



**UNIVERSIDAD DE OVIEDO**

**ESCUELA POLITÉCNICA DE MIERES**

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN TELEDETECCIÓN Y SISTEMAS DE  
INFORMACIÓN GEOGRÁFICA**

**PROYECTO FIN DE MÁSTER**

**APLICACIONES DE LAS HERRAMIENTAS GIS  
EN EL ÁMBITO DE LA INGENIERÍA CIVIL:  
RECOPIACIÓN, ESTUDIO Y MODELIZACIÓN  
ESTADÍSTICA DE LA INFORMACIÓN  
GEOTÉCNICA**

**AUTOR: D. JONATHAN SUÁREZ REFOYO**

**DIRECTORES: D. PABLO CAMPOS FERNÁNDEZ**

**D<sup>a</sup>. SUSANA FERNÁNDEZ MENÉNDEZ**

**JULIO 2012**

## ÍNDICE

<b>1. OBJETO .....</b>	<b>4</b>
<b>2. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>5</b>
2.1 PROYECTO .....	5
2.2 OBRA .....	5
2.2.1 Marco Geológico .....	6
2.3 ¿QUÉ ES UN KARST? .....	8
2.3.1 Proceso de erosión kárstica.....	10
2.3.2 Zonas del aparato kárstico .....	12
<b>3. CIMENTACIÓN.....</b>	<b>13</b>
3.1 CIMENTACIÓN PROFUNDA.....	13
3.2 MICROPILOTES.....	14
3.2.1 Ventajas e inconvenientes de los micropilotes .....	16
<b>4. SOLUCIÓN PROPUESTA CIMENTACIÓN .....</b>	<b>18</b>
<b>5. APLICACIÓN DE UNA HERRAMIENTA GIS Y ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO.....</b>	<b>19</b>
5.1 PREPARACIÓN DE LOS TRABAJOS .....	19
5.2 CREACIÓN DE TIN DE LA ZONA DE UBICACIÓN DE LOS RECONOCIMIENTOS .....	20
5.3 CREACIÓN DE UNA BASE DE DATOS.....	23
5.4 MODELIZACIÓN DE LOS DATOS EN PROFUNDIDAD .....	27
5.5 MODELO LITOLÓGICO Y ESTRATIGRÁFICO .....	29
5.5.1 Modelo litológico .....	30
5.5.2 Modelo estratigráfico.....	33
5.6 MODELO KARST MEDIANTE VOXLER .....	38
5.6.1 Introducción de datos en el programa.....	38
5.6.2 Modelo del Karst .....	40
<b>6. CONCLUSIONES .....</b>	<b>46</b>
<b>7. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>46</b>

## ANEXOS

### ANEXO I PLANOS

## RESUMEN

En los proyectos de Ingeniería Civil desarrollados en la actualidad se acumula abundante información geotécnica a lo largo de sus distintas fases de diseño y construcción. Es preciso implementar una técnica que permita su recopilación y empleo de forma óptima. Este proyecto se centra en la integración de la información geotécnica disponible mediante aplicación de herramientas GIS. El caso de estudio elegido se corresponde con un viaducto de una obra lineal con una problemática en su cimentación asociada a la presencia de karstificación. Gracias a la metodología empleada ha sido posible el realizar un análisis de este fenómeno y la posterior representación 3-D en profundidad de la morfología del karst.

Palabras clave: karst, geoestadística, GIS, modelización geotécnica, cimentación en terrenos kársticos, modelo tridimensional

## ABSTRACT

*In civil engineering projects currently developed abundant geotechnical information is accumulated along design's stages and construction. It is necessary to implement a technique for the collection and optimally use. This project focuses on the integration of geotechnical data with the application of GIS tools. The selected study case corresponds to a viaduct with a problem in its foundation that it is associated with the presence of karstification. Thanks to the methodology has been possible to perform an analysis of these caves and 3D representation of the in-depth geometry of the karst.*

*Keywords: karst, geostatistics, GIS, geotechnical modeling, foundation in karst terrain, three-dimensional model*

## 1. OBJETO

En los últimos años, la implementación de los Sistemas de Información Geográfica ha crecido de forma considerable, estando presente en multitud de aplicaciones territoriales.

