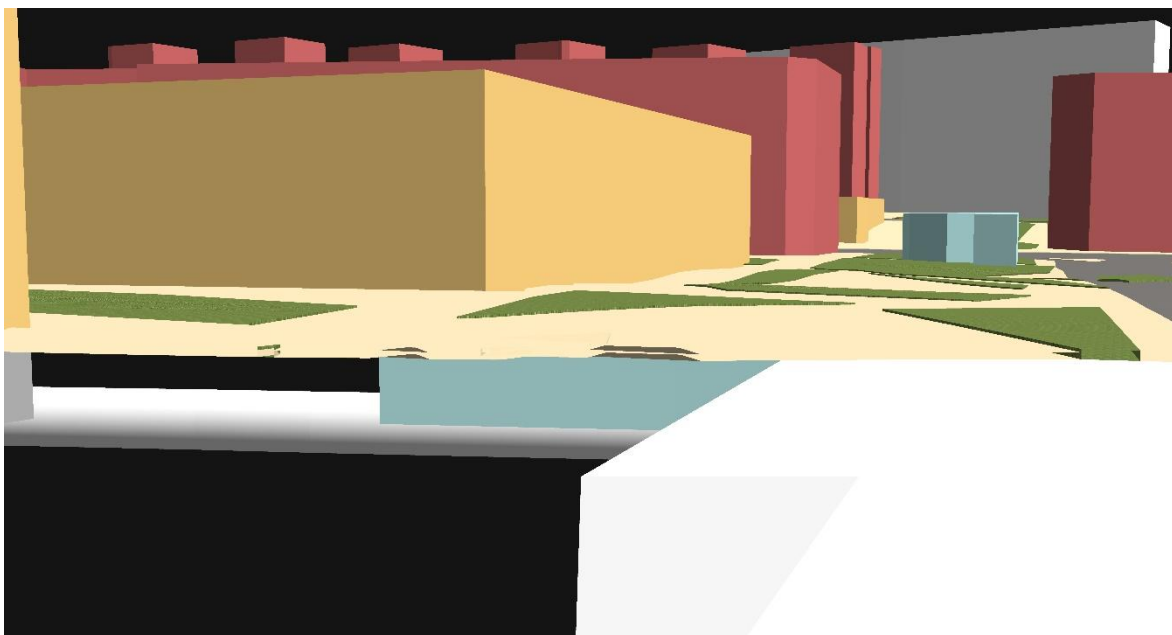


Figura II.4 – Ejemplo del resultado obtenido tras todo este proceso, con estructuras representadas en 3D tanto sobre la superficie como bajo ella.



Por último, se obtuvo la información geográfica del plan PNOA-LIDAR de 2012. Esta se encuentra disponible en la web del IGN (Instituto Geográfico Nacional) dividida en hojas de 2x2 km, cada una de las cuales se puede descargar como un archivo en formato LAZ, en los que se recoge la nube de puntos LIDAR al completo. Estos archivos LAZ fueron descomprimidos mediante el programa gratuito *LASTask Tools (ADB Software)* y convertidos en archivos de formato LAS, los cuales pueden ser tratados mediante *ArcGIS*. La información de estos archivos LAS está clasificada en categorías en función de la ubicación de los puntos tomados por el láser, separándola en puntos tomados sobre el terreno, sobre vegetación o sobre edificios. Gracias a esta clasificación se pueden filtrar los datos; como en este caso se busca la generación de un MDE de la superficie topográfica, se eliminan todos los puntos que no hayan sido tomados sobre el terreno. Una vez que la información ha sido filtrada, es necesario generar un TIN, para pasar de tener una nube de puntos a una superficie continua. La zona de estudio incluye partes de cuatro de estas hojas, por lo que todo este proceso hubo que realizarlo cuatro veces, dado el gran número de puntos incluidos en cada hoja (entre tres y cinco millones) y la enorme capacidad de procesado que exigía hacerlo con todas las hojas simultáneamente. El resultado fueron cuatro archivos TIN en los que sólo se tienen en cuenta los puntos tomados en el terreno. Los TIN obtenidos deben ser cortados y fusionados. El proceso de recorte de los TIN fue sencillo, pero necesario para disminuir el volumen de información que será tratada durante la fusión de las cuatro hojas. Para fusionar estas cuatro partes ya recortadas, se tuvieron que obtener los nodos de cada una de ellas y, posteriormente, generar un nuevo y único TIN que incluyera los nodos de las cuatro; así la zona pasó a estar incluida en un único TIN (Fig. II.5). Una vez que se obtuvo el TIN de la zona de estudio se generó un MDE ráster a partir de él.

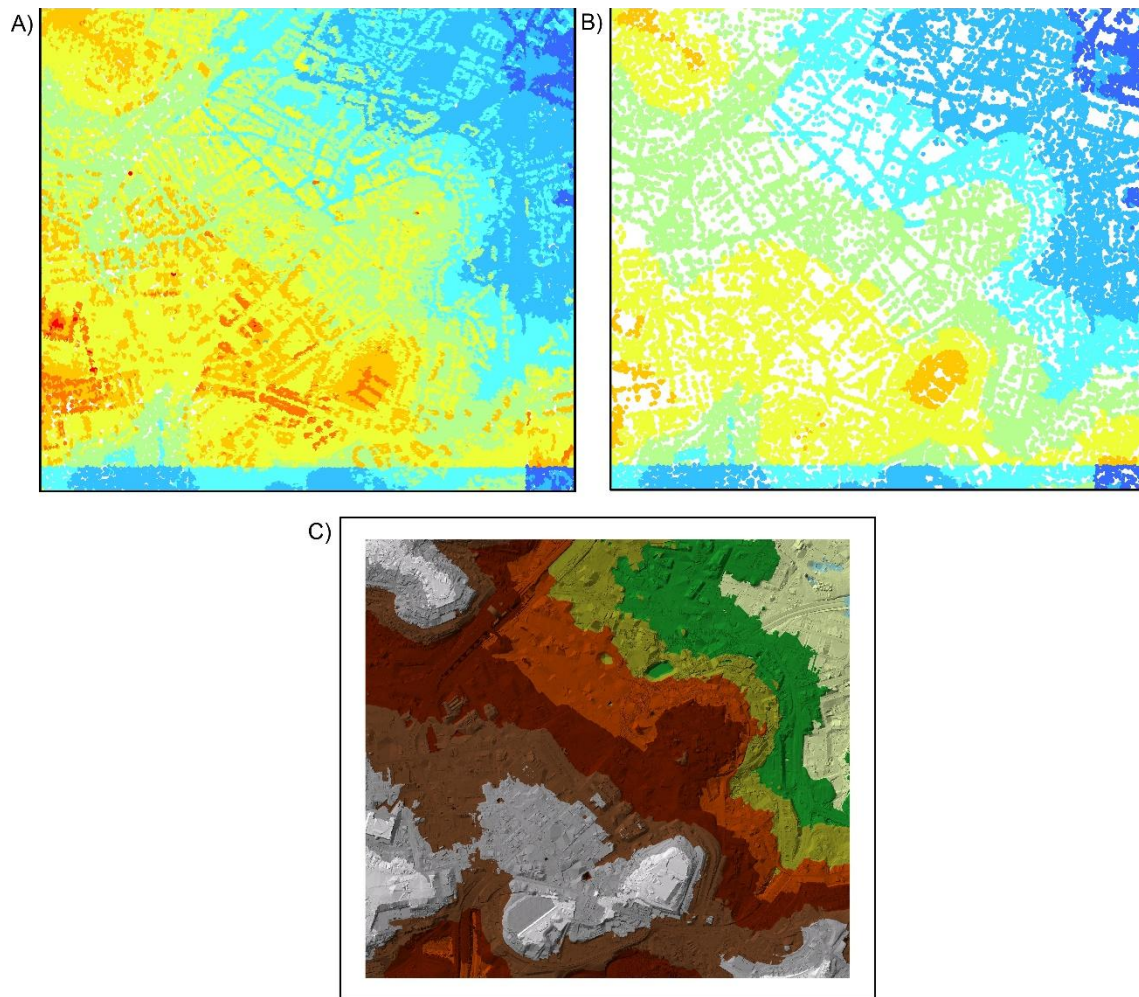


Figura II.5 – Proceso de tratamiento de los archivos LAZ del plan PNOA-LIDAR (2012): A) Nube de puntos LIDAR contenida en las cuatro hojas incluidas en la zona de estudio; B) archivos LIDAR filtrados y C) TIN obtenido a partir de los puntos LIDAR filtrados.

II.3.1.2. Información geológica

En cuanto al tratamiento de la información geológica, el primer paso consistió en su revisión en busca de fallos en las testificaciones o sondeos a los que les falte alguno de los datos básicos. En este proceso se encontraron cinco sondeos, en el entorno de Llamaquique, de los cuales se desconocía la cota a la que se habían realizado. Para asignarles un valor lo más preciso posible, se recurrió a la cartografía topográfica 1:1.000 del Ayuntamiento; teniendo en cuenta los puntos acotados en las calles que rodean la parcela del centro comercial, los planos de la obra en los que se sitúan los sondeos y se detallan las zonas excavadas, y las testificaciones, que permiten saber cuántos metros de profundidad tenía la excavación; así se les asignan cotas a cada uno de los sondeos con la máxima precisión posible. En cuanto a las testificaciones, no se observó ningún fallo, por lo que las testificaciones disponibles se dieron por válidas.



Tras revisar toda la información disponible se procedió a la adición de los nuevos datos. En este caso durante la realización de este trabajo se recopilieron dos nuevos sondeos, procedentes ambos de informes geotécnicos privados y confidenciales, y observaciones superficiales realizadas en dos excavaciones activas en las calles Cervantes y Matemático Pedrayes (Fig. II.6). Además de estas observaciones directas en excavaciones se añadieron a la base de datos 12 nuevos puntos en los que se identifica la base de los materiales paleógenos; estos puntos provienen del estudio bibliográfico de antecedentes, concretamente de la publicación de Julivert y Truyols (1969).



Figura II.6 – Imágenes de excavaciones activas incorporadas a la base de datos.

Una vez finalizadas las tareas anteriores, se decidió comprobar la consistencia altimétrica de las prospecciones respecto al MDE generado para la zona de estudio. Para ello se restaron las cotas de los sondeos y la topografía generada anteriormente. De esta manera se pretendía detectar posibles errores en las cotas de los sondeos y, también si es el caso, identificar zonas en las que se han podido producir movimientos de tierras con rellenos o excavaciones. Este desfase entre los sondeos y la superficie topográfica calculada es importante ya que si se han producido dichas modificaciones los afloramientos pueden diferir, y también los espesores de la primera unidad cortada por el sondeo pueden sufrir variaciones.

El siguiente paso en el tratamiento de la información geológica, consistió en clasificar los sondeos y observaciones disponibles en función de la formación aflorante; así se obtiene un mapa de puntos de reconocimiento en superficie, el cual se utilizará para realizar un primer mapa de afloramientos (Fig. II.7). Una vez clasificados los datos en superficie se procede a su clasificación en profundidad, esto consiste en agrupar los sondeos y observaciones en los que se haya identificado un contacto geológico en profundidad. En los sondeos se dispone



de una cota de sondeo y de la testificación del mismo, por lo que, para obtener la cota a la que se encuentran los contactos, es necesario restar los metros cortados de las formaciones suprayacentes al contacto. A estos puntos obtenidos directamente de las observaciones y de las testificaciones de sondeos se les llamarán puntos exactos, y serán los utilizados en un primer momento para la interpolación de las superficies (Fig. II.8).

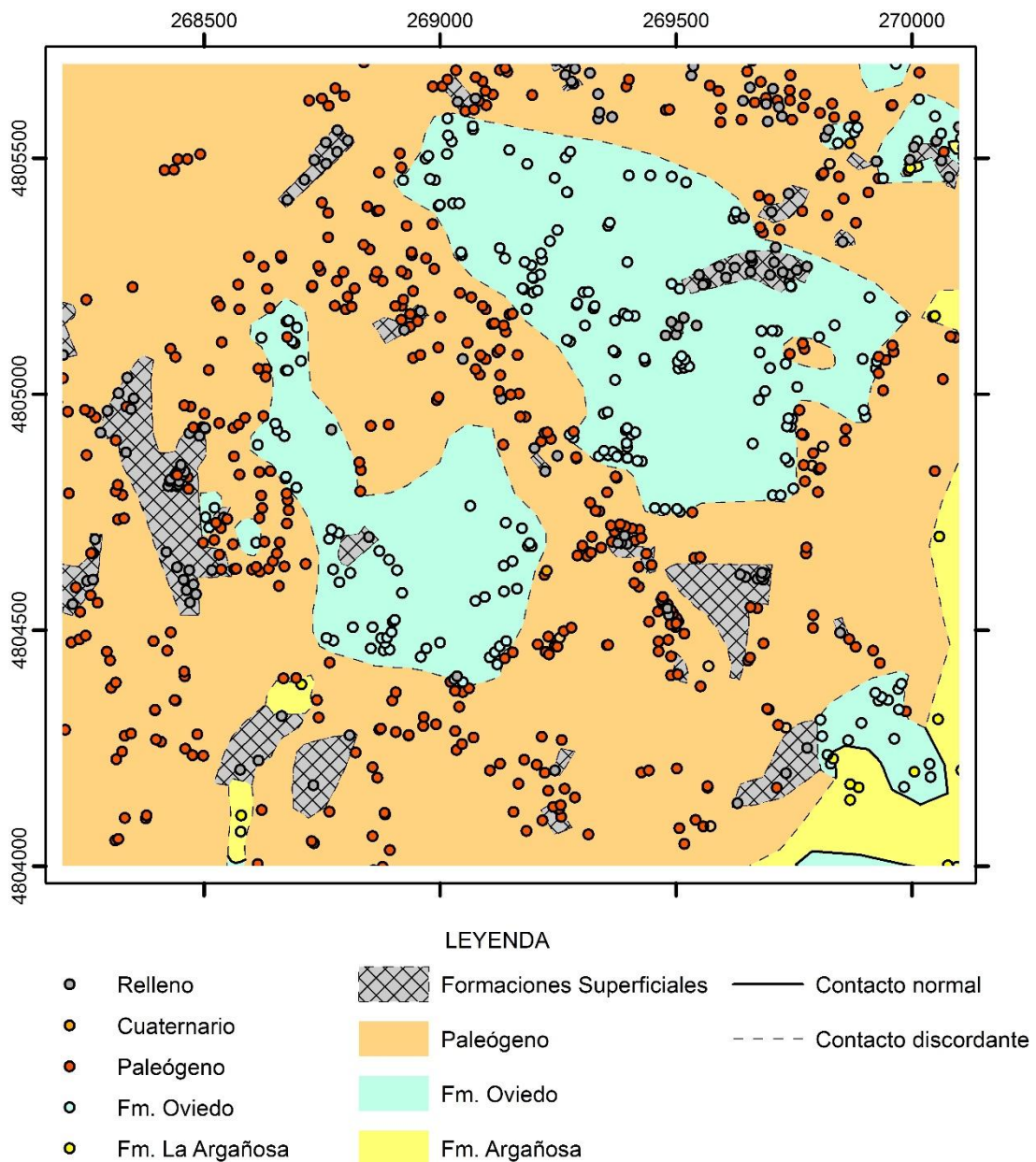


Figura II.7 – Puntos de reconocimiento en superficie y afloramientos definidos en base a ellos.

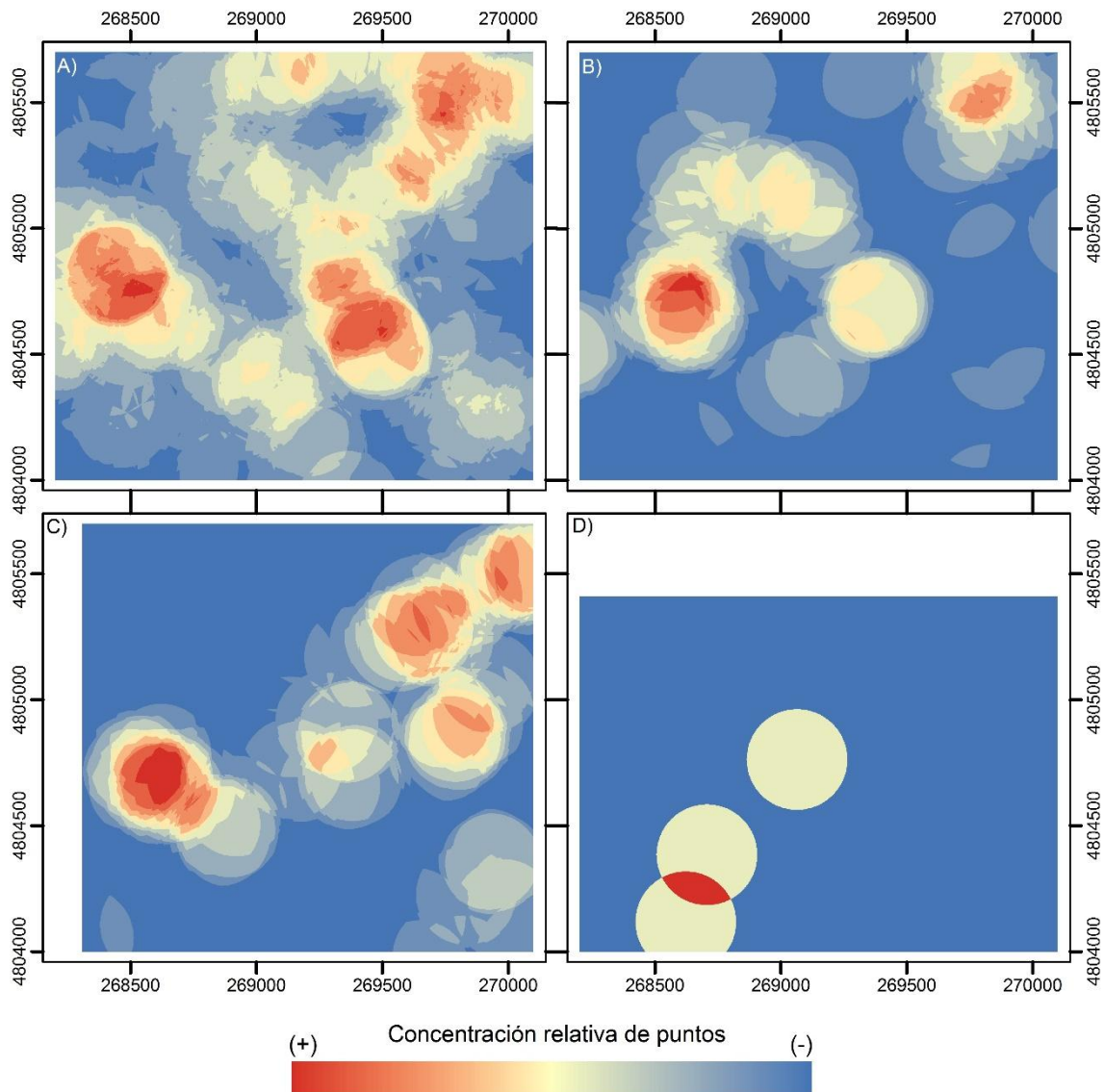


Figura II.8 – Densidad de puntos exactos obtenidos para cada superficie. A) Base de las formaciones superficiales; B) base del Paleógeno; C) muro de la Fm. Oviedo; D) muro de la Fm. La Argañosa.

Una vez obtenidos estos puntos exactos, y en vista de su escasez y distribución irregular (excepto en el caso de las formaciones superficiales), se procedió a la obtención de nuevos puntos que ayudaran a afinar la interpolación. Estos nuevos puntos son puntos interpretados tanto en superficie como en profundidad. Los puntos interpretados en superficie se corresponden con los contactos interpretados previamente (Fig. II.7), mientras que los puntos interpretados en profundidad se basan en la realización de perfiles geológicos 3D cuya traza corta a los sondeos más profundos pasando por las zonas con mayor acumulación de datos; una vez que se interpretaron estos perfiles en 3D fue necesario convertir estas líneas en puntos para así poder utilizarlos en la interpolación. Con todos estos puntos, exactos e interpretados (Fig. II.9), se realizó una primera interpolación,



durante la cual se lleva a cabo la comparación entre los diferentes mecanismos de interpolación; esto se explicará en el apartado II.3.2.

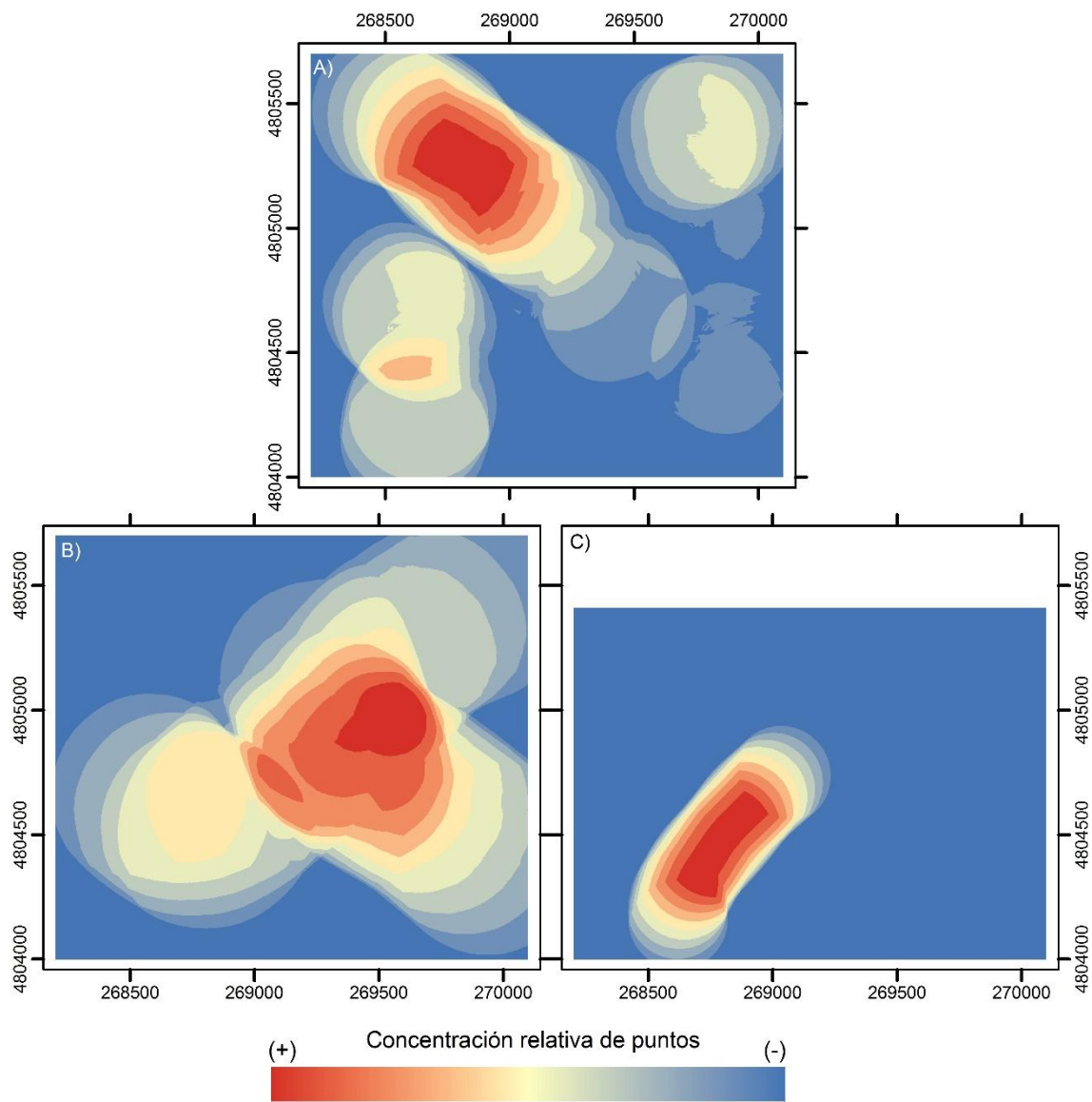


Figura II.9 – Densidad de puntos exactos e interpretados: A) base del Paleógeno; B) muro de la Fm. Oviedo; C) muro de la Fm. La Argañosa.



II.3.2. Mecanismos de Interpolación

Para la interpolación de los datos geológicos disponibles se ha utilizado el software SIG anteriormente citado, el cual dispone, en la versión utilizada, de ocho métodos de interpolación principales. Estos se pueden agrupar de la siguiente manera (Fig. II.10).

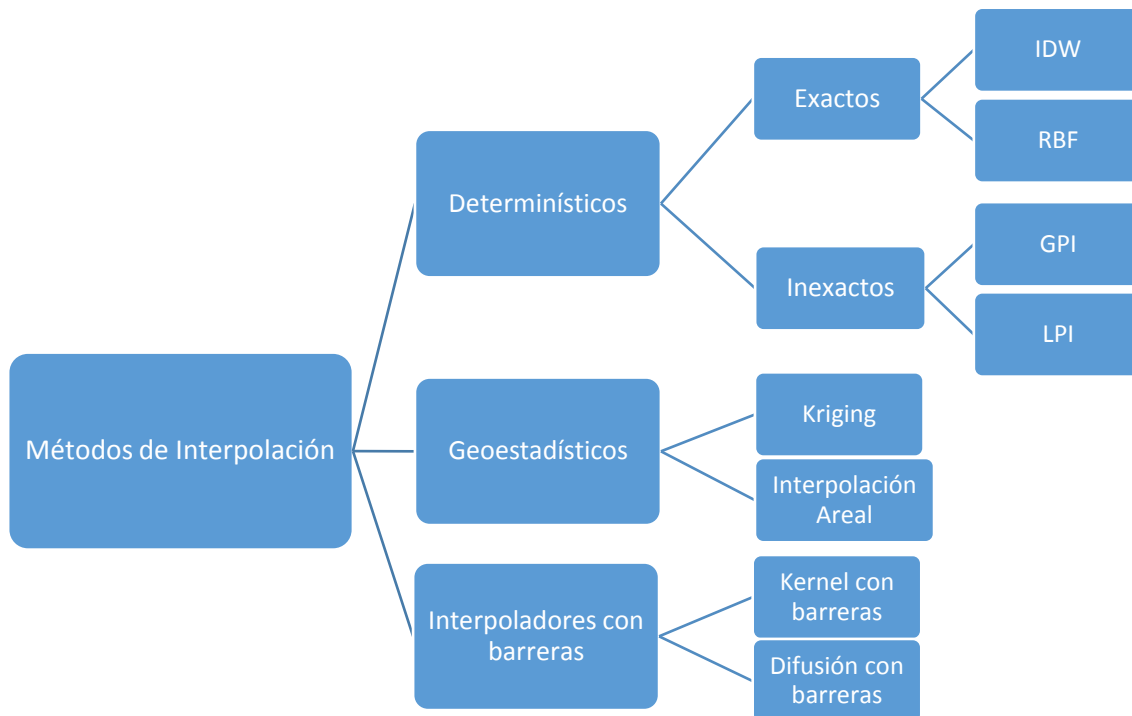


Figura II.10 – Clasificación de los métodos de interpolación disponibles en la versión utilizada de ArcGIS.

Previamente a la elección de un grupo de mecanismos de interpolación es necesario conocer sus características para prever las ventajas y limitaciones frente al objetivo perseguido. Para conocer las características de cada uno de los métodos se ha recurrido a la información suministrada por el propio desarrollador del software (ESRI). Atendiendo a esto, las principales diferencias entre los grupos de interpoladores disponibles son las siguientes:

- La principal diferencia entre los métodos determinísticos y los geoestadísticos consiste en que los primeros toman los valores de los puntos medidos y, en base a ellos, calcula los valores en los espacios sin puntos, de manera que estos se ajusten lo mejor posible a los valores conocidos. Por otro lado, los métodos geoestadísticos se basan en las propiedades estadísticas de los puntos, es decir, pueden no tener en cuenta el valor exacto del punto a la hora de realizar la interpolación.
- Dentro de los métodos determinísticos estos pueden ser exactos o inexactos. La diferencia entre ellos consiste en que los métodos exactos fuerzan la superficie generada para que tome el valor exacto de los puntos medidos; mientras que los inexactos



calculan tendencias entre los puntos, pudiendo calcular un valor diferente al medido en los puntos conocidos. Esto genera un suavizado de los picos y depresiones más marcadas.

- Los métodos con barreras son similares a los anteriores, de hecho, el método Kernel con barreras es similar al LPI, es decir, es un método determinístico inexacto, con la diferencia de que el primero tiene en cuenta barreras que independizan los valores a un lado y a otro de las mismas. También se pueden incorporar líneas cerradas a la simulación, lo que genera espacios vacíos dentro del área interpolada. Por otro lado, la difusión con barreras es similar al método Kernel, pero admitiendo la inclusión de barreras al igual que el anterior.

A continuación se explicarán más detalladamente las características de cada uno de los métodos determinísticos, ya que es necesario conocer las características principales de cada método antes de seleccionar uno de ellos para realizar las interpolaciones. Los métodos geoestadísticos no se describirán detalladamente, ya que sus fundamentos matemáticos son complejos y, a la vista de los resultados obtenidos con los métodos determinísticos, se ha decidido que las posibles mejoras en los resultados no justificaban el tiempo que sería necesario invertir en comprender los fundamentos de estos métodos y realizar los ajustes necesarios durante el proceso de interpolación.

- IDW (Inverse Distance Weight): como ya se ha visto, se trata de un interpolador determinístico exacto. En este caso, la manera de calcular los valores de las zonas sin puntos conocidos consiste en otorgarles valores en función de su distancia a uno de estos puntos. La distancia al punto medido se tiene en cuenta inversamente, es decir, cuanto más cerca esté el punto calculado del medido, más parecido será su valor, y viceversa. La manera en la que el interpolador tiene en cuenta los puntos medidos a la hora de realizar la interpolación, se puede controlar mediante el valor de potencia, el radio de búsqueda y el número de vecinos que ha de tener en cuenta. La potencia es un valor que controla la importancia que se le da a los valores conocidos a la hora de realizar los cálculos, cuanto mayor sea la potencia, menor será la influencia del valor conocido en su entorno, por lo tanto, cuanto menor sea el valor de potencia más suavizada será la superficie generada (Fig. II.12). El radio de búsqueda es el radio del círculo dentro del cual se han de encontrar los puntos que serán utilizados preferentemente en la interpolación; además esto se puede controlar convirtiendo el círculo en una elipse, el programa permite controlar el tamaño del círculo en función de dos ejes, modificando el tamaño de ambos ejes se puede transformar el círculo en una elipse, a la cual se le puede dar una orientación para que simule mejor una determinada



tendencia en los datos; un último ajuste que se puede realizar en cuanto al radio de búsqueda es dividir el círculo en sectores, así el interpolador tendrá en cuenta los valores de cada sector independientemente (Fig. II.11). El último valor modificable es el número de vecinos que el interpolador debe tener en cuenta para calcular un valor, cuanto mayor sea el número, la influencia de los valores conocidos será mayor y podrán condicionar el valor de puntos calculados a mayor distancia. Todos estos valores se pueden modificar en busca de los valores que generen errores menores y según los cuales la superficie tenga un aspecto más real. La otra característica básica del IDW consiste en que no calcula valores por encima del valor máximo ni tampoco por debajo del valor mínimo (Figura II.12); esto hace que las superficies obtenidas sean matemáticamente muy correctas, ya que al ser un interpolador exacto los errores son mínimos, y también conservadoras, ya que los valores no superan el rango determinado en los puntos medidos.

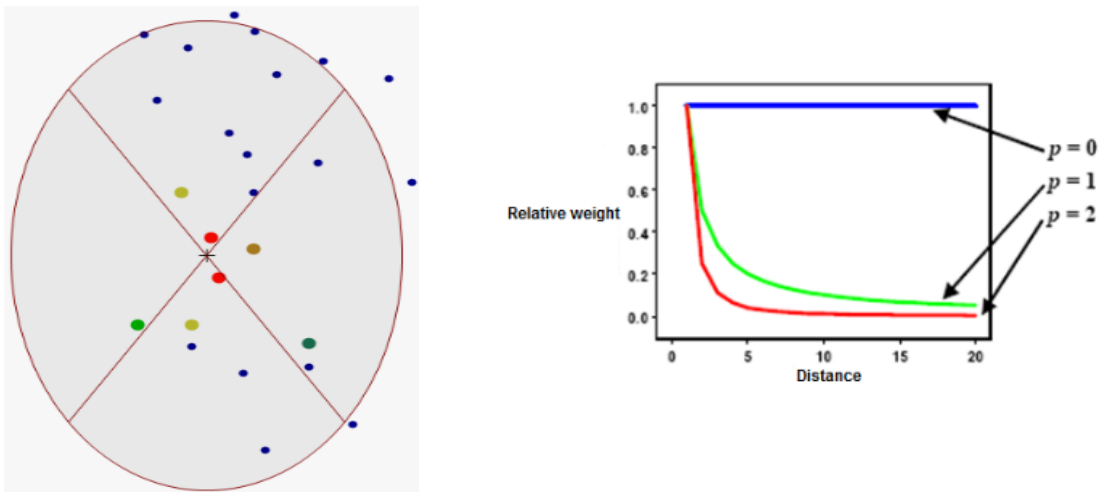


Figura II.11 – Explicación de los principales valores modificables que controlan la interpolación tanto en IDW como en RBF y LPI. Círculo de búsqueda de vecindades convertido en elipse con orientación N-S y dividido en sectores, los puntos rojos son los más cercanos y su peso es mayor, mientras que los puntos azules son los más alejados en cada sector y su peso en la interpolación es menor (izq.). Gráfico explicativo de la influencia de la potencia en el peso de los valores según la distancia (dcha.). Fuente: ESRI.

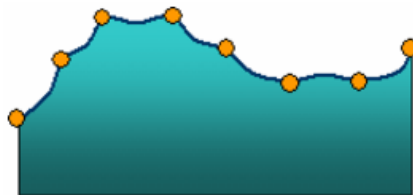


Figura II.12 - Ejemplo de cómo se genera una superficie utilizando IDW (fuente: ESRI).



- RBF (Radial Basis Functions): también se trata de un interpolador determinístico exacto; pero, en este caso, el cálculo de los valores en las zonas sin medidas se basa en funciones de base radial. Los fundamentos matemáticos de estas funciones se escapan al contexto de este trabajo, sólo mencionar que en ArcGIS se dispone de cinco de estas funciones, y la elección de una de ellas como base para la interpolación se realiza mediante comparación visual de las superficies obtenidas. La principal diferencia entre el RBF y el IDW a efectos de generación de una superficie geológica, además de los diferentes fundamentos matemáticos, consiste en que el RBF sí calcula valores por encima de los máximos medidos y por debajo de los mínimos, generando una superficie más suavizada (Fig. II.13). En el RBF también se pueden modificar los valores explicados anteriormente: potencia, radio de búsqueda y número de vecinos. Este, al ser un método exacto, también es un método matemáticamente muy correcto en el que las superficies generadas presentan errores muy bajos, pero en este caso la superficie no es tan conservadora ya que se sale del rango establecido por los valores medidos.

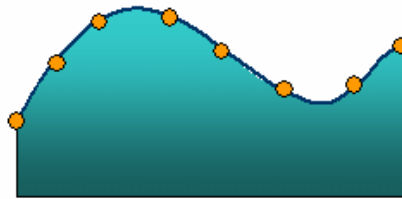


Figura II.13 – Ejemplo de generación de una superficie mediante RBF (fuente: ESRI).

- GPI (Global Polynomial Interpolator): como ya se ha visto se trata de un interpolador determinístico inexacto que, además, es el único método de interpolación global disponible en ArcGIS, es decir, es el único en el que la superficie es calculada teniendo en cuenta todos los puntos simultáneamente y no en función de vecindades. Las características de este método lo hacen útil para el cálculo de tendencias generales en los datos y para la generación de superficies muy suavizadas que no representen pequeñas inflexiones o picos, sólo la forma general. En el SIG se dispone de varios polinomios para realizar estos cálculos, a los cuales se les puede cambiar el orden, es decir, la interpolación se puede realizar utilizando un polinomio de orden 1, 2 o superior. Si el polinomio utilizado es de orden 1, la superficie obtenida será totalmente plana, como si colocásemos una tabla entre los puntos conocidos de manera que la desviación respecto a todos los puntos sea lo menor posible (Fig. II.14A). Si el polinomio es de orden 2 el interpolador puede introducir una inflexión en la superficie, es decir, puede simular una superficie con forma de valle (Fig. II.14B), sería como colocar una hoja de papel doblada entre todos los puntos medidos. Si el polinomio utilizado es de orden 3 la superficie podría tener una inflexión más, pudiendo simular la forma de un collado, y así



sucesivamente con órdenes superiores aunque no se recomienda utilizar polinomios de orden superior a 3.

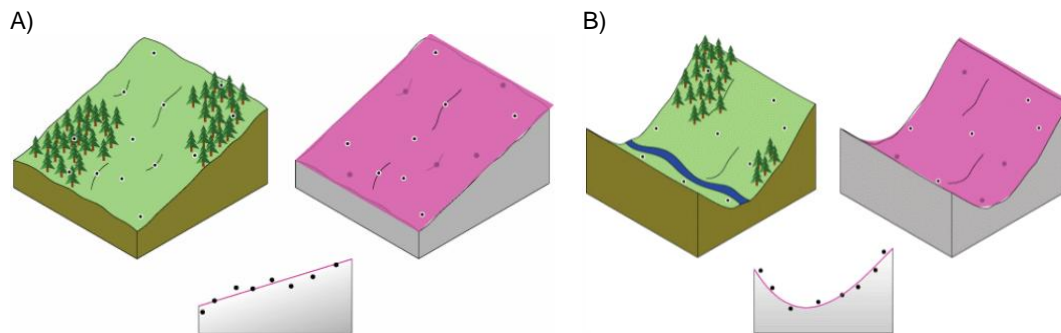


Figura II.14 - Simulación de cómo genera las superficies el GPI. A) ejemplo de interpolación con polinomio de orden 1; B) ejemplo de interpolación mediante polinomio de orden 2 (fuente: ESRI).

- LPI (Local Polynomial Interpolator): al igual que el GPI, se trata de un interpolador determinístico inexacto, pero en este caso no realiza la interpolación tomando todos los puntos al mismo tiempo, agrupa los puntos por zonas y realiza la interpolación en cada una de estas zonas utilizando los puntos más cercanos (Fig. II.15). Los polinomios disponibles son los mismos que en el GPI, siendo la principal diferencia entre ambos interpoladores el carácter global y local de cada uno.

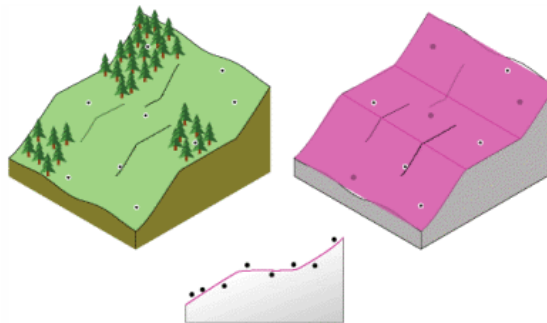


Figura II.15 – Ejemplo de superficie generada mediante LPI (fuente: ESRI).



II.4. Mecanismos de Validación

Paralelamente a las interpolaciones, es necesario realizar validaciones para establecer qué interpolador ofrece mejores resultados tanto desde el punto de vista matemático como desde el geológico. Esto requiere la realización de dos procesos; la validación matemática de las superficies se realiza mediante la validación cruzada, mientras que la valoración de la consistencia geológica es un proceso visual y subjetivo que ha de ser realizado por el operador. A continuación se explica en qué consiste cada uno de ellos.

II.4.1. Validación cruzada

La validación cruzada es un procedimiento matemático que se realiza simultáneamente a la interpolación. Consiste en que el interpolador calcula el valor de cada punto medido sin tener en cuenta dicho punto, es decir, comprueba cuánto se acerca la superficie calculada a cada uno de los puntos medidos. Después, resta los valores calculados por la interpolación menos los valores medidos, obteniendo a partir de esto un valor del error medio y una desviación estándar (Fig. II.16). Además del error medio y la desviación estándar, la validación cruzada proporciona un variograma con los puntos, desviaciones y tendencias generales.

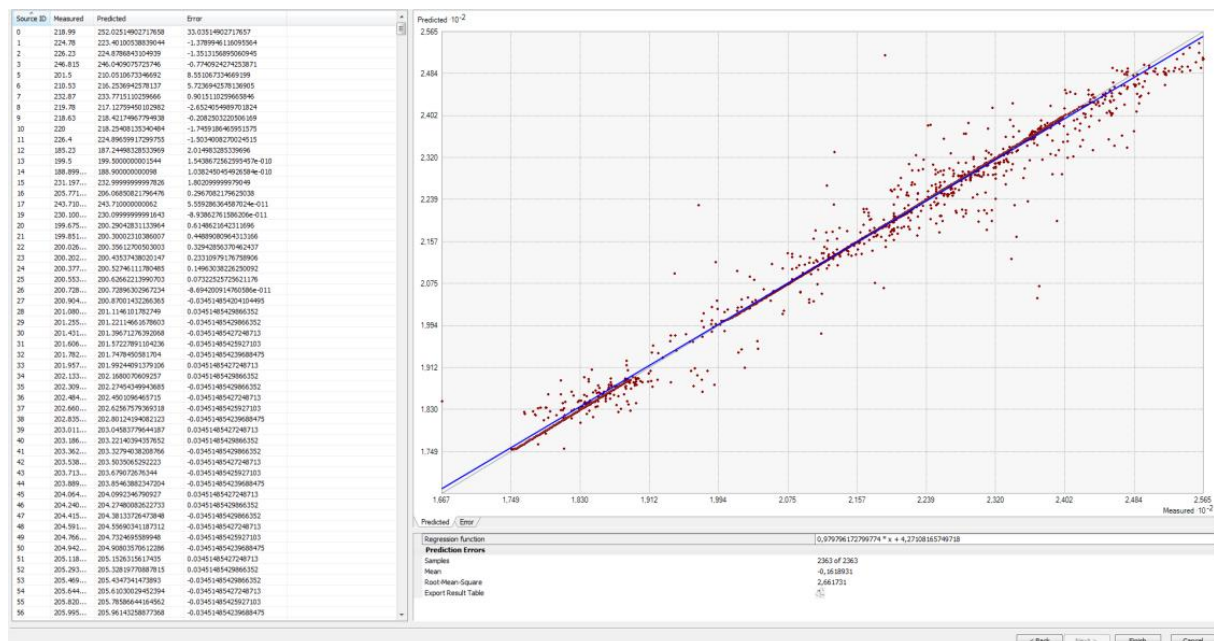


Figura II.16 – Ventana de validación cruzada.



II.4.2. Consistencia geológica

La valoración de la consistencia geológica es el mecanismo de validación más importante en este caso. Al tratarse de superficies geológicas, una superficie matemáticamente muy exacta, puede no tener sentido desde el punto de vista geológico, de ahí la importancia que cobra este proceso. Dentro de la valoración de la consistencia geológica se realizan varios procedimientos; el primero, y más básico, es una valoración visual de la geometría de la superficie obtenida, así se comprueba que no presenta depresiones o elevaciones anormales y que el rango de elevaciones es coherente con la zona de estudio. Una vez realizada esta primera revisión visual, se pasa a comparar la superficie obtenida con todos los datos geológicos disponibles.