En este proyecto se trata de mostrar una de ellas, utilizando diferentes herramientas, para analizar la información geotécnica obtenida al realizar una obra lineal.

A partir del análisis de toda esta información, es posible realizar modelizaciones tridimensionales de los materiales que van apareciendo en profundidad utilizando para ello diferente software de aplicación en geotecnia.

El objetivo final de este proyecto es llegar a demostrar que a partir de la implementación de un GIS en el que se vaya incluyendo toda la información acumulada en las distintas fases de proyecto así como durante la fase de construcción, es posible obtener un mayor grado de aprovechamiento de la información geotécnica disponible que no solo permitan un mejor diseño de la infraestructura, sino contribuir a solventar y optimizar problemáticas durante la fase de obra.

En el presente trabajo se emplea un caso de estudio correspondiente al diseño y ejecución de un viaducto de una obra lineal en el País Vasco. Se trata concretamente de un apoyo sobre materiales calizos con una especial problemática en su cimentación asociada a la karstificación. Se dispone de abundante información geotécnica correspondiente a las sucesivas campañas de sondeos en las fases de proyecto y obra, así como información obtenida durante la fase de excavación y perforaciones a destroza de la cimentación. El caso elegido se considera óptimo debido a la elevada cantidad de información geotécnica y a la particular casuística de la problemática kárstica, que suele presentar grandes dificultades para su detección, modelización y cuantificación.

Debe reseñarse que parte de la información geotécnica ha sido obtenida en el ámbito del proyecto de Desarrollo Experimental cofinanciado dentro del Programa Operativo FEDER del Principado de Asturias 2007-2013 **“Una nueva técnica de prospección geotécnica del subsuelo: sondeos con sonda a rotoperusión instrumentada como ensayo in situ y su empleo como herramienta de correlación con sondeos geotécnicos convencionales” desarrollado por ATSG INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA.**



## 2. INTRODUCCIÓN

### 2.1 PROYECTO

Este proyecto consiste en la utilización de una herramienta GIS, en la que se introdujo la información geotécnica de un proyecto, siendo utilizada como ayuda en la resolución de problemas geotécnicos, como fue la representación de los fenómenos kársticos y sus morfologías en el ámbito de la cimentación de una estructura

Para el proyecto se utilizó diferente software con conectividad a Sistemas de Información Geográfica, entre los que se destaca el ArcGis, Rockworks y Voxler, que permitieron crear diferentes representaciones gráficas del terreno a partir del análisis geoestadístico de la información recopilada.

Gracias a estas representaciones se puede realizar un análisis de estas zonas karstificadas, estableciendo su morfología, desarrollo y afección a la cimentación.

### 2.2 OBRA

El viaducto sobre el que se ha hecho el proyecto esta incluido en un tramo de la Línea de Alta Velocidad ubicándose en el municipio de Arrasate/Mondragón (Guipúzcoa) y une dos túneles de esa misma línea.



**Fotografía 2.2.a-Ortofoto con la zona de ubicación del viaducto**

Este viaducto, tiene una longitud total de 94 metros, formando tres vanos (anchura entre pilas) de 27, 40 y 27 metros, respectivamente. La anchura del tablero es de 14 metros, lo que le permitirá albergar doble vía de ancho internacional.