Esto consiste en comparar las superficies generadas con los datos geológicos no utilizados. La primera comprobación realizada consiste en asegurar que las superficies obtenidas utilizando los puntos exactos e interpretados, no contradicen las testificaciones de los sondeos en los que no se llega a identificar dicho contacto. Esto se consigue restando las cotas a las que los sondeos cortan una determinada formación, menos las cotas de dicha superficie en el punto del sondeo; de esta manera la obtención de un valor negativo indica que la superficie interpolada pasa por encima del final del sondeo (Fig. II.17, sondeo rodeados en rojo), siendo esto del todo imposible y requiriendo una corrección (Thierry, P., et al., 2009); por otro lado, si se obtienen valores positivos, significa que la superficie pasa por debajo del final del sondeo; a priori esto no significaría un problema pero, para asegurar la fiabilidad del modelo, se comprobó que, la suma del espesor cortado de una determinada formación por un sondeo, más la profundidad a la que pasa la superficie interpolada, no superan la potencia máxima conocida para dicha formación dentro de la zona de estudio; los puntos en los que sucede esto (Fig. II.17, sondeos rodeados en azul) también requieren ser corregidos. Estas correcciones se realizan introduciendo nuevos puntos, los llamados puntos inexactos o secundarios, a los que se otorga una cota que sea coherente con los datos geológicos disponibles en su entorno más cercano. Estos se añaden a los puntos exactos e interpretados para realizar una segunda interpolación, pudiendo asegurar que las superficies obtenidas tras estas correcciones no contradicen datos en profundidad. En este paso se vuelven a comparar diferentes métodos de interpolación (véase subapartado II.3.2).

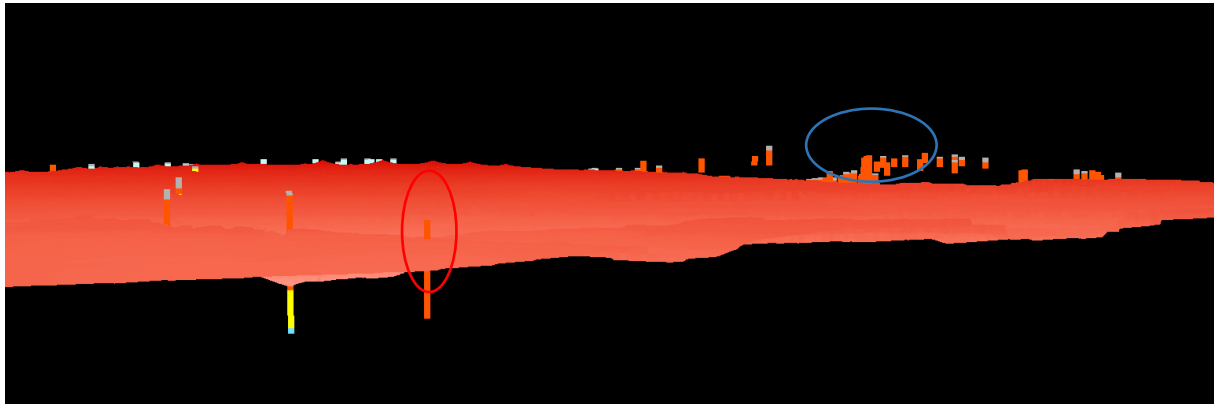


Figura II.17 – Explicación puntos inexactos.

Una vez obtenidos y utilizados los puntos exactos, inexactos e interpretados, es necesario comprobar que las superficies obtenidas no contradicen datos de superficie y que no se están modelando espesores superiores al máximo determinado dentro de la zona de estudio para cada formación. La primera comprobación se realiza de modo visual, representando en 3D las superficies obtenidas junto con los datos de superficie para así, comprobar que los puntos en los que aflora una formación son respetados por las superficies obtenidas (Fig. II.18A). La corrección de los espesores comienza con una resta entre las superficies, una vez detectadas las zonas en las que se están obteniendo espesores demasiado elevados (Fig. II.18B); los puntos o las zonas donde esto no se cumple se corrigen mediante la inclusión de un punto de control o incoherente, al cual se le da una cota coherente con la información geológica disponible, eliminando los errores detectados (Fig. II.19). De este modo se consigue un modelo que respeta todos los datos disponibles, y que es coherente desde un punto de vista geológico. Este proceso de valoración de la consistencia geológica de las superficies es de gran importancia, ya que permite asegurar la validez geológica del modelo obtenido y aumentar el número de puntos utilizados para el cálculo de cada una de las superficies, especialmente con la inclusión de los puntos inexactos (Tabla I).



A)



B)

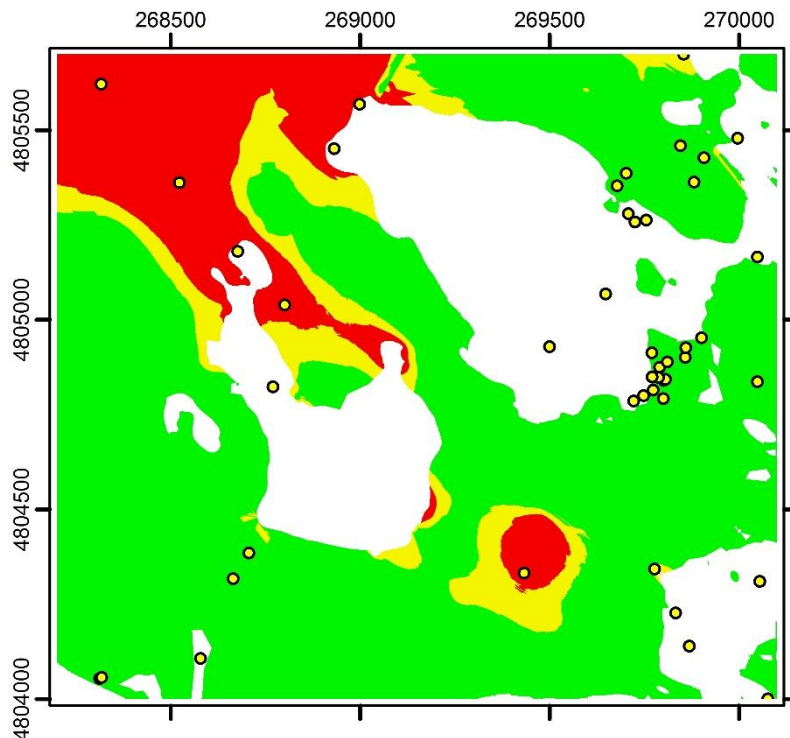


Figura II.18 - Explicación de puntos incoherentes: A) corrección de contradicciones en los afloramientos ya que los puntos azules representan afloramientos de la superficie azul (Fm. Oviedo) y deberían estar sobre dicha superficie (azul), aquellos en los que esto no se cumple deben ser corregidos; B) corrección de espesores (los puntos amarillos representan todos los puntos incoherentes introducidos en esta superficie).

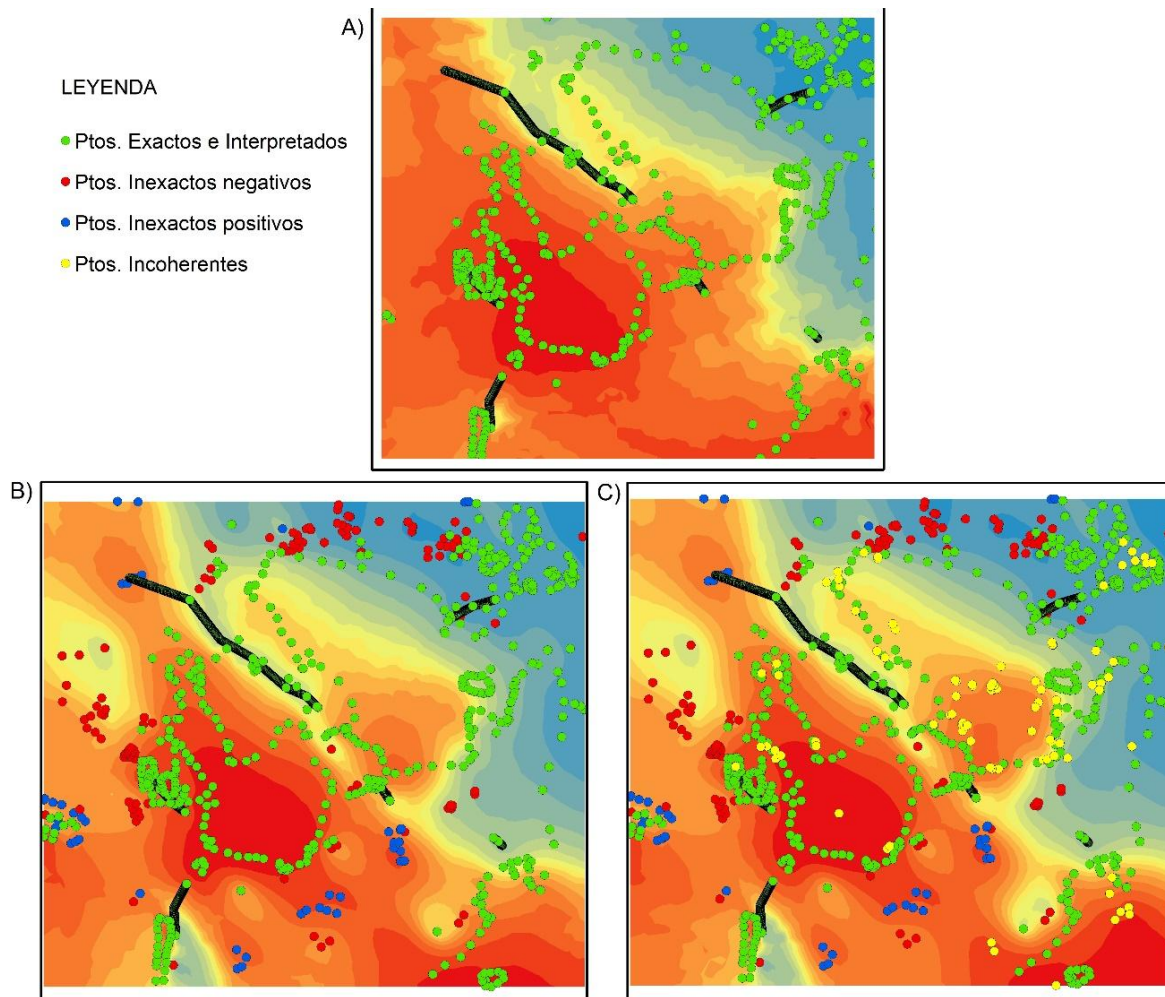


Figura II.19 – Ejemplo de proceso llevado a cabo para la base del Paleógeno. A) Superficie obtenida a partir de los puntos exactos e interpretados; B) superficie obtenida tras añadir los puntos inexactos; C) superficie obtenida tras añadir los puntos incoherentes.

| Puntos Usados en las Interpolaciones | | | | | |
|--------------------------------------|-----------------|-------------|---------|----------|--------|
| | | Base FF.SS. | Base PG | FO-AR | AR-SL |
| Puntos exactos | Sondeos | 475 | 130 | 123 (+4) | 3 (+5) |
| | Observaciones | 106 | 15 | - | - |
| Puntos interpretados | Superficie | - | 354 | 83 | - |
| | Profundidad (m) | - | 1599 | 2470 | 813 |
| Puntos inexactos | Utilizados | - | 165 | 50 | - |
| | No utilizados | - | 64 | 63 | - |
| Puntos de control | | - | 99 | 72 | - |
| TOTAL Puntos utilizados | | 581 | 763 | 332 | 8 |

Tabla I - Evolución del número de puntos obtenidos para cada superficie tras cada validación (el número total no tiene en cuenta los metros interpretados en profundidad en los perfiles 3D).



II.5. Obtención de mapas finales

El paso final de todo el procedimiento consiste en la elaboración, tanto del mapa geológico propuesto para la zona, como de mapas de isopacas e isobatas de las formaciones incluidas en el modelo. Tras asegurarse de que las interpolaciones son correctas, es necesario ajustar las superficies obtenidas a las zonas en las que dicha formación está presente, es decir, obtener las zonas en las que estas superficies se cortan entre sí para definir las superficies definitivas. Esto se consigue realizando restas entre las superficies interpoladas, para posteriormente eliminar la parte de la misma que es cortada por una superficie más moderna (Fig. II.20). Una vez que se dispone de los muros reales de todas las formaciones es necesario obtener sus techos; esto se logra fusionando las partes de los muros de las formaciones suprayacentes que se sitúan inmediatamente por encima de su muro (Fig. II.21); esto plantea numerosos problemas, haciendo necesario un tratamiento cuidadoso de las mismas para fusionar las partes correctas. La elaboración de los techos de las formaciones es necesaria para obtener los espesores y profundidades, es decir, las isobatas e isopacas de cada formación, ya que su cálculo consiste en restar el techo y el muro de cada formación y, la topografía menos el techo de cada una de ellas respectivamente. Las isobatas e isopacas obtenidas en bruto presentan, por lo general, un aspecto muy quebrado e irreal, lo que hace necesario un tratamiento de las mismas para suavizarlas y eliminar posibles errores.

Por otro lado, el mapa geológico final se obtiene a partir de la resta realizada anteriormente entre las superficies interpoladas. Una vez obtenidas las zonas en las que cada formación es cortada tanto por las formaciones superficiales como por la topografía se pueden delimitar los afloramientos de cada unidad.

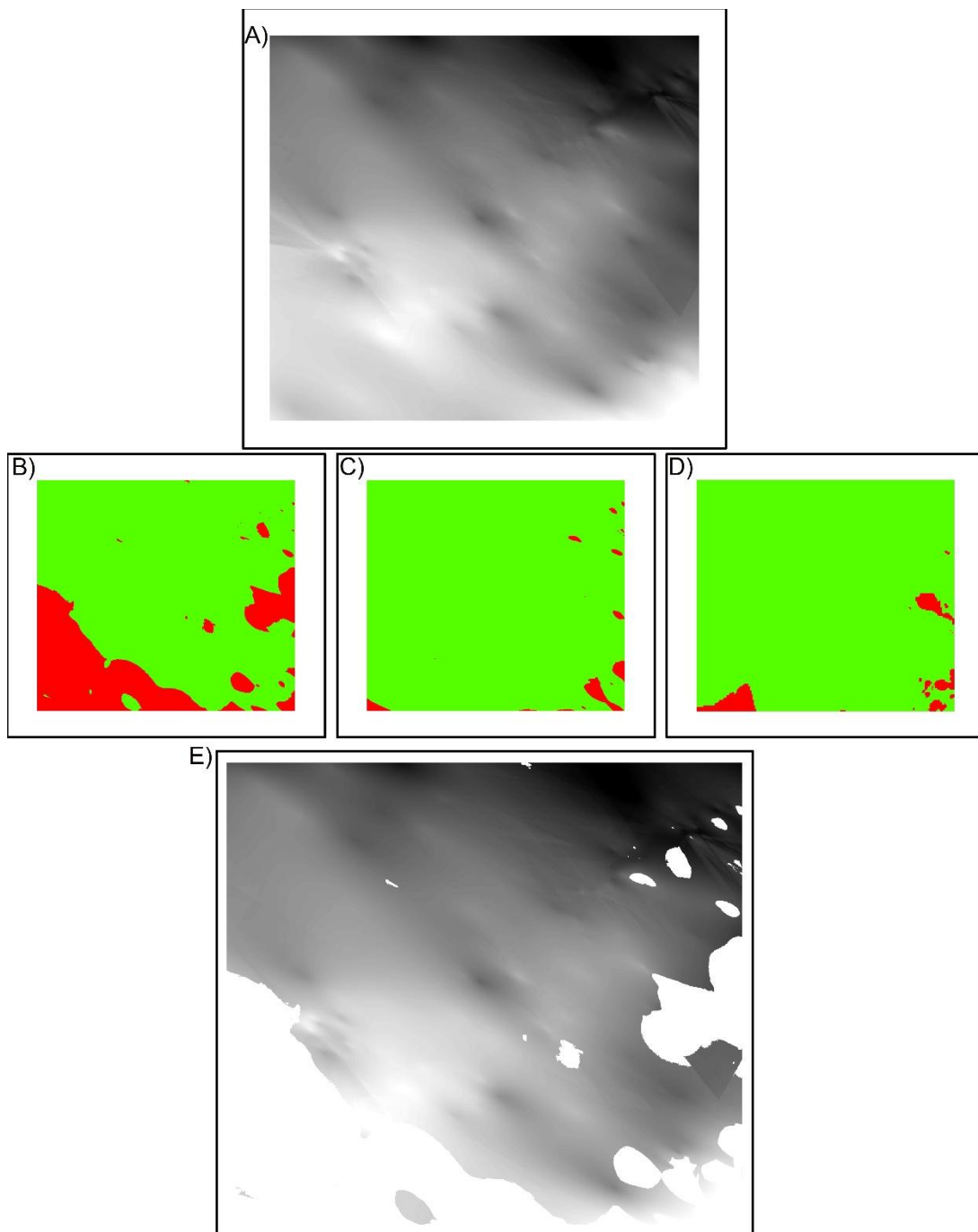


Figura II. 20 – Proceso de obtención del muro de cada unidad (p.ej., muro de la Fm. Oviedo. A) Superficie obtenida tras la interpolación; B) resta de esta superficie y la inmediatamente superior (base del Paleógeno); C) resta con la base de las formaciones superficiales; D) resta con la topografía; E) resultado final. En las figuras B, C y D las zonas rojas son en las que la superficie más moderna corta al muro en cuestión.

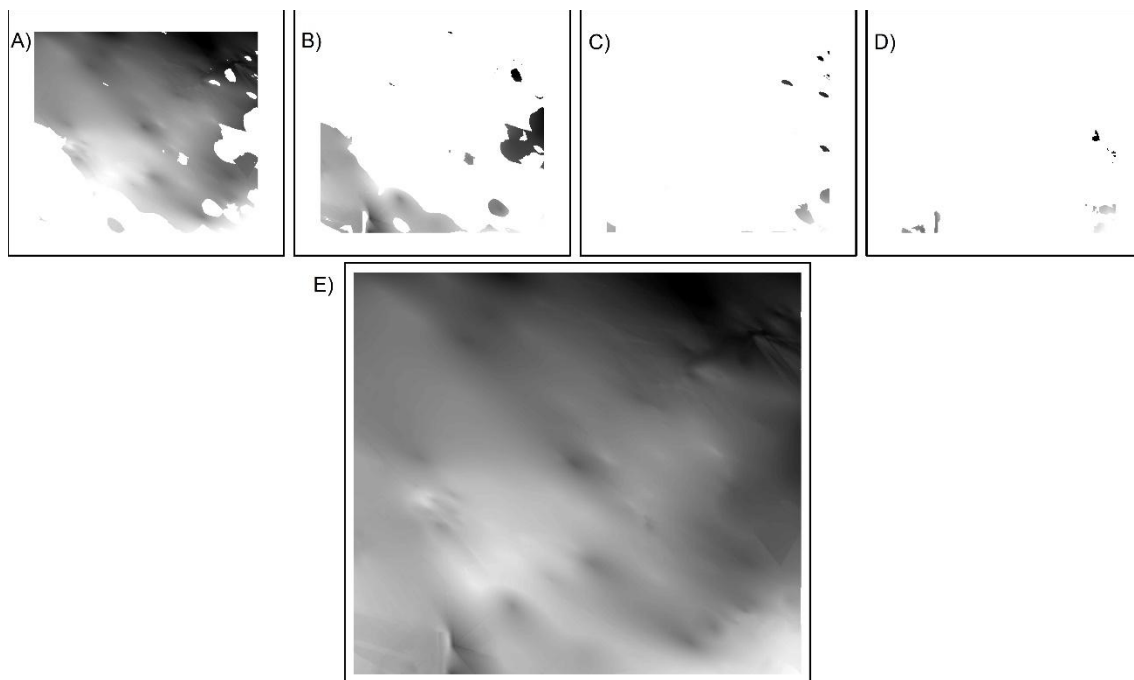


Figura II.21 – Proceso de obtención del techo de cada unidad (p.ej., Fm. La Argañosa). A) Parte del techo de esta formación que coincide con el muro de la Fm. Oviedo; B) área en la que coincide con la base del Paleógeno; C) zonas en las que se encuentra debajo de las formaciones superficiales; D) partes en las que aparece en superficie; E) techo completo de la Fm. La Argañosa.



III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

III.1. Aportaciones cartográficas

Tal y como se ha explicado en el apartado II.3, se ha llevado a cabo un minucioso tratamiento de los datos geográficos de la zona. Esto ha permitido descubrir las dificultades que surgen a la hora de trabajar con la información geográfica de una zona urbana y, cómo al conseguir superarlas, se obtienen modelos mucho más precisos que los disponibles hasta el momento.

La primera aportación cartográfica realizada en este trabajo es un MDE más preciso y actualizado que aquellos con que se ha trabajado, algo fundamental dado el nivel de detalle que exige un trabajo de modelización geológica a esta escala. Como se expuso en el apartado II.2.1, se dispuso de tres fuentes de cartografía topográfica: puntos acotados del Ayuntamiento (1:1.000), puntos acotados y curvas de nivel obtenidos de los archivos CAD del Principado (1:5.000), y nube de puntos topográficos LIDAR (precisión altimétrica 20 cm). Todos estos datos topográficos presentaban características favorables y desfavorables a la hora de ser utilizados como superficie topográfica de referencia. La nube de puntos LIDAR proporciona los datos más detallados y actuales, pero, a pesar del filtrado que se llevó a cabo, seguía presentando interferencias, es decir, teniendo en cuenta las alturas de los edificios, árboles, bocas de aparcamientos subterráneos, etc., por lo que su utilización como referencia topográfica para este trabajo es inviable (Fig. III.1A). La siguiente fuente de información más precisa son los puntos acotados del Ayuntamiento, estos tienen el problema de estar desactualizados, es decir, presentan formas del relieve urbano ya desaparecidas, como el terraplén de la línea de FEVE que pasaba por la estación de “El Vasco”, o faltan figuras del relieve más actuales como la losa de RENFE sobre la “Estación del Norte” (Fig. III.1B). Por último, se analizaron los puntos acotados y curvas de nivel de la cartografía autonómica (1:5.000). A priori estos deberían ser más actuales que los puntos acotados del Ayuntamiento, pero cuando se compararon detalladamente, se observó que las cotas de zonas en las que no deberían coincidir, como el terraplén de FEVE en la zona de “El Vasco”, el cual ya había sido desmantelado en la fecha que se supone para los archivos CAD, coincidían a la perfección; lo cual, implica que estos últimos no fueron totalmente actualizados (Fig. III.1C). Esto supuso que ninguna de las tres fuentes de datos topográficos sea por sí misma lo suficientemente precisa, siendo necesario llevar a cabo un tratamiento de alguna de ellas para intentar que se ajuste, en la medida de lo posible, a la realidad.

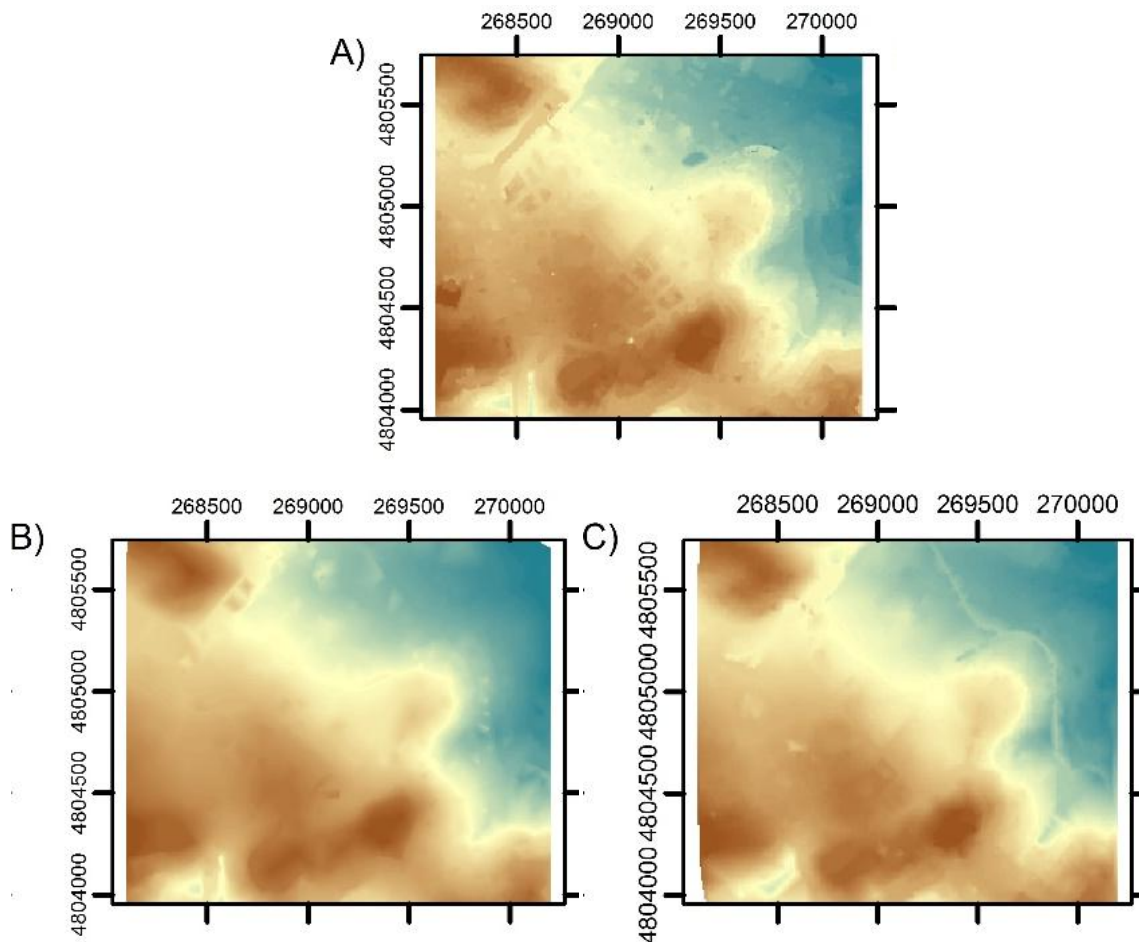


Figura III.1 – MDEs obtenidos a partir de las diferentes fuentes: A) PNOA-LIDAR; B) cartografía topográfica autonómica; C) información del Ayuntamiento de Oviedo.

Finalmente se optó por utilizar los puntos acotados del Ayuntamiento de Oviedo (1997). Visualizando estos datos en detalle, se detectaron los fallos más significativos y se procedió a su subsanación modificando la cota asignada a los puntos problemáticos, eliminando puntos cuya cota se consideró errónea o añadiendo nuevos puntos en zonas en las que su baja densidad generaba errores en el modelo. Gracias a esto se obtuvo un MDE sin artificios generados por edificios y sin las formas del relieve ya desaparecidas (Fig. III.2A), haciendo de este, un modelo más ajustado a la superficie topográfica actual. Además, como consecuencia de la mejora del MDE, se consiguen mapas de pendientes mucho más fiables que los expuestos en el apartado I.1.2. (Fig. III.2B). La losa sobre la Estación del Norte no fue añadida al MDE, conservando los puntos de cota tomados al nivel de las vías. Esto se decidió considerando que la losa es una estructura, no una modificación de la topografía mediante el movimiento de tierras; por lo tanto, se optó por añadirla al modelo posteriormente junto con el resto de estructuras.

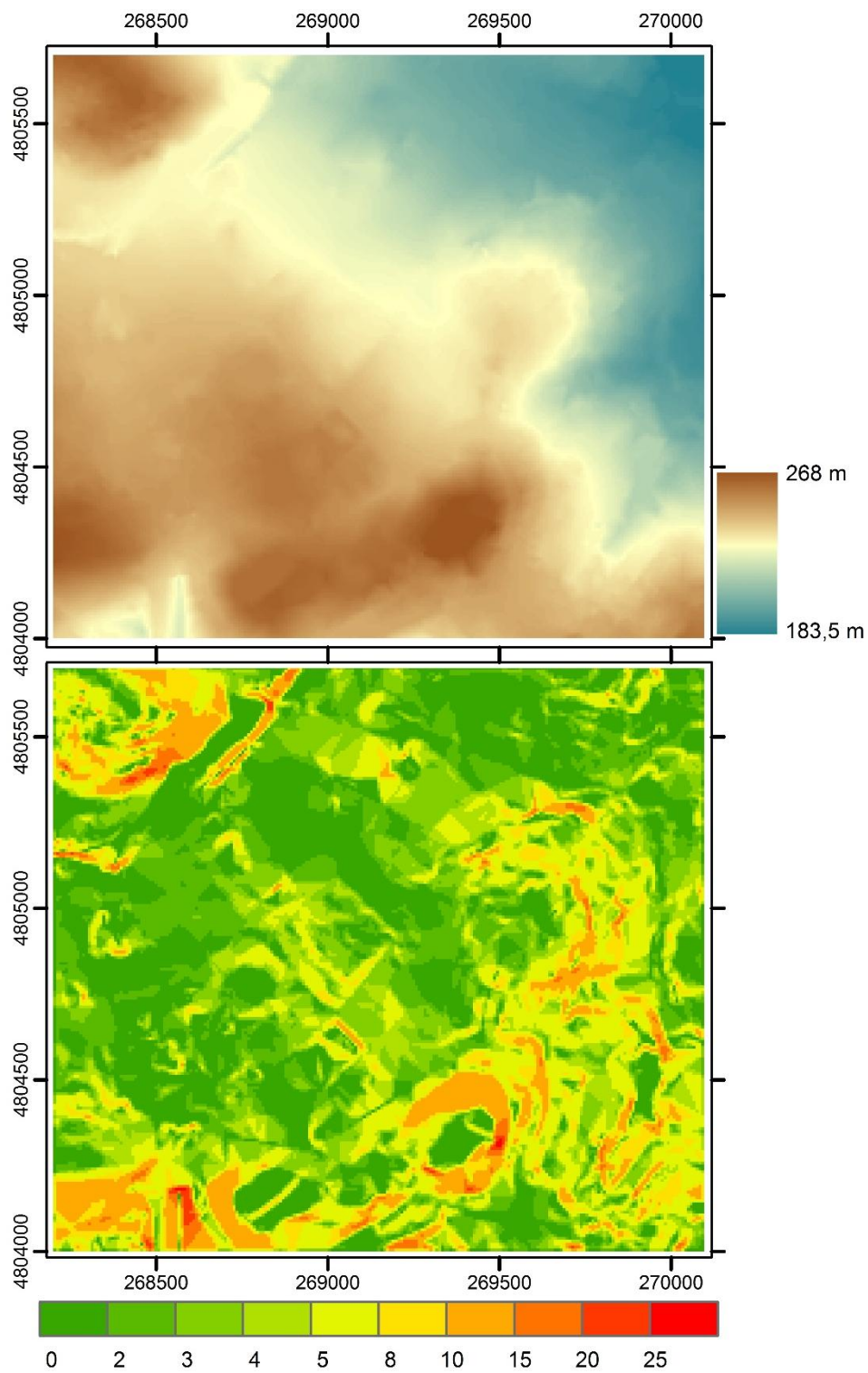


Figura III.2 – A) MDE obtenido tras el tratamiento de los datos; B) mapa de pendientes expresadas en grados (comparar con Fig. I.2).



En cuanto a los resultados obtenidos del tratamiento de los datos cartográficos recogidos en los archivos CAD autonómicos, se obtuvo una cartografía precisa, realista y con una simbología simple que facilita su visualización, pero no roba excesivo protagonismo al modelo geológico del subsuelo (Fig. III.3). El hecho de disponer de esta información en forma de polígonos posibilita la visualización de los mismos en 3D con sus respectivas alturas. Esta representación de las alturas reales se consigue añadiendo a los atributos de los polígonos el número medio de plantas que tienen los bloques de cada manzana, así, en el programa de visualización 3D, a cada manzana se le puede atribuir su altura media; además, como ya se explicó en el apartado II.3.1, se independizaron los edificios más representativos, por lo que a estos se les dio su altura real. Para hacer más representativo el modelo en superficie también se añadió a los polígonos información sobre el tipo de edificio del que se trata (religioso o histórico, educativo, industrial, etc.), para poder representar los edificios con una simbología que permita diferenciarlos más fácilmente. Finalmente, todo ello puede representarse ajustado al MDE generado anteriormente, obteniendo un modelo 3D de la superficie de la ciudad con todos sus elementos situados en sus coordenadas (X, Y, Z) reales (Fig. III.4).

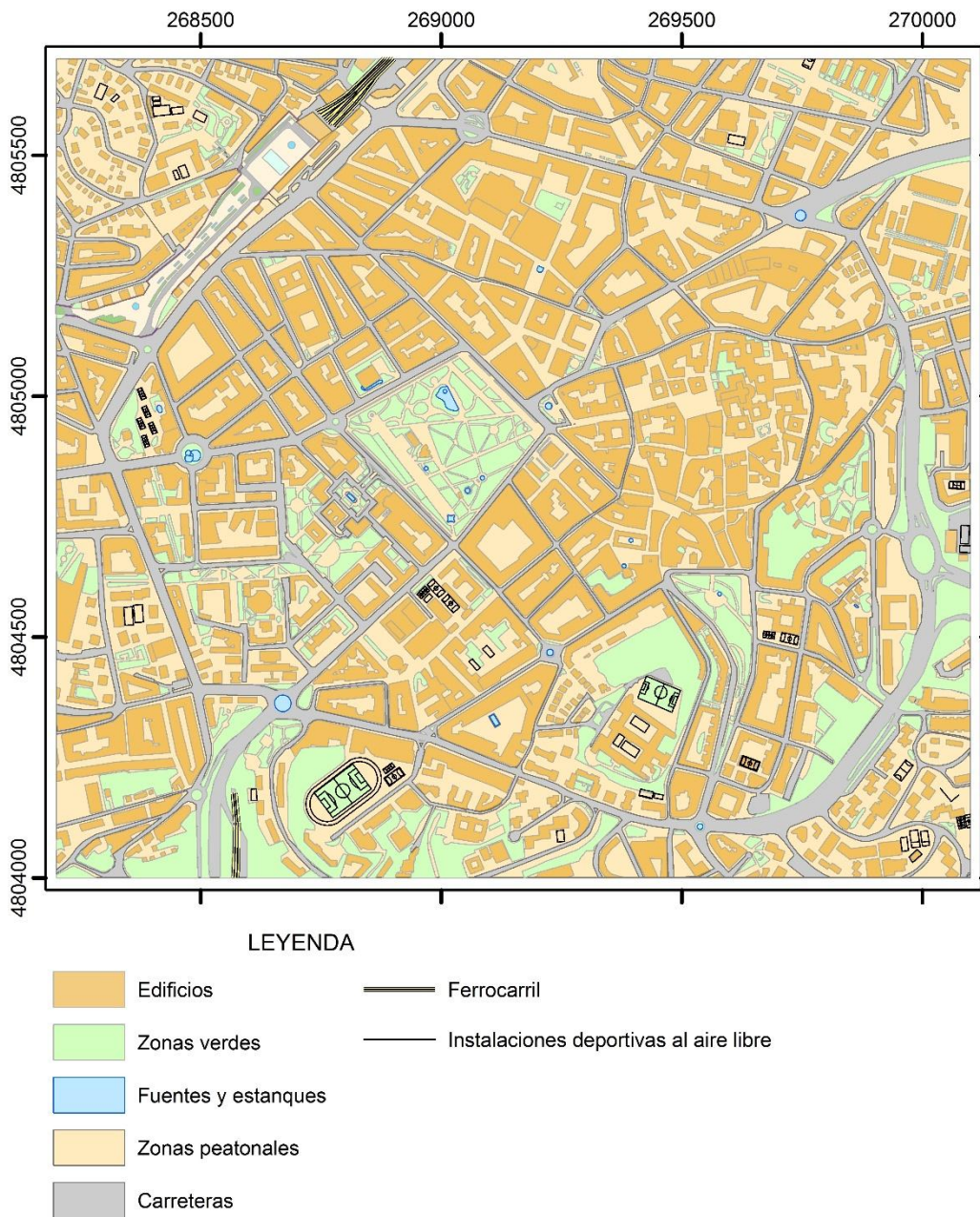


Figura III.3 – Polígonos obtenidos a partir de los archivos DGN.

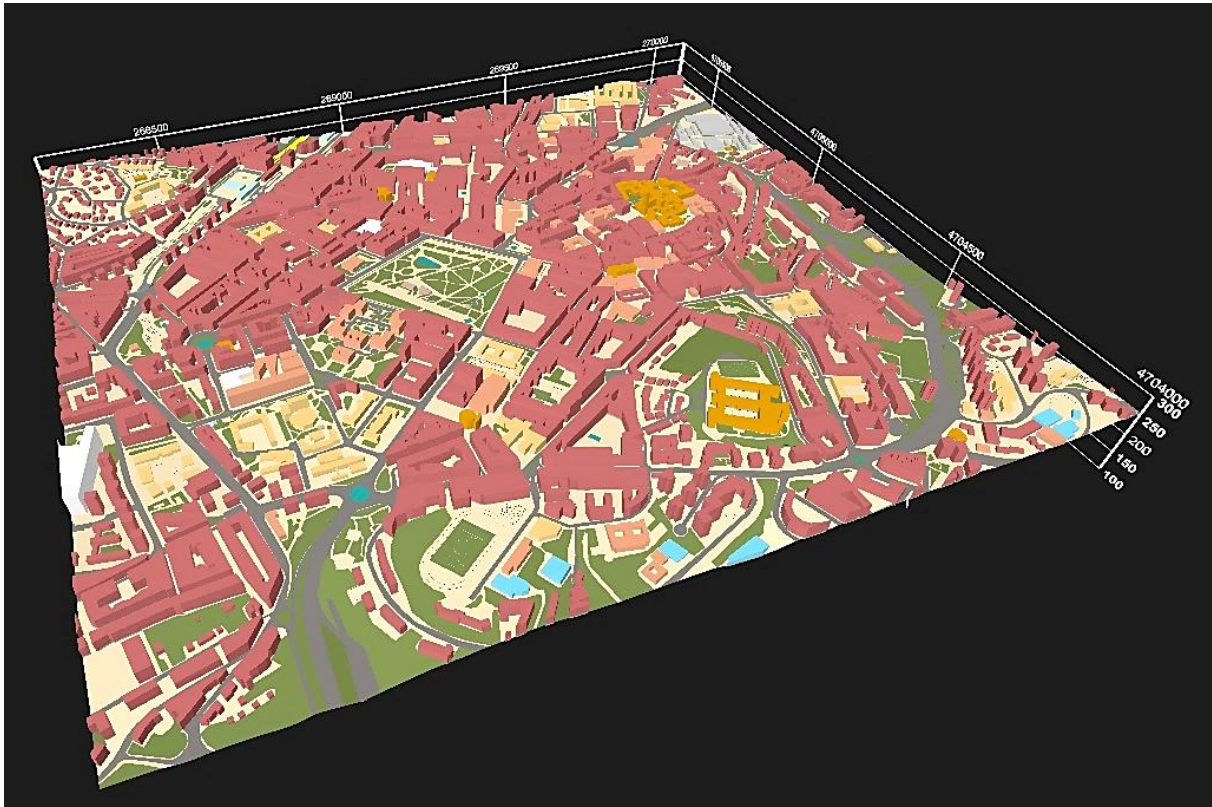


Figura III.4 – Representación tridimensional de la cartografía urbana de la zona de estudio.



III.2. Mecanismos de interpolación

Antes de realizar una valoración y una discusión del resto de resultados obtenidos en este trabajo, es necesario describir el proceso de elección de un mecanismo de interpolación concreto, el por qué se ha elegido ese y no otros, y para qué se ha utilizado dicho interpolador.

Como se expuso en el apartado II.3.2, los mecanismos de interpolación que se han utilizado en este trabajo son los determinísticos. Los interpoladores geoestadísticos y los que ofrecen la posibilidad de imponer barreras a la interpolación se tuvieron en cuenta y se realizaron pruebas rápidas para su comparación con los determinísticos, así se comprobó que para obtener unos buenos resultados con estos interpoladores, deben realizarse numerosos ajustes y su complejidad hace difícilmente aprovechables sus ventajas en este caso.

Una vez descartados los interpoladores estadísticos, se procedió a comparar los interpoladores determinísticos entre sí. La primera conclusión que se obtuvo fue que el interpolador GPI es muy útil para obtener tendencias en los datos (Fig. III.5). En este caso se utilizó para conocer la tendencia general tanto de la base del Paleógeno como del contacto entre la Fm. Oviedo y la Fm. La Argañosa. En el caso de la base del Paleógeno, la tendencia es a profundizar en dirección 50°N , no siendo esta tendencia muy marcada. Por otro lado, el contacto entre la Fm. Oviedo y la Fm. La Argañosa presenta una tendencia más marcada en dirección 30°N . En el caso de la base de las formaciones superficiales no se calculó su tendencia ya que al ser una superficie totalmente irregular no será un parámetro importante. Los resultados obtenidos fueron coherentes con el contexto geológico de la zona, ya que cómo se vio en el apartado I.2.3. las unidades cretácicas forman un sinclinal que se hunde hacia el NE. También es coherente que la tendencia sea más marcada en el contacto entre la Fm. Oviedo y la Fm. La Argañosa al tratarse de un contacto normal, mientras que, para la base del Paleógeno, que es un contacto disconforme en el que se desarrolló un paleorrelieve, esta tendencia aparece menos marcada. Estos datos sirven para apoyar la posterior interpolación que se realizará con más detalle, ya que el resto de interpoladores permiten imponer una tendencia a la interpolación, de manera que el resultado sea más realista.

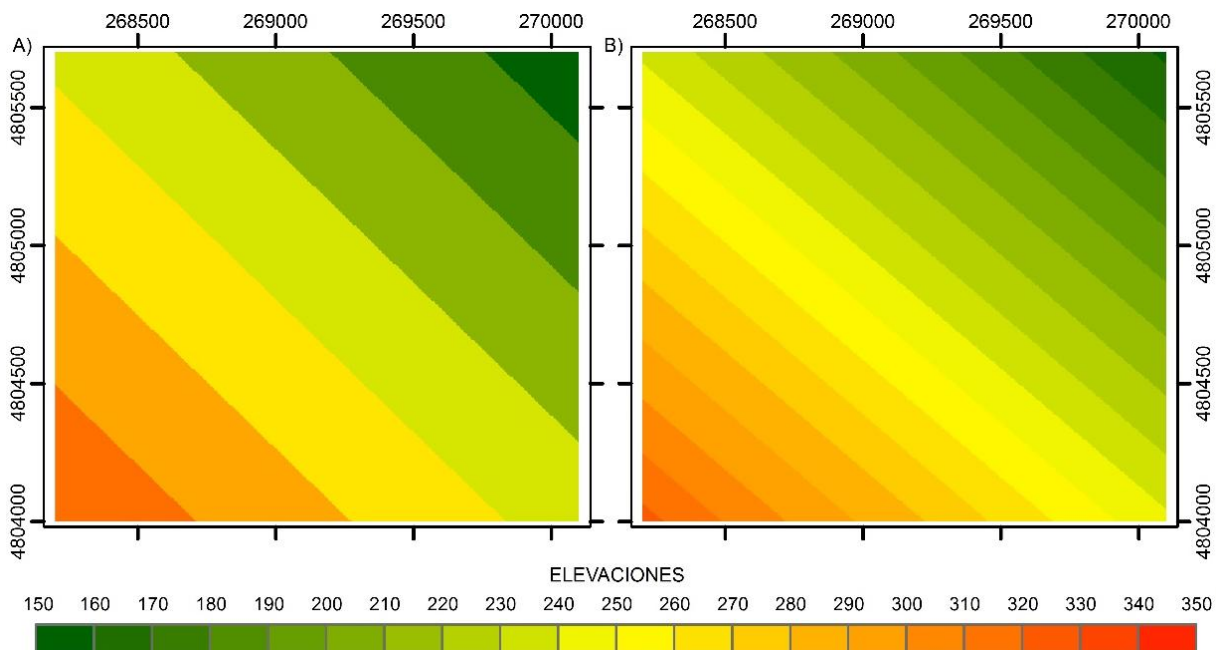


Figura III.5 – Interpolaciones realizadas mediante GPI en las que se observa la tendencia general de profundización hacia el NE: A) base del Paleógeno; B) contacto Fm. Oviedo - Fm. La Argañosa.