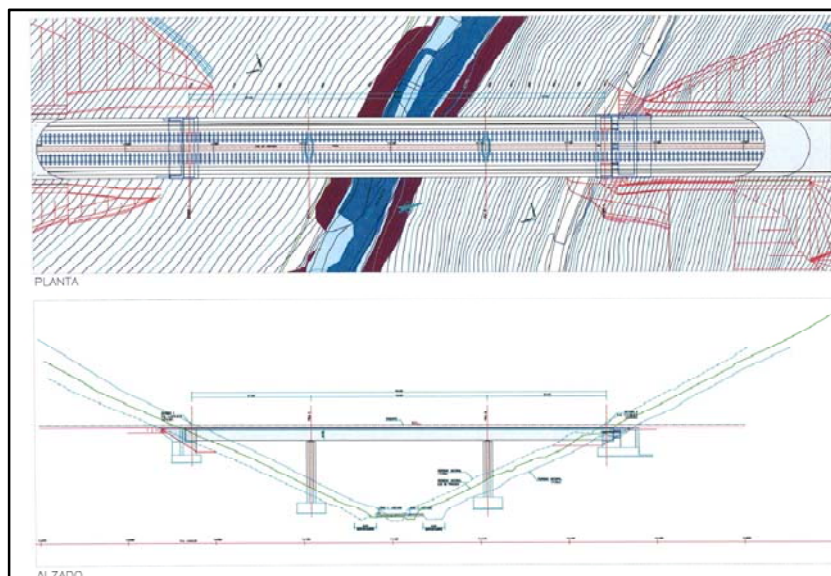


Figura 2.2.a-Perfiles en planta y en alzado del viaducto (ver Anexo I)

El tramo donde se encuentra este viaducto tiene 4,4 kilómetros de longitud de tramo, con dos túneles de 437 metros y 3.185 metros respectivamente. Además cuenta con dos viaductos de 94 metros (objeto de estudio) y otro de 223 metros respectivamente.

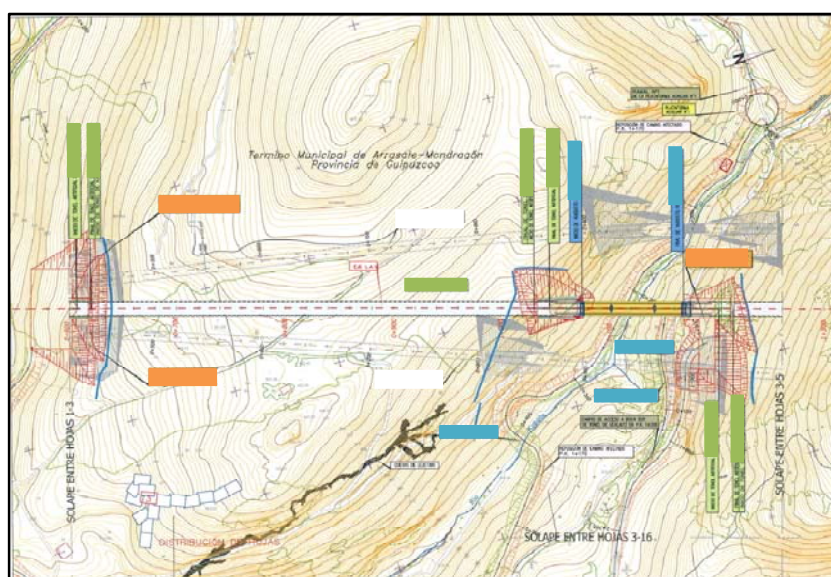


Figura 2.2.b-Perfil en planta del trazado (ver Anexo I)

### 2.2.1 Marco Geológico

El viaducto objeto de nuestro estudio se sitúa al Norte de la localidad de Mondragón y discurre sobre materiales del Cretácico Inferior (Aptiense). En concreto, la pila sobre la que se ha desarrollado el trabajo se sitúa en el labio Sur de una falla, que afecta a las calizas

estratificadas con rudistas del cretácico inferior, a favor de esta fractura aparecen lentejones de areniscas.