Tras obtener las tendencias generales, se comprobó que los resultados obtenidos mediante el GPI para la modelización de una superficie geológica no son suficientemente precisos en este caso. A continuación, se valoró el LPI, al tratarse de un interpolador local los resultados obtenidos se ajustan mejor a la posible geometría de una superficie geológica, pero al tratarse de un interpolador inexacto los errores obtenidos son grandes, y el ajuste de los parámetros para obtener una interpolación coherente debía ser muy preciso; siendo habitual la obtención de zonas vacías.

Por último, se valoraron los interpoladores exactos, tanto el IDW como el RBF, siendo con estos con los que se obtuvieron los mejores resultados. Otro motivo para decantarse por los interpoladores exactos es la escasez de datos, ante esta circunstancia se cree importante que la superficie obtenida pase por los puntos conocidos. Ambos ofrecen muy buenos resultados desde el punto de vista matemático, con errores por debajo de 1 m y desviaciones estándar por debajo de los 5 m, por lo que la elección de uno u otro debe basarse en la valoración visual de las superficies obtenidas. En este caso, las superficies obtenidas a través de ambos interpoladores tienen sentido geológico tras realizar algunos ajustes en los parámetros de interpolación, esto hace que para decantarse por la utilización de uno de ellos haya que recurrir a los fundamentos de ambos métodos. Como se vio en el apartado II.3.2, el IDW no calcula valores por encima del valor máximo medido ni por debajo del mínimo, mientras que el RBF sí lo hace, esto conlleva que las superficies obtenidas mediante el RBF tengan una geometría mucho más real desde un punto de vista geológico



(ver Figs. II.11 y II.12). Además, trabajos anteriores como el de Ciotoli, G., et al. (2015) muestran que, aunque similares, los errores obtenidos utilizando RBF son menores que los obtenidos mediante IDW.

Una vez que se ha elegido el interpolador más conveniente, se procede a la generación de las superficies definitivas, en las que ya se tienen en cuenta todos los puntos (exactos, interpretados, inexactos e incoherentes). En el SIG utilizado se dispone de varias funciones de base radial que pueden ser utilizadas para realizar la interpolación, la manera de decantarse por la utilización de una de ellas es mediante la validación cruzada y comparación visual, es decir, se prueba cada una de ellas manteniendo el resto de variables constantes y se confrontan los resultados en la ventana de visualización. En este caso ambos procedimientos revelan que la función más indicada es la multicuádrica. Tras haber elegido la función que se utilizará, es necesario establecer un valor de suavizado para la interpolación, que en este caso se ha establecido en 0; esto se debe a que una superficie muy suavizada no representaría con claridad las fallas y depresiones presentes en esta zona; además, con este valor de suavizado los errores obtenidos son menores. Las últimas variables que se deben definir en la interpolación son el tamaño del círculo de búsqueda de vecindades y la imposición de una tendencia. En este caso se definió un círculo de búsqueda de vecindades cuyo diámetro es de 100 m en el caso de la base de las formaciones superficiales; una elipse cuyo eje mayor mide 150 m y el menor 100 m orientada 50°N en el caso de la base del Paleógeno; y una elipse cuyo eje mayor mide 500 m y el menor 200 m orientada 30°N en el caso del contacto entre la Fm. Oviedo y la Fm. La Argañosa; en todos los casos se realizó una búsqueda de vecindades dividida en ocho sectores, ya que los resultados obtenidos eran mejores tanto visual como matemáticamente respecto a las interpolaciones realizadas sin sectores o utilizando cuatro. Con todas las variables ajustadas, y tras asegurarse de que los errores son mínimos, se obtienen las superficies finales aportadas por la interpolación junto con sus errores medios y sus desviaciones estándar (Fig. III.6). Como se explicó en el apartado II.5, estas superficies deben recortarse para que se ajusten a la realidad.

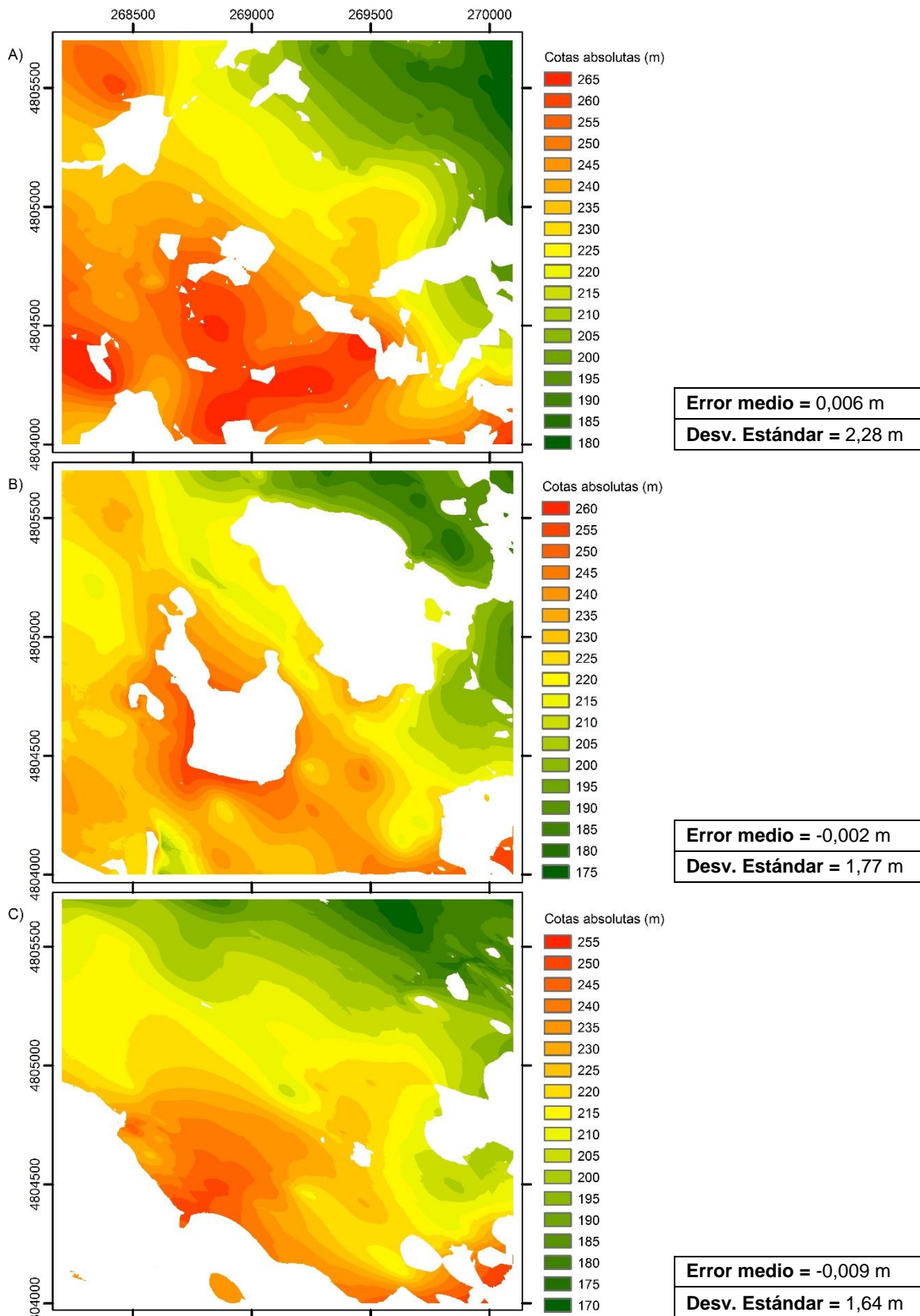


Figura III.6 – Superficies reales junto con los resultados de sus validaciones cruzadas: A) base de las formaciones superficiales; B) base del Paleógeno; C) contacto Fm. Oviedo - Fm. La Argañosa.



III.3. Cartografía geológica

En cuanto a la cartografía geológica, se ha procurado elaborar un mapa geológico más detallado de la zona, aprovechando la disponibilidad de un mayor número de datos respecto a los utilizados en publicaciones anteriores. Se dispuso concretamente de 952 puntos de información (Figura II.7), con los cuales se ha podido realizar un mapa de afloramientos bastante detallado. Además, en este trabajo se ha conseguido mejorar la cartografía ya que las interpolaciones permiten tener en cuenta la morfología de la superficie topográfica de manera más precisa, haciendo que los afloramientos representados se ajusten más a la realidad que los de los mapas previos de la zona. Los mapas tomados como referencias previas fueron el publicado por Claverol y Torres (1995) –a escala aproximada 1:14.000 (Fig. III.7A) y el mapa realizado por el IGME dentro del plan GEODE a escala 1:50.000 (Fig. III.7B). Analizando ambos mapas, se observa que el mapa del año 1995 presenta unos afloramientos delimitados de manera muy precisa, similares a los obtenidos en este trabajo, siendo las principales diferencias entre ambos, resultado de la disponibilidad de nuevos datos y del uso de interpoladores. Por otro lado, el mapa más reciente coincide en los rasgos generales de los afloramientos, aunque las diferencias entre este y la cartografía realizada son mayores, posiblemente como consecuencia de su mayor escala.

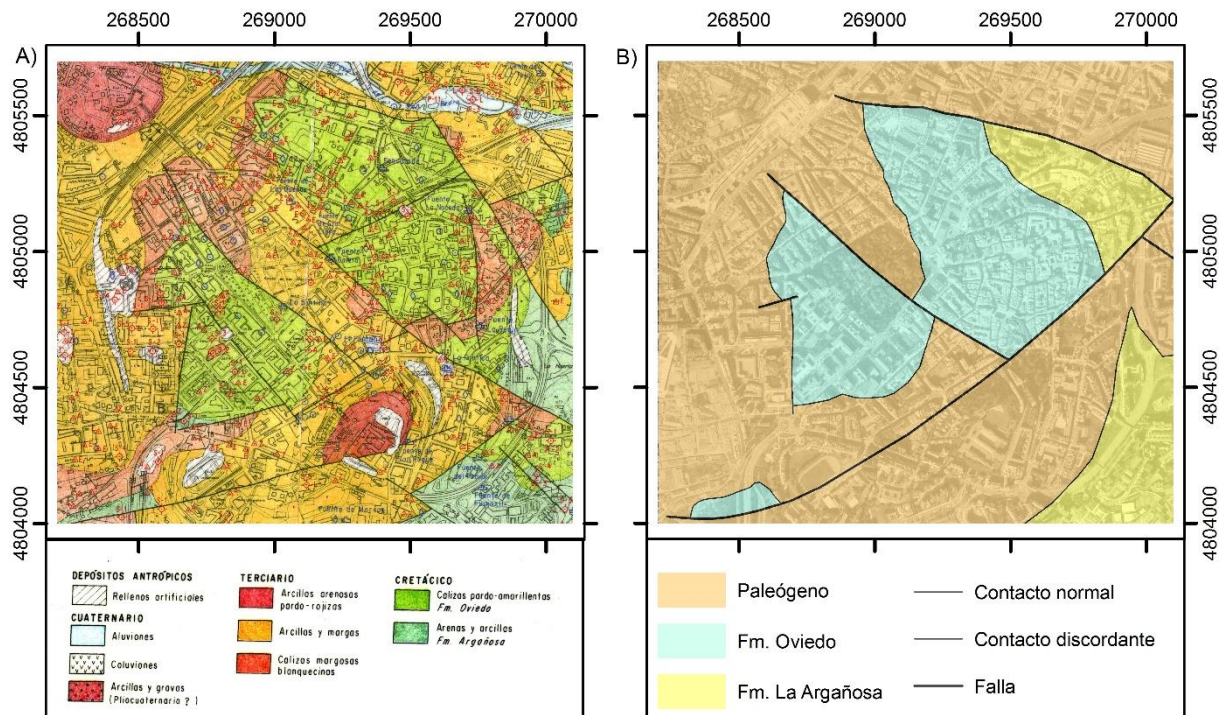


Figura III.7 – A) mapa de Claverol y Torres (1995); B) cartografía geológica del GEODE.



En este trabajo se propone una nueva solución para la cartografía geológica de la zona. Se trata de un mapa a escala 1:15.000 (Fig. III.8) en el que, gracias al mayor número de datos disponibles y al uso de interpoladores, se consigue una mayor precisión en los límites de los afloramientos.

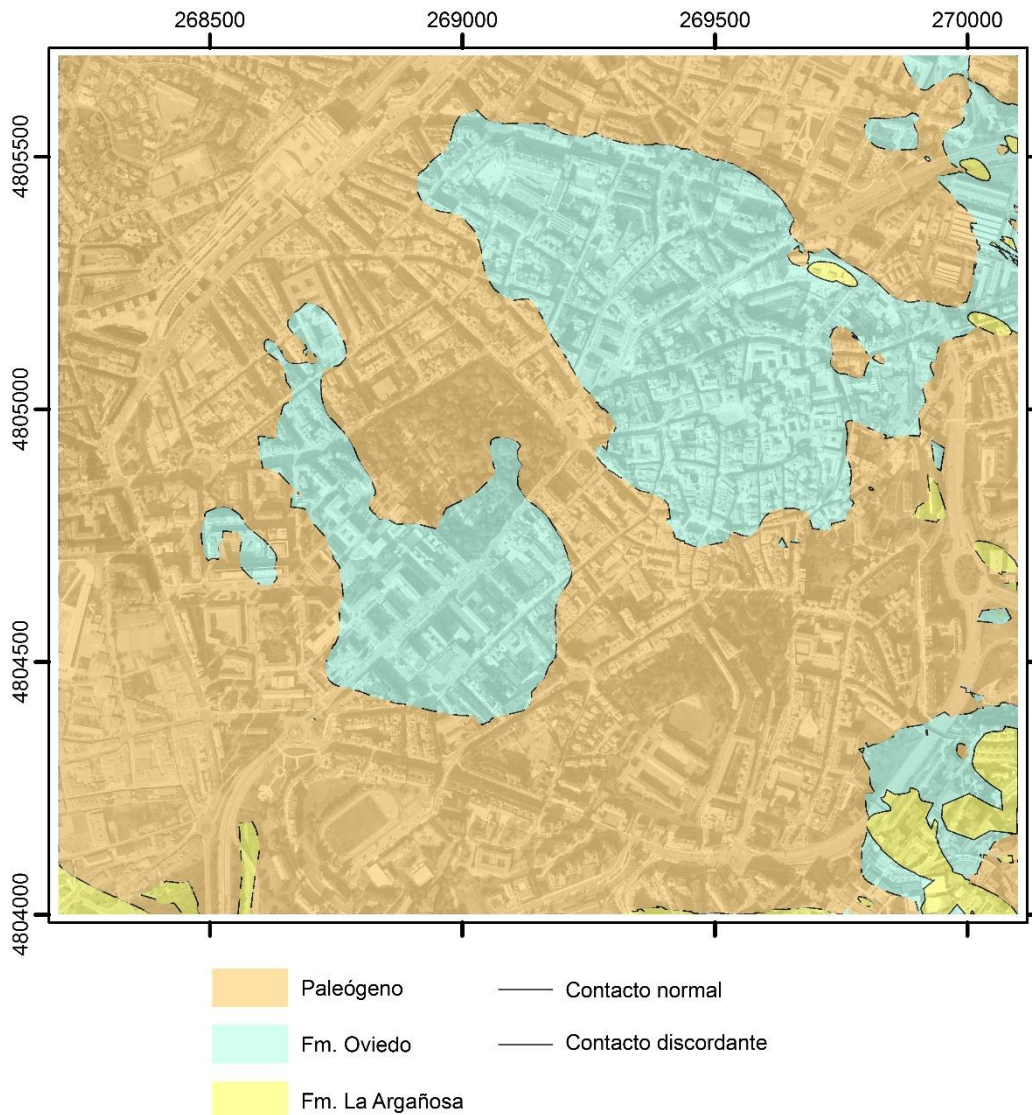


Figura III.8 – Afloramientos definidos mediante las interpolaciones.

Analizando este mapa se observa que, en rasgos generales, coincide con los mapas previos de la zona, aunque hay algunas diferencias apreciables. Sin tener en cuenta la cobertura de formaciones superficiales, el sustrato inmediatamente bajo la ciudad en la zona de estudio está dominado por los materiales paleógenos, los cuales ocupan un área de 2,32 km²; el resto corresponde a materiales cretácicos, siendo el rasgo más característico la presencia de dos afloramientos aislados de Fm. Oviedo en el centro. El más oriental se extiende por el casco antiguo de la ciudad y por todo el área comprendido entre las calles



Uría y General Elorza, llegando casi hasta la Avenida de Santander. El otro gran afloramiento de esta formación se extiende desde la calle Fruela hacia el sur, abarcando los extremos este y sur del Parque San Francisco; desde ahí se extiende hacia el NO por la zona de Llamaquique y llegando hasta el hotel Reconquista. Otro afloramiento cretácico destacable (formaciones La Argañosa y Oviedo) es el que aparece en el extremo SE de la zona de estudio, donde se observa cómo las diferencias de cota entre los sondeos y la topografía (ver subapartado II.3.1) provoca que, una zona en la que la primera unidad cortada por los sondeos es la Fm. Oviedo, aparezca definida como una zona de afloramiento de la Fm. La Argañosa (Fig. III.9).

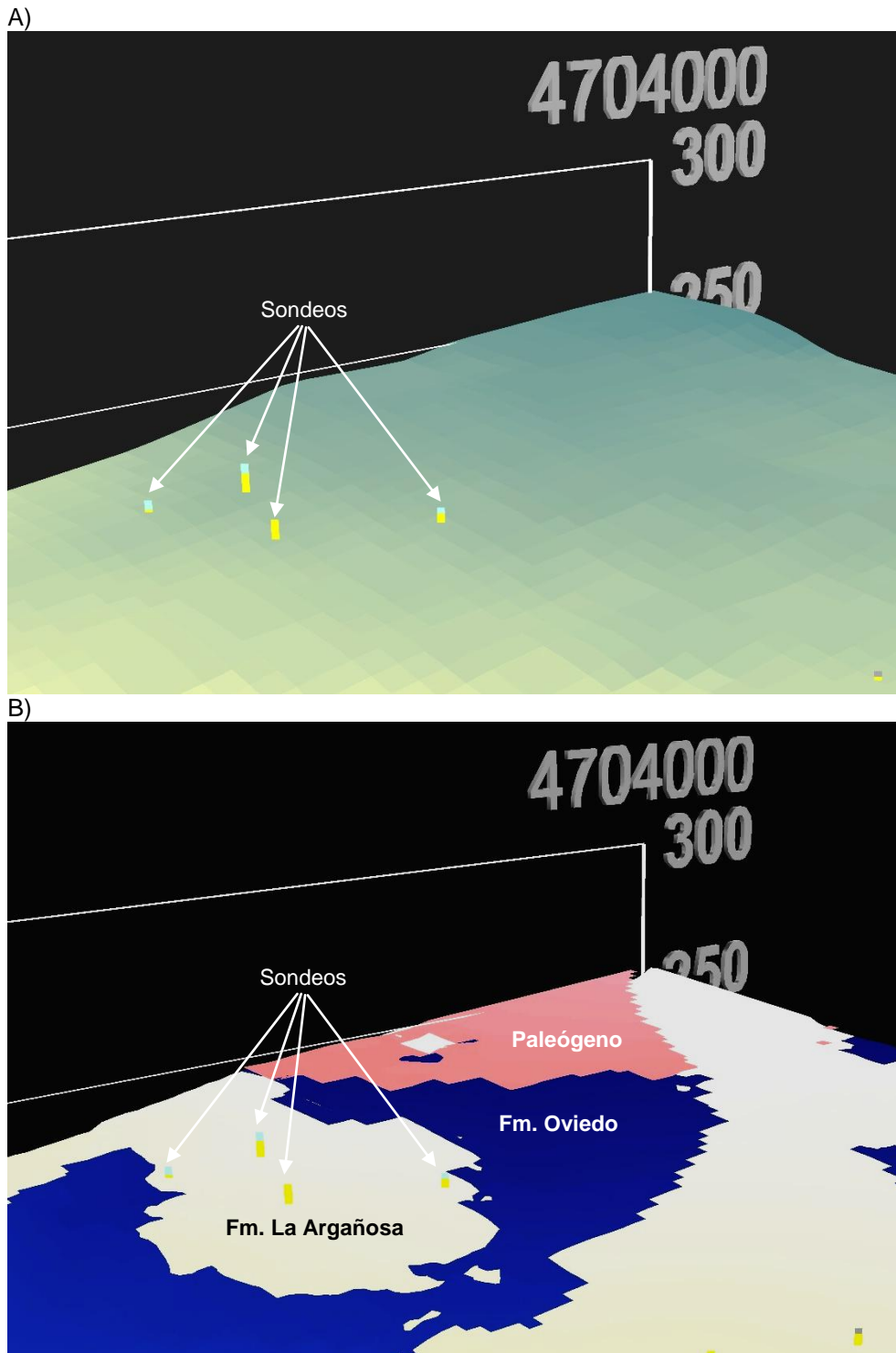


Figura III.9 – A) Ejemplo de sondeos desfasados con la topografía; y B) contradicciones generadas entre la información recogida en los sondeos y los resultados de las interpolaciones.

Además de estos afloramientos principales, en la zona se encuentran pequeños afloramientos cretácicos aislados, como los definidos en el extremo NE tanto de Fm. Oviedo como de Fm. La Argañosa, el de Fm. Oviedo situado bajo el Centro Cívico Comercial (Llamaquique) o el de Fm. La Argañosa que se encuentra en la plaza de Castilla. Un caso



diferente es el afloramiento de arenas cretácicas que se sitúa en la trinchera del ferrocarril Gijón-León, al sur de la plaza de Castilla; en este caso el afloramiento se debe a la excavación de la trinchera, por tanto es de origen artificial. Todos estos afloramientos cretácicos cubren un área de 0,92 km², de los cuales el 91% son de Fm. Oviedo y el 9% de Fm. La Argañosa.

Cubriendo todo lo descrito anteriormente se disponen las formaciones superficiales (rellenos antrópicos y suelos naturales de origen aluvial y eluvial). Al tratarse de una zona urbana, toda ella está cubierta por, al menos, unos decímetros de materiales antrópicos. Esto no se ha podido modelar con exactitud, ya que ante la escasez de datos en algunas zonas la interpolación predice la ausencia de estos materiales (Fig. III.10).



III.4. Aportaciones sobre las unidades geológicas

Una de las principales aportaciones de este trabajo es el estudio de la geometría de las unidades geológicas, es decir, se abordó el cálculo de los espesores y la continuidad lateral de las mismas. A continuación, se describirán las principales características de cada una de las unidades diferenciadas.

III.4.1. Formaciones superficiales

Las características en superficie de las formaciones superficiales ya se han expuesto en el apartado anterior (III.3). Si se analizan los resultados obtenidos en profundidad es posible determinar el espesor de estos materiales a lo largo de toda la zona, así se aprecia que el espesor máximo de estos materiales alcanza los 18,5 m, estando este valor, casi con total seguridad, sobreestimado como consecuencia de la falta de datos o de los desfases descritos anteriormente entre los sondeos y la topografía (Fig. III.10). En dos partes muy localizadas de la zona estudiada se encuentran espesores importantes de sedimentos aluviales y lacustres, hasta 9 m, mientras que los materiales eluviales no alcanzan espesores muy importantes. Los materiales mayoritarios dentro de estas formaciones superficiales son los rellenos antrópicos, cuyos espesores pueden superar los 10 m. Para resaltar las zonas de la ciudad en las que estos materiales podrían suponer un problema, se ha obtenido un mapa en el que se representan las zonas en las que su espesor supera los 3 m, ya que este valor supone un cambio en la clasificación del terreno según el CTE (Código Técnico de la Edificación) (Fig. III.11).

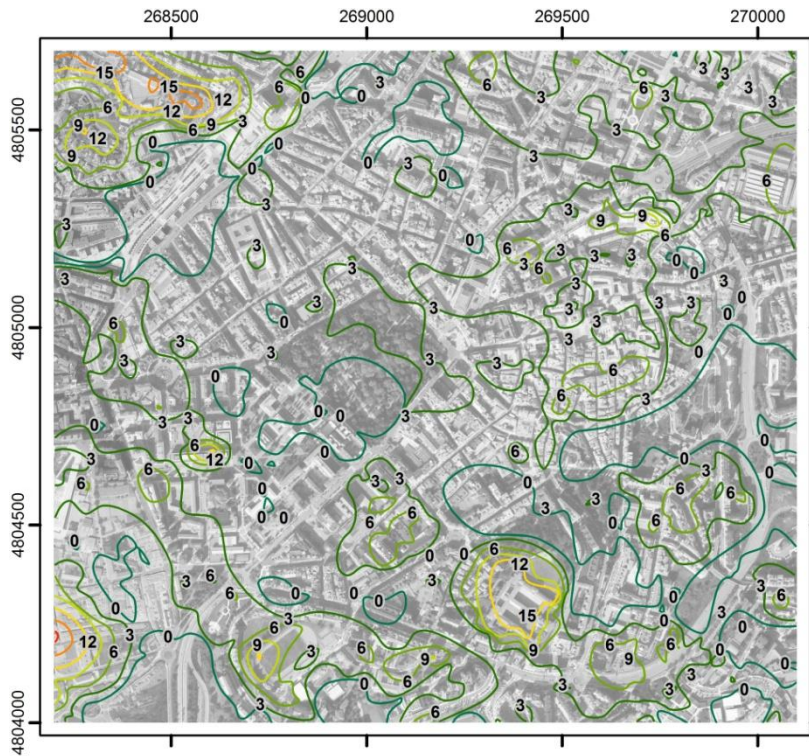


Figura III.10 – Mapa de isopacas de las formaciones superficiales.

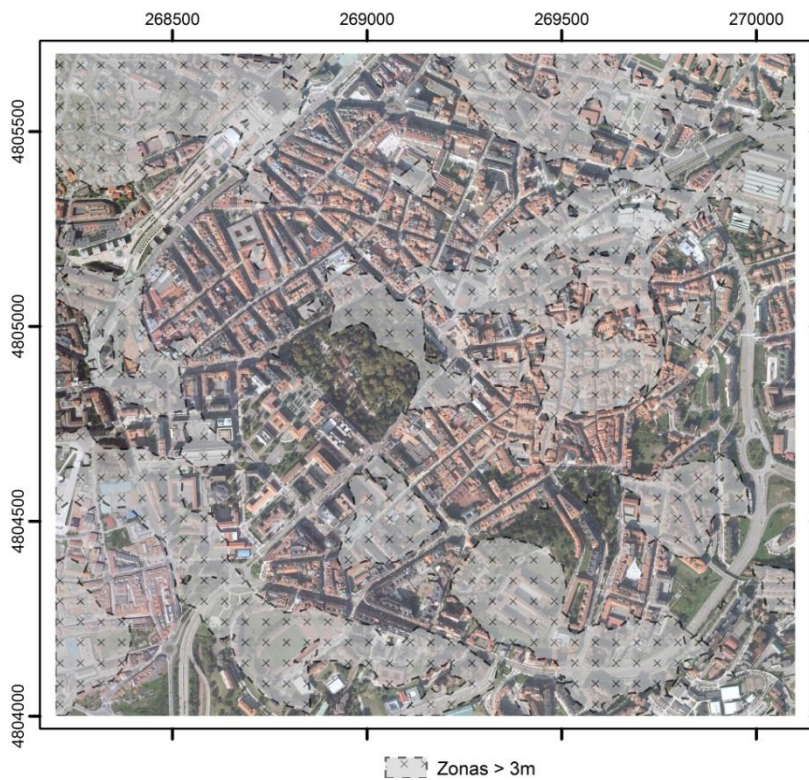


Figura III.11 - Zonas de la ciudad en las que se encuentran más de 3 m de formaciones superficiales.



III.4.2. Paleógeno

Los materiales paleógenos cubren la mayor parte de la zona de estudio, sin tener en cuenta las formaciones superficiales, y se encuentran a profundidades que varían desde 18 m cuando aparecen bajo importantes rellenos, hasta aflorar en otras zonas (Fig. III.12). En profundidad alcanzan espesores de hasta 40 m, dándose esta potencia de manera puntual en el extremo SO de la zona de estudio. En el resto de la zona la potencia de esta unidad varía desde unos 15 m - 20 m hasta no encontrarse, dejando aflorar las rocas cretácicas. Una característica importante de esta unidad que se ha podido describir con detalle en este trabajo es su base irregular. Como se explicó en el apartado I.2.2., el contacto entre el Paleógeno y el Cretácico es disconforme debido al desarrollo de un paleorrelieve sobre las rocas cretácicas, esto genera que los sedimentos paleógenos presenten importantes cambios de espesor en cortas distancias (Fig. III.12). Esta erosión llega a ser tan importante que la unidad superior del Cretácico, la Fm. Oviedo, ha sido erosionada por completo en algunas zonas, lo que conlleva que los sedimentos paleógenos se apoyen directamente sobre la siguiente unidad cretácica, la Fm. La Argañosa; esta circunstancia se da en todo el extremo O-SO de la zona y, puntualmente, en el extremo NE (Fig. III.13). Una característica que se ha constatado, es que en las zonas donde la Fm. Oviedo ha sido erosionada por completo, el conglomerado basal del Paleógeno presenta espesores más importantes, pudiendo superar los 15 m. Es algo coherente dado que dicho conglomerado se ha desarrollado a expensas del desmantelamiento de la caliza cretácica.

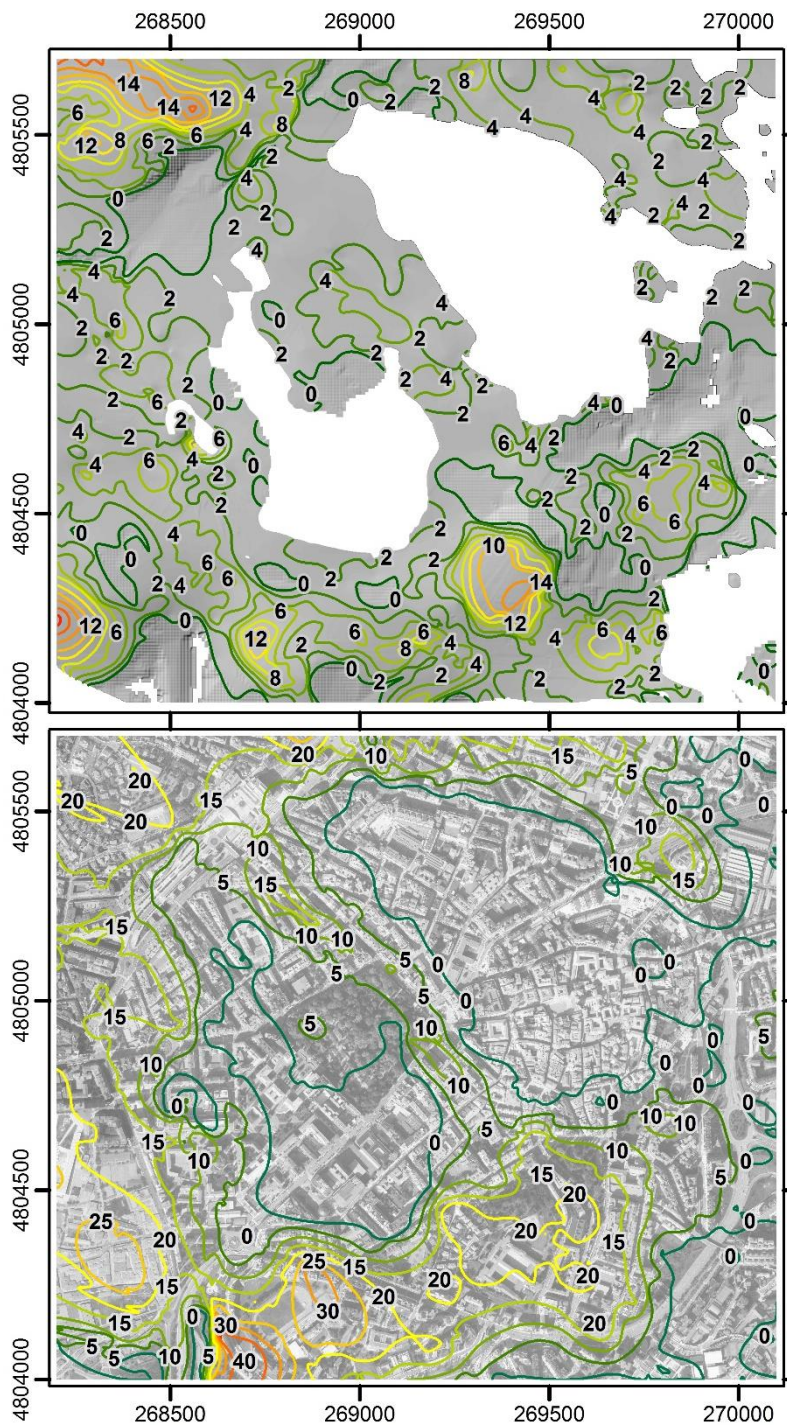


Figura III.12 – Geometría del Paleógeno: mapa de isobatas del techo (arriba) e isopacas (abajo).

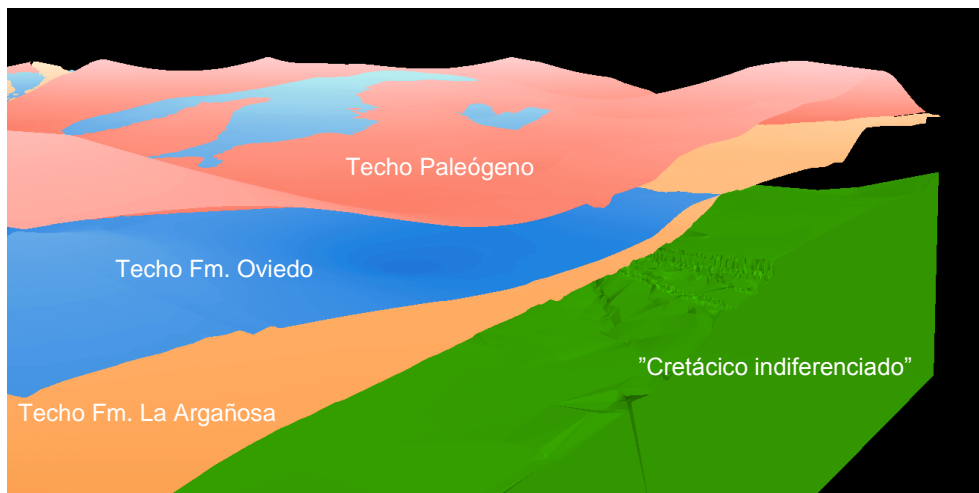


Figura III.13 – Detalle del extremo SO, donde se observa la ausencia de la Fm. Oviedo y, por lo tanto, los sedimentos paleógenos en contacto con la Fm. Argañosa (exageración vertical x3).

III.4.3. Fm. Oviedo

Su posición en profundidad es muy variable, pudiendo encontrarse en superficie, en los afloramientos descritos en el apartado III.3, y hasta 38 m de profundidad bajo sedimentos paleógenos (Fig. III.14). En cuanto a su geometría, es muy irregular, su espesor varía entre un máximo de 32 m y puede llegar a desaparecer por completo a causa de la erosión ya mencionada; aunque este valor máximo se reduce al extremo NO de la zona y puede estar exagerado por la falta de datos, siendo su máximo espesor de unos 15 m, en general. Esta variación de espesor no se produce gradualmente entre unas zonas y otras si no que, al igual que en el caso del Paleógeno, la erosión sufrida hace que los cambios de espesor sean rápidos y no sigan ningún patrón (Fig. III.14). La determinación de la posición y geometría de esta unidad es especialmente relevante, ya que representa un nivel de cimentación utilizado históricamente en la ciudad; además, por debajo de esta aparece la unidad arenosa de La Argañosa, cuyas características geotécnicas son mucho peores, lo que hace mucho más problemática la realización de cualquier obra subterránea por debajo de la Fm. Oviedo.

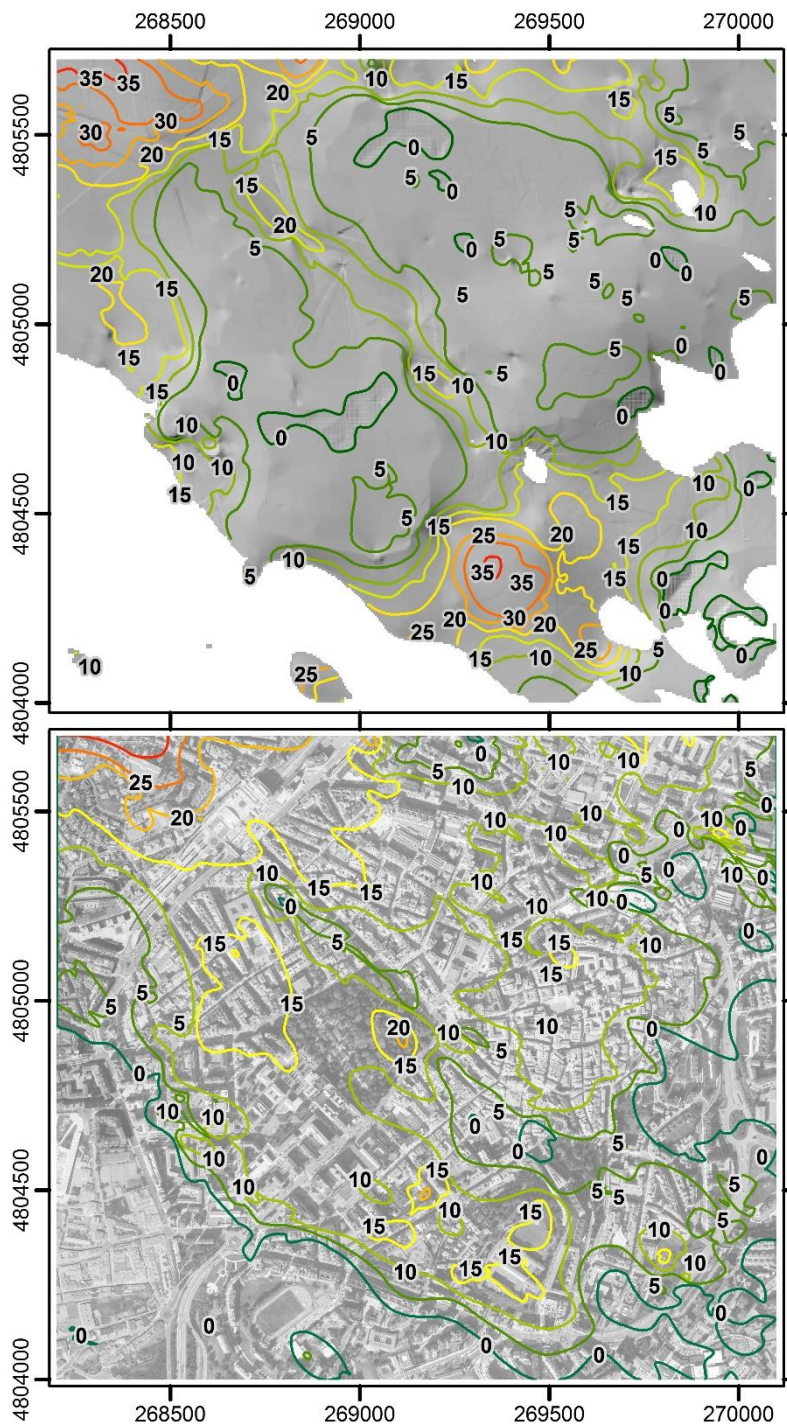


Figura III.14 – Geometría de la Fm. Oviedo: mapa de isobatas del techo (arriba) e isopacas (abajo).



III.4.4. Fm. Argañosa

Esta unidad sólo se seccionó completa en tres sondeos, por lo que la información en cuanto a su potencia es escasa, únicamente es posible indicar que está entre los 35 m y los 40 m. En cuanto a su posición en profundidad, puede encontrarse en superficie en los escasos afloramientos descritos anteriormente, y a profundidades de hasta 70 m cuando está localizada bajo los sedimentos paleógenos y la Fm. Oviedo (Fig. III.15).

Por último, en los tres sondeos que cortan la Fm. La Argañosa completa, se llega a identificar la Fm. San Lázaro, pero no se dispone de ningún otro dato sobre ella por lo que no es posible realizar valoraciones de su geometría.

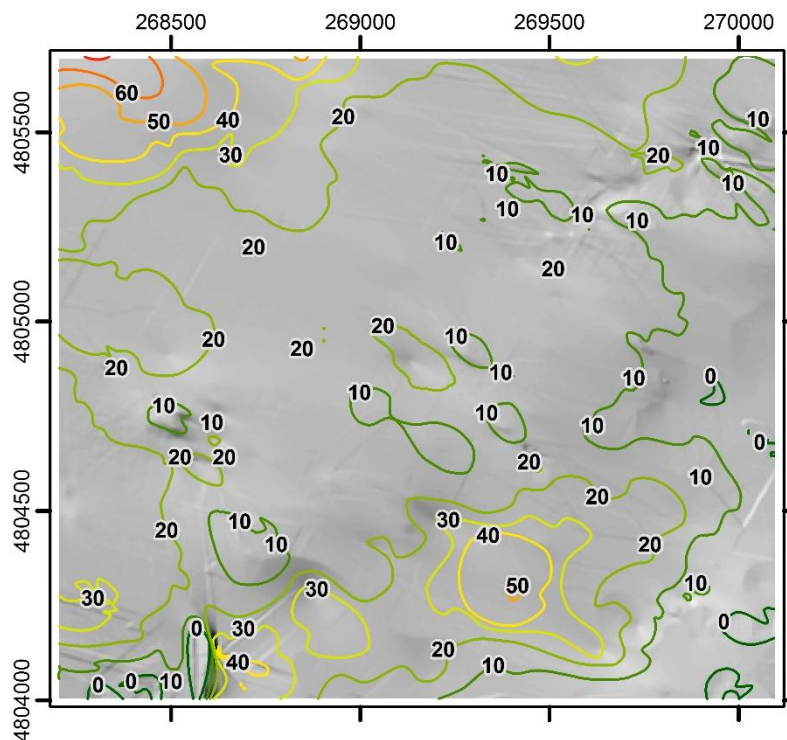


Figura III.15 – Mapa de isobatas del techo de la Fm. Argañosa.



III.5. Aportaciones sobre estructura

La interpretación de las fallas presentes en esta zona, y de su estructura en general, ha sufrido variaciones reflejadas en las diversas cartografías geológicas elaboradas para el núcleo urbano. En esta investigación se pretendió apoyar la interpretación en algo más que los afloramientos y los cambios de espesor, los cuales pueden llevar a interpretar fallas donde podría no haberlas. Trabajar en 3D permite tener en cuenta la geometría de las unidades en profundidad, permitiendo comprobar si los cambios de espesor detectados en el Paleógeno están relacionados con un salto en las unidades cretácicas o si están originados por depresiones del paleorrelieve meso-terciario.

Estructuralmente los materiales en la zona de estudio muestran buzamientos suaves, de entre 5° y 20°, con orientaciones variables aunque con una tendencia general de buzamiento suave hacia el E-NE. El otro rasgo estructural predominante es la presencia de numerosas fallas normales que compartimentan la sucesión estratigráfica, originando patrones de afloramiento irregulares y que no se corresponden con la topografía (Fig. III.16) Algunas de estas fallas además pudieron haber sido reactivadas durante el periodo compresivo alpino (apartado I.2.3), por lo que algunas podrían poseer rejuego.