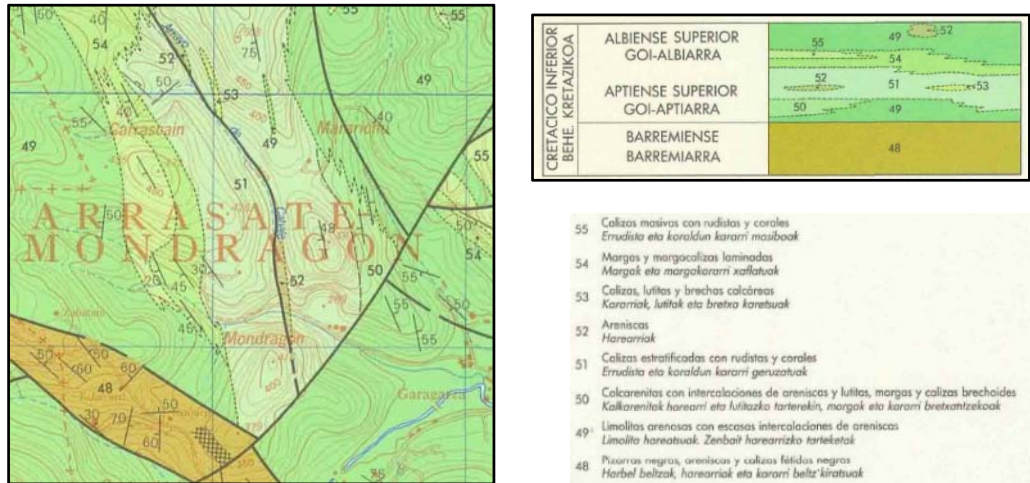


Figura 2.2.1.a-Geología de la zona

Esta falla interrumpe la continuidad hacia el sur de un paquete de calizas, lutitas y brechas calcáreas sinsedimentarias.

Las calizas aptienses se encuentran fuertemente karstificadas, y los planos de karstificación principales se asocian a la disposición y orientación de las principales fracturas que presenta el macizo rocoso.

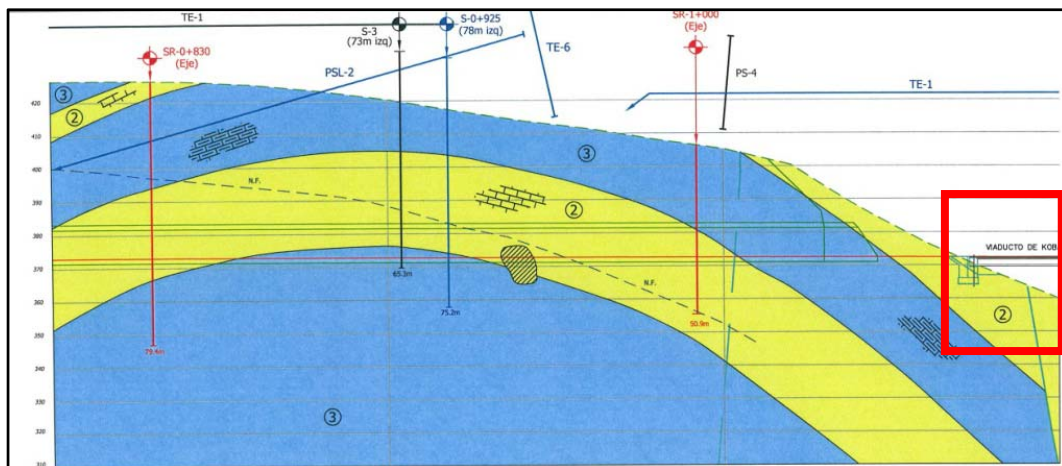
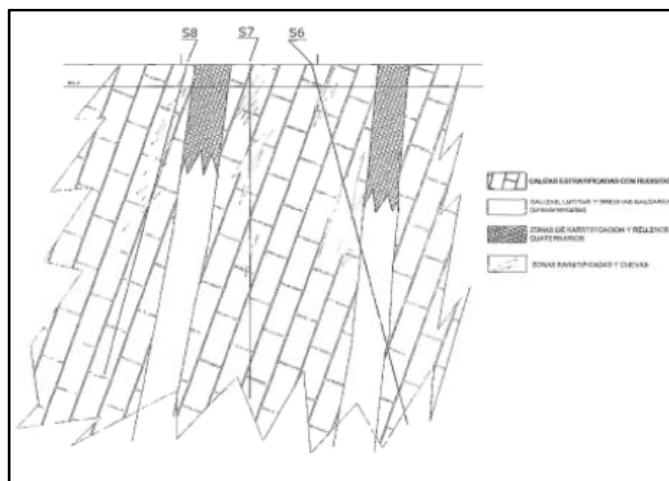


Figura 2.2.1.b-Perfil geológico longitudinal (ver Anexo I)

En la zona del apoyo del viaducto objeto del estudio, se detectó una fuerte karstificación que se instala preferentemente sobre los planos de estratificación, y alcanza una

profundidad de unos 10 metros, a partir de los cuales la densidad de fracturas disminuye considerablemente.