III.5.1. Fallas

En publicaciones y mapas geológicos anteriores se interpretaron un número variado de fallas en la zona con la suficiente escala como para ser cartografiadas, siendo los criterios para reconocerlas los afloramientos cretácicos y los cambios de espesor identificados en los depósitos paleógenos. En este trabajo, tras investigar la geometría de las unidades, se ha optado por eliminar algunas fallas previamente deducidas, se ha modificado el trazado de otras, e incluso se han interpretado algunas nuevas. El resultado es una estructura compartimentada por dos familias de fallas, unas de dirección NE-SO y otras de dirección NO-SE. Los criterios para la identificación, definición y ubicación de estas fallas han sido los afloramientos cretácicos y la detección de saltos bruscos en las superficies modeladas. Los cambios de espesores no se han tenido en cuenta para identificar fallas ya que pueden llevar a errores al confundirse con el paleorrelieve. Para la identificación de fallas se han utilizado dos superficies: el contacto Fm. Oviedo - Fm. La Argañosa y la base del Paleógeno; de esta manera se consigue ver todas las irregularidades presentes en la sucesión estudiada. Cabe señalar al respecto que en este trabajo no se han diferenciado los tramos de los materiales paleógenos, por lo que no se han podido identificar fallas potenciales por encima de la base de esta unidad, es decir, las fallas descritas afectan únicamente a las unidades cretácicas. Por otro lado, únicamente se han representado las fallas más importantes, cuyo salto vertical se estima por encima de 10 m. Una última observación en cuanto a la estructura de la zona es



que las superficies obtenidas hacen pensar que la zona está afectada por multitud de fallas menores que provocan saltos de unos pocos metros, pero la escala de trabajo no permite representarlas con precisión.

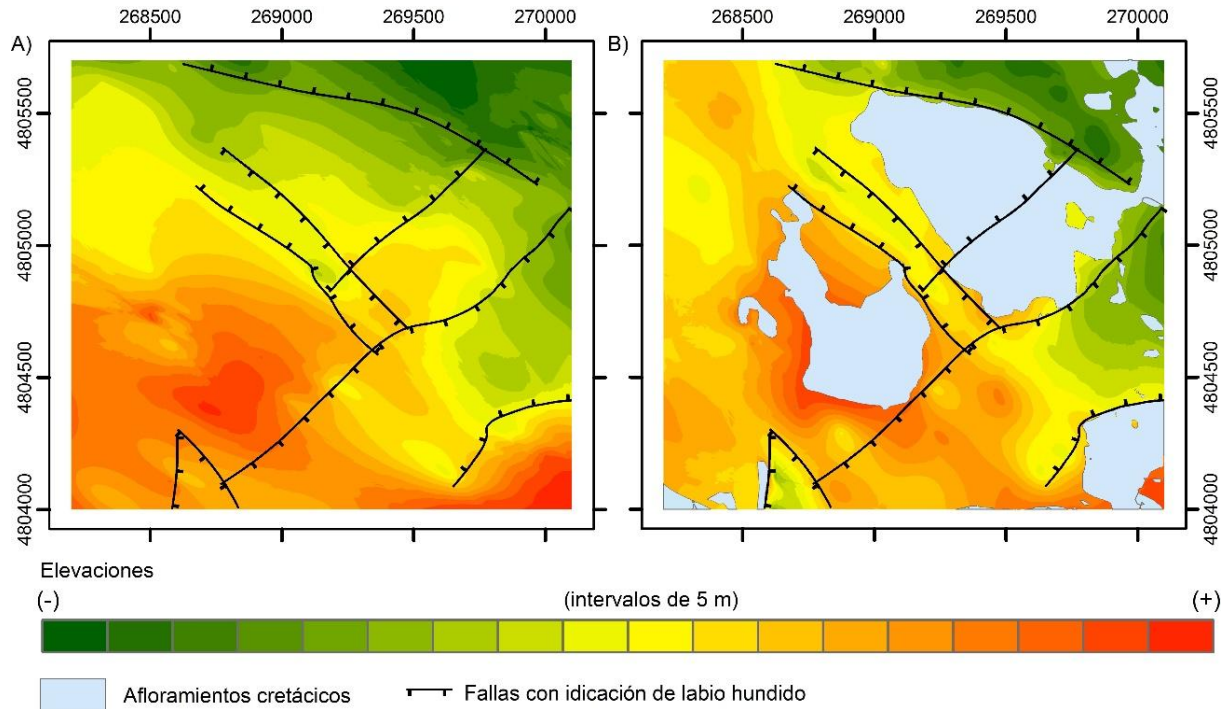


Figura III.16 – Principales fallas identificadas en la zona. A) Fallas interpretadas utilizando el muro de la Fm. Oviedo; B) confirmación de la presencia de estas fallas en la base del Paleógeno y su ajuste con los afloramientos cretácicos.

Una vez deducidas las principales fallas, estas pueden ser añadidas al mapa de afloramientos, obteniendo así el mapa geológico final propuesto para el centro de la ciudad de Oviedo (Fig. III.17), que en este caso se trata de un mapa a escala 1:15.000.

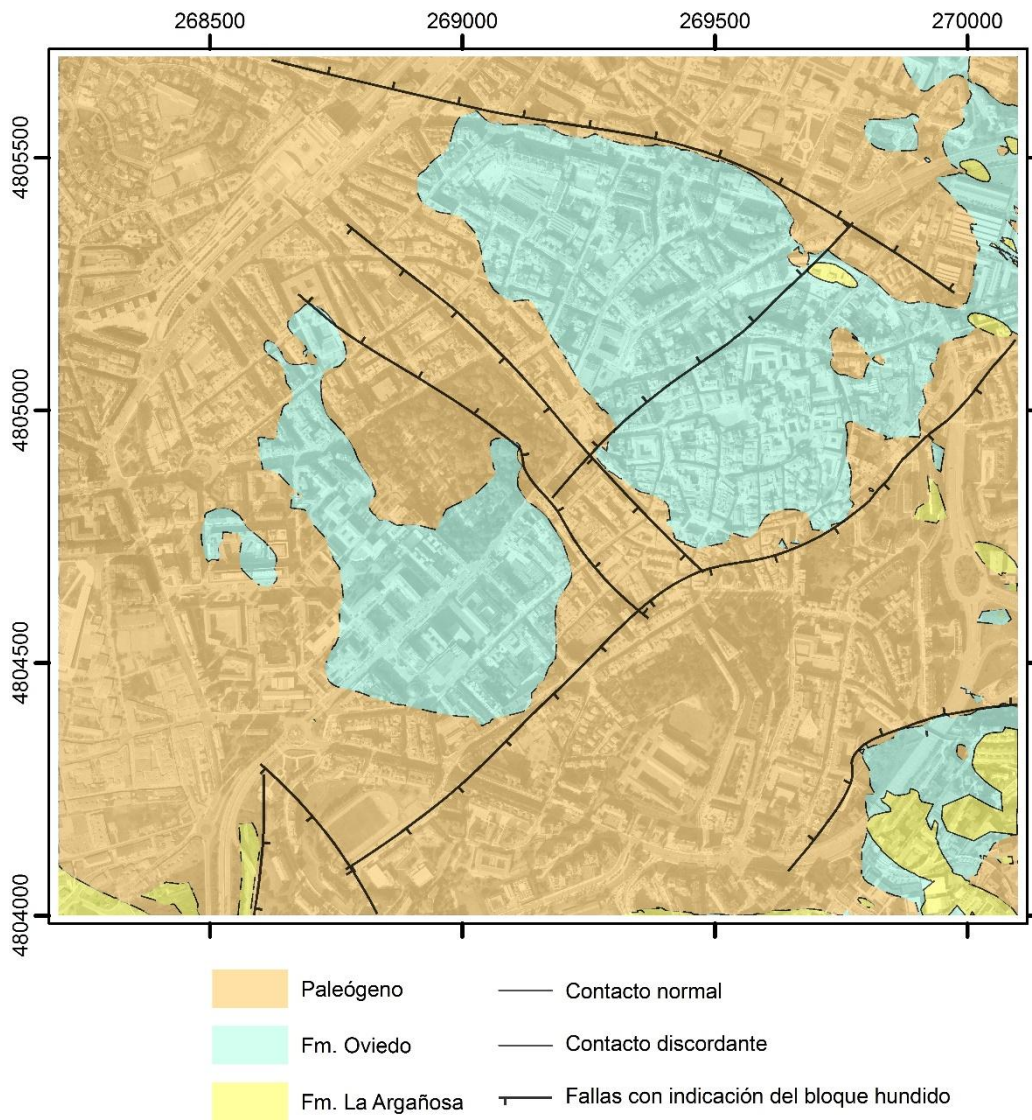


Figura III.17 – Mapa geológico final propuesto (1:15.000).



III.5.2. Paleorelieve meso-terciario

Cómo se ha explicado en el apartado I.2.1, el contacto entre las rocas cretácicas y los materiales paleógenos es disconforme. Uno de los objetivos marcados para este trabajo era definir con mayor exactitud la geometría de este paleorreliete, diferenciando cambios de espesor en el Paleógeno generados por fallas y cambios de espesor como consecuencia del mismo. Esto se ha conseguido en parte, ya que algunas depresiones importantes detectadas en el Paleógeno no se reproducen en las rocas subyacentes (Fig. III.17). Estas depresiones en las que la base del Paleógeno se hunde pero el muro de la Fm. Oviedo se mantiene constante, se deben a la formación de áreas deprimidas durante este periodo erosivo. La presencia de estos grandes socavones en la sucesión cretácica ha sido documentada previamente, ya que en algunas zonas de la ciudad se pueden identificar en superficie (apartado I.3.2); en este caso se ha podido detectar su presencia en profundidad. Debido a la escala de trabajo solamente se pudo discriminar con claridad las depresiones de mayor tamaño; pero todo indica que si se disminuye la escala aparecerán pequeñas depresiones que generan cambios de espesor de escasos metros. Como se expuso en el apartado III.4.2, las zonas donde la Fm. Oviedo ha sido erosionada están relacionadas con espesores mayores del conglomerado basal paleógeno, por lo tanto, la identificación de espesores importantes de este conglomerado, se puede asociar a zonas en las que la erosión ha sido más importante y en las que cabe esperar que la Fm. Oviedo presente espesores menores o incluso no aparezca.

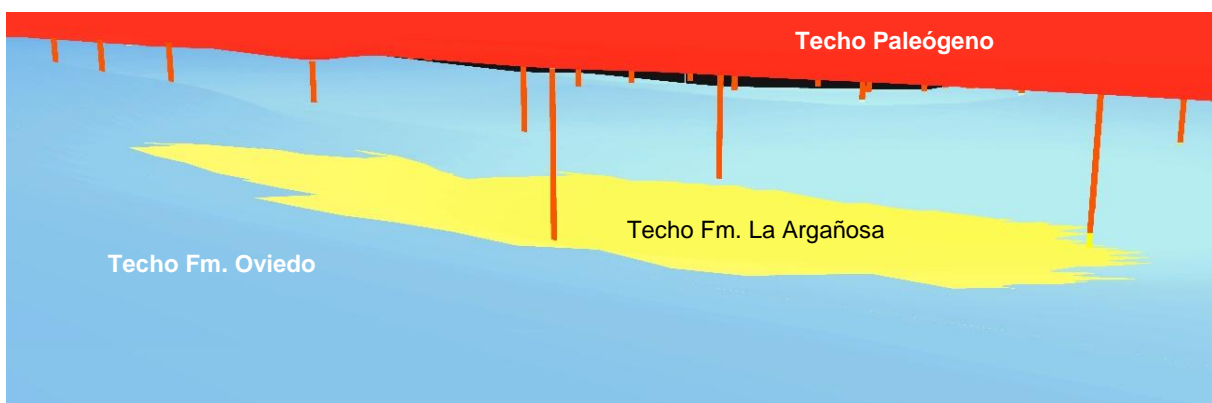


Figura III.17 – Ejemplo de aumento de espesor del Paleógeno no relacionado con un salto de falla que afecte al Cretácico (en este caso llegando a erosionar la Fm. Oviedo por completo).



III.6. Modelo 3D

El último objetivo de este trabajo consistía en la realización de un modelo 3D de la zona seleccionada de la ciudad. Finalmente, el resultado obtenido es un bloque 3D con las mismas dimensiones en planta que la zona de estudio definida en el apartado I.1.1 (1,9 km × 1,7 km), y que se extiende en profundidad hasta una cota de 100 msnm, lo que supone una profundidad máxima de 168 m bajo la superficie (Fig. III.19). En el modelo se representan, además de las diferentes unidades identificadas en el subsuelo, las construcciones situadas en el área de estudio agrupando los edificios por manzanas con sus alturas medias, lo que hace más fácil la interpretación del modelo geológico, ya que sirven como escala visual. El hecho de representar los edificios según sus usos, y de añadir zonas verdes y fuentes, dota al modelo de un mayor realismo y lo hace más atractivo; aparte de permitir al observador que conoce la ciudad una mayor facilidad para situarse espacialmente. Detalles adicionales como la representación de túneles o de las excavaciones más importantes contribuyen a aumentar el nivel de detalle del modelo y por lo tanto su calidad.

Esta representación de las estructuras tanto en superficie, como algunas de ellas en profundidad, no pretende desviar la atención de la parte geológica del modelo, por ello, se ha organizado la visualización del mismo en capas, las cuales se pueden activar o desactivar para visualizar más fácilmente unas partes u otras del modelo (Figs. III.20 – III.24). El modelo consta de seis capas comenzando desde la más superficial; la primera incluye la topografía y todas las estructuras representadas, tanto superficiales como subterráneas, a esta capa de información se la ha nombrado 'Geografía'. Las cuatro capas siguientes se corresponden con las unidades geológicas diferenciadas: techo del Paleógeno, techo de la Fm. Oviedo y techo de la Fm. La Argañosa. Por último, se ha incluido una última capa por debajo de la Fm. La Argañosa a la que se ha denominado 'Cretácico indiferenciado'; esta última capa corresponde a la Fm. San Lázaro en casi todo el modelo, excepto en el extremo SO, donde puede incluir a la Fm. Latores. Al no disponer de datos que permitan asegurar la posición del contacto entre ambas formaciones se opta por esta denominación de Cretácico indiferenciado. Además, la mayoría de obras realizadas por el hombre en zonas urbanas no afectan a profundidades superiores a los 40-50 m (Rogers y Horseman, 1999), por lo que la precisión del modelo a mayores profundidades pierde importancia.

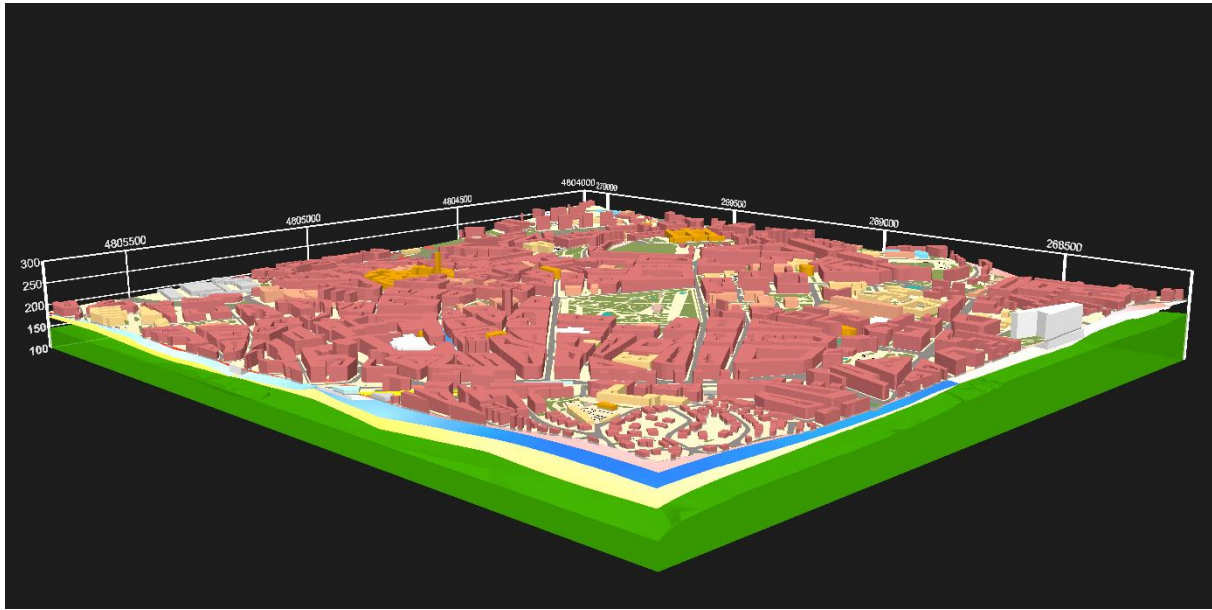


Figura III.19 – Vista general del modelo 3D.

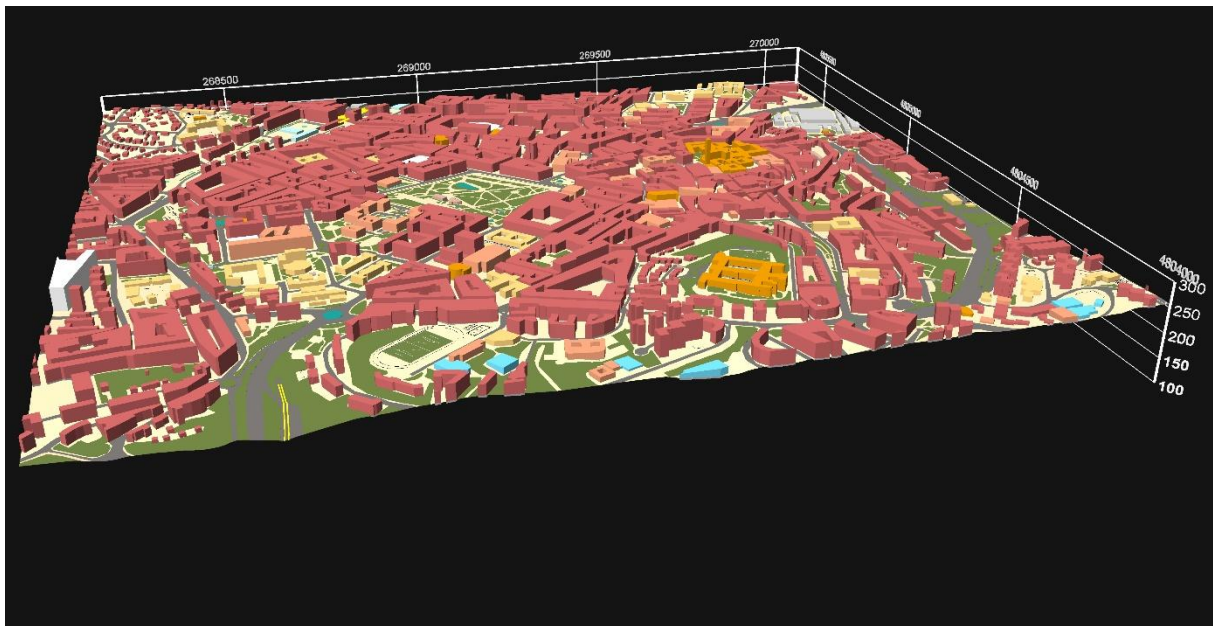


Figura III.20 – Vista general de la capa “Geografía” desde arriba.

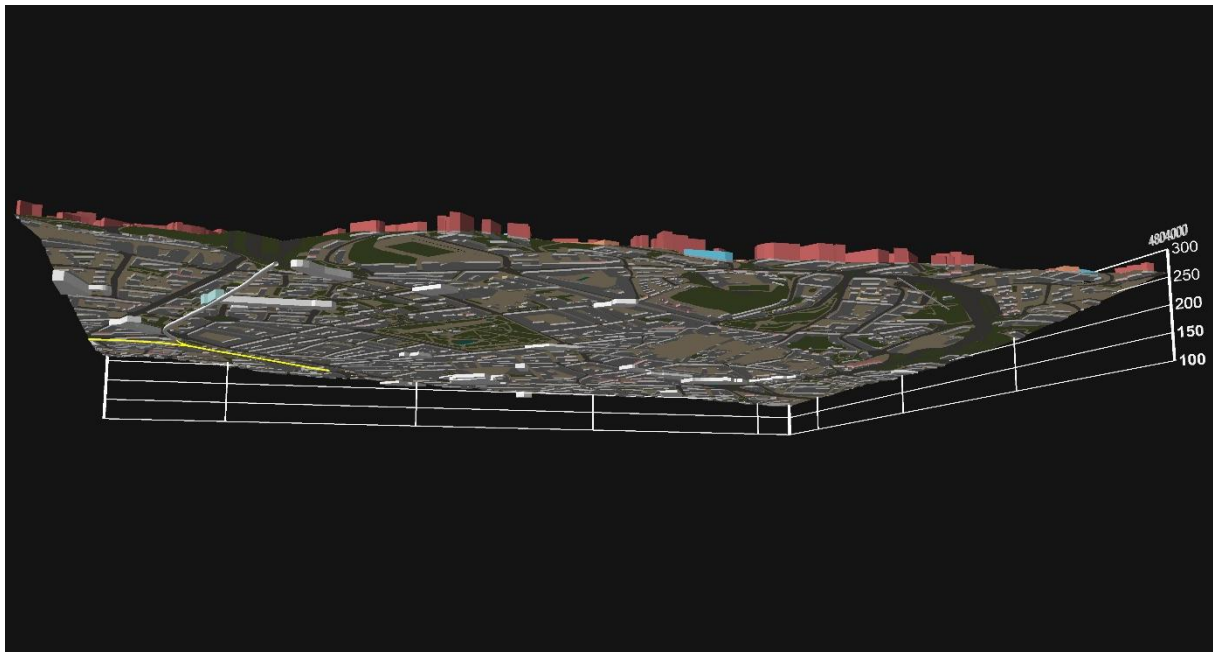


Figura III.21 – Vista general de la capa “Geografía” desde abajo.

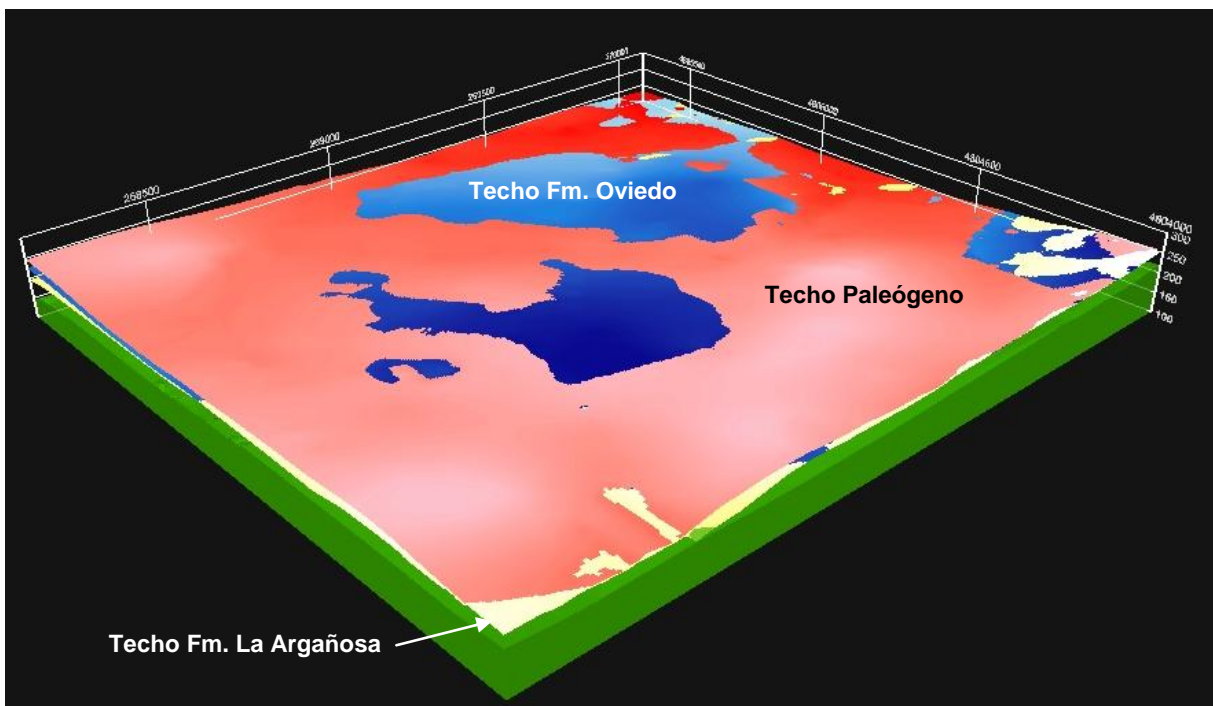


Figura III.22 – Vista general de todas las superficies geológicas.

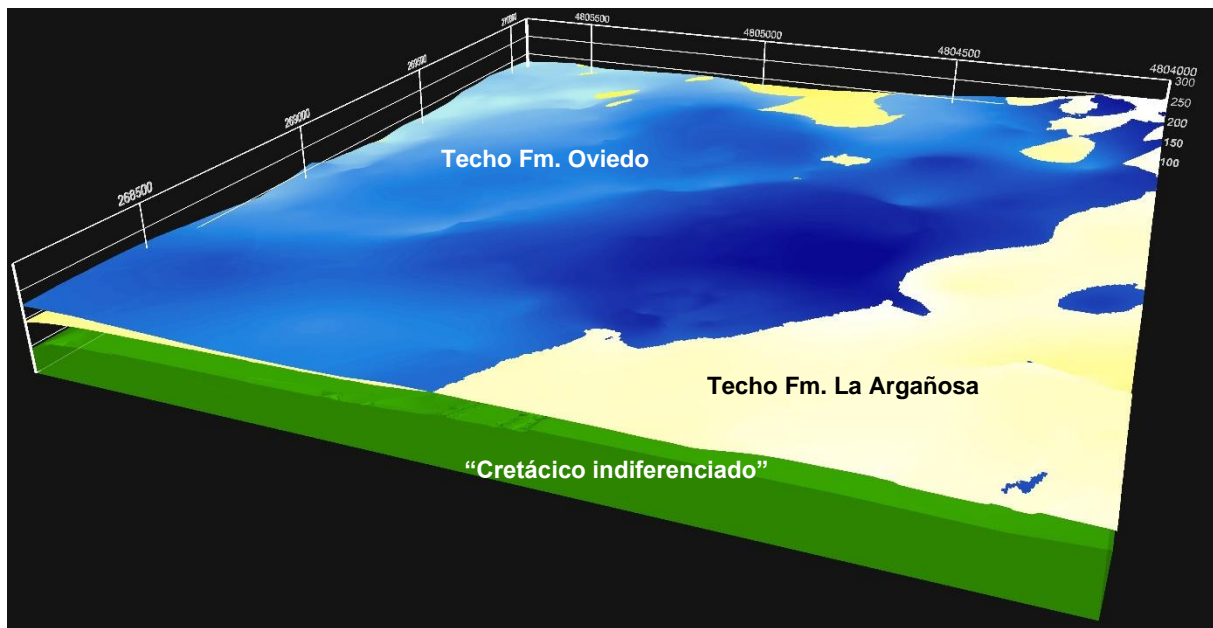


Figura III. 23 – Vista general del contacto entre la Fm. Oviedo y la Fm. La Argañosa, en la que se aprecian las zonas en las que la Fm. Oviedo ha sido totalmente erosionada.

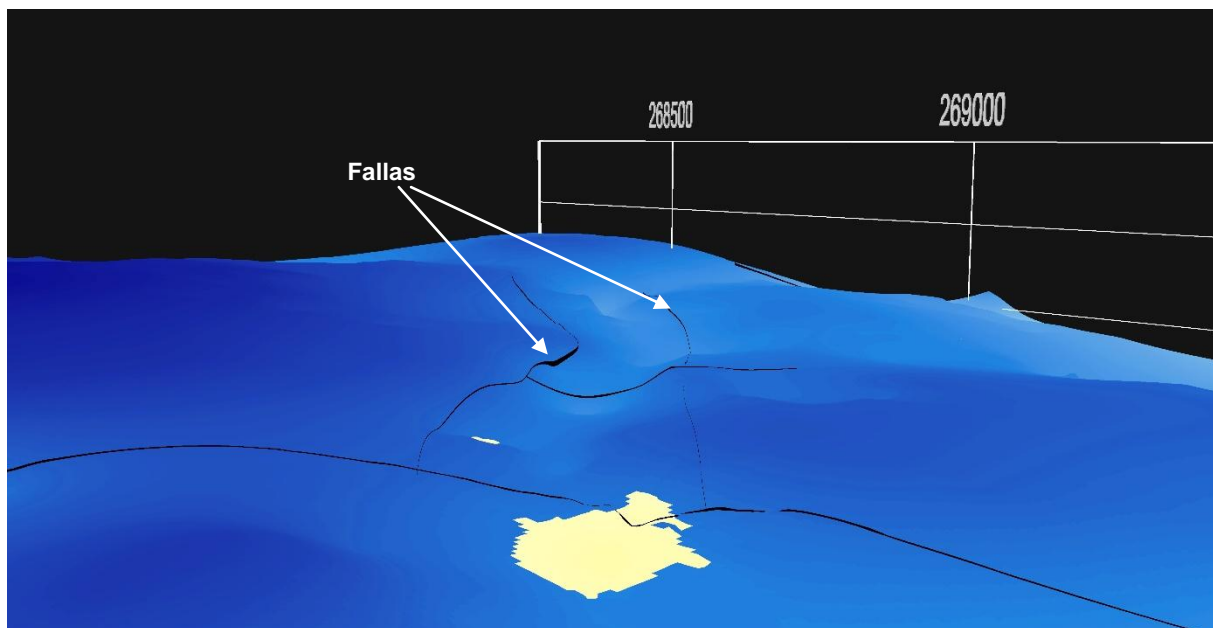


Figura III.24 – Vista de detalle de la depresión limitada por fallas que ha sido identificada bajo la zona de la calle Uría.



IV. CONCLUSIONES

Del desarrollo de este trabajo y tras analizar los resultados obtenidos pueden extraerse las siguientes conclusiones:

- La obtención de un Modelo Digital de Elevaciones que sirva de soporte para una zona urbana no es una tarea sencilla, dado que se necesitan datos con una precisión suficiente como para no comprometer el modelo geológico 3D en el cual pequeñas variaciones de altura pueden ser inadmisibles; sobre todo en casos como Oviedo donde las unidades del subsuelo son subhorizontales y el relieve de la ciudad presenta fluctuaciones importantes. Además, en las zonas urbanas son habituales los movimientos de tierras, por lo que la topografía varía incluso en periodos cortos de tiempo, lo que conlleva que los datos pierdan representatividad al cabo de pocos años. En esta investigación se analizaron tres MDE de diversa procedencia, año y escala (1:5.000, 1:1.000) y precisión altimétrica. Las debilidades que se encontraron fueron: desactualizaciones y elementos del relieve ya inexistentes, puntos de cota erróneos, y en el modelo más detallado tal densidad de datos que su filtrado para eliminar artefactos (vehículos, fuentes, etc.) resultaba demasiado laborioso. Como consecuencia de toda esta problemática, se optó por utilizar datos a escala 1:1.000 más precisos que los 1:5.000 (más actuales) y menos susceptibles a los artificios que los de procedencia LIDAR; el que fuesen más antiguos se solucionó realizando ajustes en algunas zonas editando los puntos de cota.
- En cuanto a la realización de un modelo urbano en el que se incluyan los edificios y demás estructuras mediante SIG, no resultó complicado; consistió en la preparación de polígonos que coincidan con la forma en planta de los edificios, zonas verdes y demás componentes de la morfología urbana para, posteriormente, ser extruidos y colocados espacialmente junto con el MDE. A pesar de tratarse de un proceso simple, es laborioso y si se busca un grado de detalle como el conseguido en este caso (se representan los edificios diferenciados según usos y con sus alturas reales, zonas verdes, fuentes, excavaciones con su profundidad real, etc.) el tiempo a invertir es elevado. La valoración final de esta parte del trabajo es que esa dedicación permite dar al modelo un aspecto mucho más real y visual, haciéndolo más atractivo y facilitando su interpretación al público en general.



- En lo relativo a la interpolación, se comprobó que los interpoladores más indicados para la generación de las superficies (contactos geológicos) en este trabajo eran los exactos de tipo IDW y RBF. El principal motivo por el que se concluye esto es porque los resultados, tanto matemáticos como geológicos, son aceptablemente buenos, obteniéndose menores errores y superficies geológicas más reales que con los métodos inexactos, geoestadísticos o con barreras. Además de la calidad de los resultados, se eligen estos métodos porque, ante la escasez de puntos exactos, se cree conveniente asegurar que la superficie pasa por los puntos conocidos. Un último aspecto a tener en cuenta a la hora de elegir estos métodos, es su mayor sencillez para ajustar los parámetros de interpolación, facilitando la obtención de buenos resultados sin una gran experiencia por parte del operador. Los resultados obtenidos utilizando IDW fueron buenos, pero las superficies generadas mediante RBF presentan un aspecto más realista desde el punto de vista geológico.
- En cuanto a la cartografía geológica se han delimitado las diferentes unidades. La zona se caracteriza por afloramientos de materiales paleógenos que ocupan un 72% de su superficie, quedando el resto de la superficie ocupada por las formaciones cretácicas. Estas unidades son la Fm. Oviedo, que ocupa el 25%, y la Fm. La Argañosa, que ocupa el 3%. Estos afloramientos presentan un aspecto compartimentado y bastante irregular, características que ayudan a realizar las interpretaciones estructurales posteriores. Por encima de todo ello se encuentran las formaciones superficiales (rellenos antrópicos, y suelos naturales de origen aluvial y eluvial), que cubren toda la zona.
- Sobre las unidades geológicas se ha abordado la distribución de sus potencias en toda la zona. La unidad más somera, formaciones superficiales, llega a alcanzar espesores de hasta 18 m en el extremo NO de la zona, mientras que en otras partes de la ciudad pueden ser decimétricos. La unidad inmediatamente subyacente en la mayor parte de la zona son los materiales del Paleógeno, que en este caso no han sido diferenciados en tramos. Esta unidad presenta un espesor máximo de 40 m en el extremo SO, aunque en general su espesor supera raramente los 20 m, mientras que en las zonas en la que aflora el Cretácico no aparece. Se han reconocido variaciones irregulares en el espesor de esta unidad, algunas de las cuales se deben a la presencia de fallas que generan saltos en el cretácico y otras son consecuencia del paleorrelieve labrado en el techo de la sucesión cretácica. Por debajo se encuentra el techo del Cretácico, la Fm. Oviedo; esta unidad presenta espesores máximos de 32 m en el extremo NO, y no se encuentra ni en las zonas de afloramiento de la Fm. La Argañosa ni en el extremo SO, donde el Paleógeno se apoya



directamente sobre las arenas cretácicas. La última unidad de la que se puede aportar información veraz es la Fm. La Argañosa. Su espesor no se puede precisar bajo toda la zona, aunque se estima entre los 35 y los 40 m, pero se puede aportar la profundidad a la que se encuentra su techo, siendo su profundidad máxima de 70 m, también en el extremo NO de la zona.

- En lo que se refiere a la configuración estructural de la zona, se concluye que el rasgo más característico es la presencia de fallas con orientaciones NE-SO y NO-SE, formando dos sistemas ortogonales. Esta configuración de la estructura genera la compartimentación cartográfica de las unidades, con un patrón general de afloramientos aislados de rocas cretácicas rodeados de rocas paleógenas. Estas fallas han sido identificadas a través de cambios bruscos en la cota de las unidades modeladas, los cuales se reproducen en todas ellas con mayor o menor intensidad. Los saltos identificados van desde los 10 a los 15 m; aunque con seguridad abundan las fallas menores con saltos inferiores, las cuales no han sido representadas. Por otro lado, se aprecia que los materiales paleógenos muestran cambios de espesor que no se reproducen en las unidades cretácicas; esto se relaciona con el paleorrelieve cuya geometría se ha conseguido conocer con mayor detalle. Esta superficie erosiva genera cambios de espesor de hasta 15 m; en todo el extremo SO de la zona la erosión ha eliminado por completo la Fm. Oviedo llegando a socavar el techo de la Fm. La Argañosa. La presencia de este paleorrelieve genera las irregularidades apreciables en los afloramientos cretácicos, y es el motivo de la presencia de algunos pequeños afloramientos aislados que no se asocian a grandes fallas.
- Por último, todo lo anterior se engloba en un modelo 3D. El modelo está compuesto por cinco capas: "Geografía" (topografía y modelo urbano), techo del Paleógeno, techo de la Fm. Oviedo y techo de la Fm. La Argañosa; además, el modelo se extiende por debajo de la Fm. La Argañosa hasta una cota de 100 msnm, por lo que se representa un volumen de rocas cretácicas indiferenciadas que incluye, mayoritariamente, a la Fm. San Lázaro, llegando a incluir a la Fm. Latores, sin poderse situar con seguridad el contacto entre ambas.



V. Bibliografía

- Calleja, M., Fernández, G. y Fernández, F. (2015): *Urbe I: la construcción histórica de la ciudad de Oviedo*. Ediuno, Oviedo.
- Ciotoli, G., Stigliano, F., Mancini, M., Marconi, F., Moscatelli, M. y Cavinato, G.P. (2015): Geostatistical interpolators for the estimation of the geometry of anthropogenic deposits in Rome (Italy) and related physical-mechanical characterization with implications on geohazard assessment. *Environ Earth Sci*, 74, págs. 2635-2658.
- González Fernández, B., Gutiérrez Claverol, M. y Menéndez Casares, E. (2005): Caracterización hidrogeológica de la sucesión cretácica en el sector central de Asturias (Oviedo, NO de España). *Boletín Geológico y Minero*, 116 (3): 231-245, Madrid.
- González Fernández, B., Menéndez Casares, E., Gutiérrez Claverol, M. y García-Ramos, J.C. (2004): Litoestratigrafía del sector occidental de la cuenca cretácica de Asturias. *Trabajos de Geología, Universidad de Oviedo*, 24: 43-80.
- Gutiérrez Claverol, M. y Pando, L. (2008): Niveles permeables en el contexto geotécnico del subsuelo de Oviedo. *Geo-Temas*, 10: 931-934, Las Palmas de Gran Canaria.
- Gutiérrez Claverol, M. y Torres Alonso, M. (1995): *Geología de Oviedo. Descripción, recursos y aplicaciones*. Ed. Paraíso, 276 pp., Oviedo.
- Gutiérrez Claverol, M., Pando, L. y García-Ramos, J.C. (2008): Procesos y productos de alteración de formaciones rocosas en Asturias y su repercusión socio-económica. *Boletín Geológico y Minero*, 119 (2): 211-230, Madrid.
- Gutiérrez Claverol, M., Pando, L. y González, B. (2004a): Problemática de las calizas del Cretácico Superior en las cimentaciones de Oviedo. *Geogaceta*, 36: 99-102, Madrid.
- Gutiérrez Claverol, M., Torres Alonso, M., Pando, L. and González, B. (2004b): Ground subsidence and collapse in subsoil of Oviedo city owing to karstified gypsum levels. 32nd International Geological Congress, Abstracts, part. 1, p. 196, Florencia.
- Julivert, M. y Truyols Santonja, J. (1969): Sobre la naturaleza del contacto Cretáceo-Terciario en la zona urbana de Oviedo. *Breviora Geológica Astúrica*, 13 (2): 17-24, Oviedo.
- Martínez Álvarez, J.A. y Torres Alonso, M. (1968): Características de la discordancia mesoterciaria en la ciudad de Oviedo. *Revista de la Facultad de Ciencias, Universidad de Oviedo*, 9 (1-2): 215-218, Oviedo.
- Pando, L. (2012): *Aplicaciones geológico-geotécnicas de un SIG en el núcleo urbano de Oviedo*. Tesis Doctoral, Universidad de Oviedo, 257 pp.



- Pando, L., Gutiérrez Claverol, M. y Flor-Blanco, G. (2012): Propiedades geotécnicas de la Formación La Argañosa (Cretácico Superior, Oviedo). *Boletín Geológico y Minero*, 123 (1): 65-75, Madrid.
- Pando, L., Pulgar, J.A. y Gutiérrez-Claverol, M. (2013): A case of man-induced ground subsidence and building settlement related to karstified gypsum (Oviedo, NW Spain). *Environmental Earth Sciences*, 68 (2): 507-519.
- Pando, L., Díaz-Díaz, L.M., Arias, D. and Flor-Blanco, G. (2014): A case study of GIS-based geotechnical database in urban environment (Oviedo, NW Spain). *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 16, EGU2014-7518-1, European Geosciences Union General Assembly, Vienna.
- Pando, L., Flor-Blanco, G., Díaz-Díaz, L.M. and Arias, D. (2016): An approach to identification and modeling of artificial grounds in urban area from multidisciplinary data (Oviedo, NW Spain). *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 18, EGU2016-12761-1, European Geosciences Union General Assembly, Vienna.
- Pando, L., Gutiérrez Claverol, M., Torres Alonso, M. y Martínez, F. (2004): Los materiales yesíferos del Terciario de Oviedo y su problemática geotécnica. *Geo-Temas*, 6 (3): 305-308, Zaragoza.
- Pendás Fernández, F. y González Fernández, B. (2003): El sistema hidrogeológico de Oviedo: incidencia en problemas de cimentación urbana. *Boletín Geológico y Minero*, 114 (1): 121-132, Madrid.
- Pulgar, J.A., Gutiérrez-Claverol, M. y Torres Alonso, M. (1999): Constitución geológica y características geotécnicas del subsuelo urbano de La Tenderina - Ventanielles (Oviedo). *Trab. Geol.* 21: 295–307
- Rogers, S. y Horseman, S. (1999): Underground space – The final frontier? *Earthwise*, 13, British Geological Survey, Keyworth, UK.
- Thierry, P., Prumier-Leparmentier, A.M., Lembezar, C., Vanoudheusdem, E. y Vernoux, J.F. (2009): 3D geological geomodelling at urban scale and mapping of ground movement susceptibility from gypsum dissolution: the Paris example (France). *Engineering Geology*, 105, págs. 51-64.
- Truyols, J., García Ramos, J.C., Casanovas-Cladellas, M.L., Santafé Llopis, J.V. (1991): El Terciario de los alrededores de Oviedo. *Acta Geológica Hispánica*, v. 26, nº 3-4, págs. 229-233.



- **Páginas web consultadas:**

<http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas>

<http://info.igme.es/cartografiadigital/geologica/Geode>

<http://www.catastro.minhap.gob.es>

<http://www.eltribuno.info/geologia-urbana>



VI. Agradecimientos

En primer lugar, agradecer al Grupo de Investigación de Geología Aplicada a la Ingeniería del Departamento de Geología de la Universidad de Oviedo su total colaboración y, especialmente, la total disponibilidad ofrecida para el uso del laboratorio de geotecnia, ya que sin estas instalaciones la realización de este trabajo habría sido imposible.

Agradecer también a mi tutor, el Dr. Luis Pando, la cesión de los datos utilizados en este trabajo, además de su total colaboración y disponibilidad, sin las cuales me habría sido muy difícil abordar las dificultades surgidas a lo largo de este tiempo.

Por último, aunque no menos importante, agradecer la colaboración del Dr. Luis Díaz y de todas aquellas personas que han contribuido, en mayor o menor medida y de una forma u otra, a que la realización de este trabajo fin de máster haya sido posible.