A partir de los sondeos de proyecto S-3 y S-5, se detectaron dos niveles de brechas calcáreas, a favor de las cuales penetra la alteración y karstificación, generando sendas cavidades kársticas que se encontraban rellenas con sedimentos cuaternarios de diversas índole.



**Figura 2.2.1.c-Corte geológico de la zona de cimentación**

### 2.3 ¿QUÉ ES UN KARST?

Con el nombre de karst se conoce a una forma de relieve originado por la meteorización química (disolución, hidratación, sustitución iónica y óxido-reducción), junto a meteorización física (transferencia de masa y difusión) de determinadas rocas, como la caliza, dolomía, etc., compuestas por minerales solubles en agua.

El relieve de estas zonas está condicionado principalmente por la disolución de las rocas, es lo que se llama “karstificación”. Este fenómeno afecta rocas solubles entre las cuales se encuentra fundamentalmente rocas evaporíticas y carbonatas. Estando asociada a la formación de huecos en estos materiales por este fenómeno una importante problemática geotécnica, con afecciones a la cimentación de estructuras y obras de tierra, cimentación e impermeabilización de presas y cerradas, filtración y golpes de agua en obras subterráneas, etc.



El proceso de karstificación en rocas carbonatadas, como en el caso de estudio, tiene lugar en cuatro fases:

- Disolución escasa en agua pura, disociándose en anión carbonato. La disolución es alta pero muy limitada en el tiempo, generando formas superficiales con desarrollo rápido.
- Formación de ácido carbónico (bicarbonato) disociado en bajas proporciones, a partir de la oxidación del anión carbonato. La tasa de disolución es alta-media, dando lugar a formas más incisivas, también superficiales.
- Intervención del dióxido de carbono atmosférico o edáfico, que está físicamente disuelto en el agua. Una pequeña proporción será hidratada y químicamente disuelta dando ácido carbónico disociado, retroalimentando el proceso al formarse más ácido carbónico a partir de los aniones carbonato de la roca. Es la fase más importante en la karstificación superficial, aún con tasas de disolución medias.
- Fase con total interacción atmósfera-agua-roca. El desequilibrio entre el contenido en dióxido de carbono del aire y del agua, llega a suplirse disolviendo físicamente grandes cantidades de CO<sub>2</sub>. Así aparecen numerosas reacciones reversibles hasta llegar a un cierto equilibrio. Las tasas de disolución disminuyen progresivamente, aunque la duración de esta etapa llega a generar karstificaciones importantes.

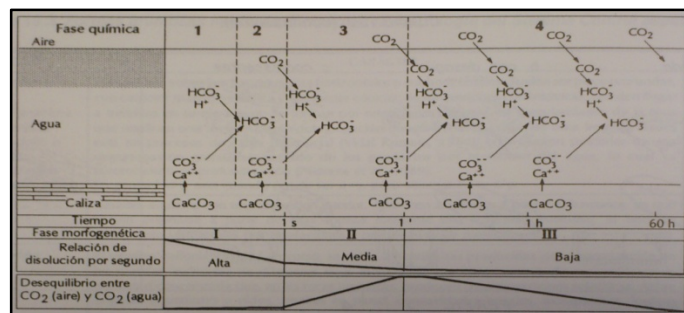
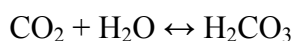


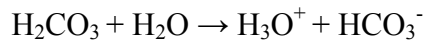
Figura 2.3.a-Esquema general de la karstificación en calizas

Las reacciones químicas responsables de la disolución de los carbonatos son las siguientes:

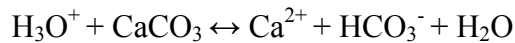
- Disolución del dióxido de carbono:



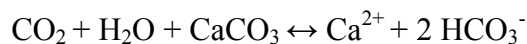
- Disociación acuosa del ácido carbónico:



- Ataque ácido de carbonatos ("calcáreos"):



- Ecuación de balance:



La disolución y por lo tanto la formación del relieve kárstico, se ve favorecida por:

- La abundancia de agua;
- La concentración de  $\text{CO}_2$  en el agua (que aumenta con la presión);
- La baja temperatura del agua (cuanto más fría este el agua, más está cargada de  $\text{CO}_2$ );
- Los seres vivos (que emiten  $\text{CO}_2$  en el suelo por la respiración, lo que aumenta considerablemente su contenido);
- La naturaleza de la roca (fracturaciones, composición de los carbonatos, etc.);
- El tiempo de contacto agua-roca;

La problemática geotécnica ligada a estos procesos está relacionada con la presencia de huecos, (circulación de agua, hundimientos y colapsos) en el ámbito de una obra o proyecto. En el caso del Karst en rocas carbonatadas, (como el aquí estudiado) al contrario con lo que ocurre por ejemplo en terreno yesíferos, el proceso no es evolutivo respecto al tiempo de servicio de la obra, por lo que los reconocimientos y precauciones se centran en la localización de huecos ya existentes o de materiales susceptible de presentarlos.

### 2.3.1 Proceso de erosión kárstica

Un karst se produce por disolución indirecta del carbonato cálcico de las rocas calizas debido a la acción de aguas ligeramente ácidas. El agua se acidifica cuando se enriquece en dióxido de carbono, por ejemplo cuando atraviesa un suelo, y reacciona

con el carbonato, formando bicarbonato, que es soluble. Hay otro tipo de rocas, las evaporitas, como por ejemplo el yeso, que se disuelven sin necesidad de aguas ácidas. Las aguas superficiales y subterráneas van disolviendo la roca y creando galerías y cuevas que, por hundimiento parcial, forman dolinas y, por hundimiento total, forman cañones.

En función de la localización las formas kársticas se producen en superficie (exokársticas) o por el contrario son geomorfológicas que aparecen en cavidades subterráneas (endokársticas).

En el caso del apoyo, hablamos de formas endokársticas de tipo destructivo, como son las cavernas o galerías.

Estas cuevas se originan por infiltración de aguas de percolación y disolución, provocando el ensanchamiento de discontinuidades: diaclasas, planos de estratificación, cambios de porosidad, etc. Su profundidad, longitud, trazado en planta y sección, es muy variable.

En su evolución se mezclan procesos de colapso o hundimiento, con disolución y suelen presentar elementos menores subsidiarios.

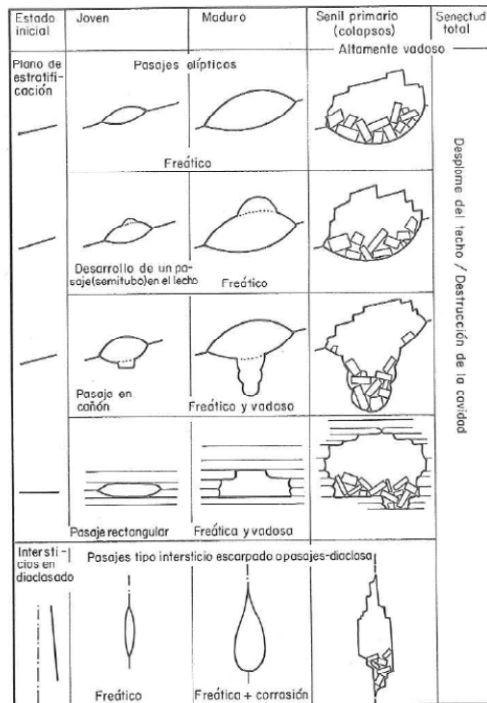


Figura 2.3.1.a-Esquema de evolución conductos endokársticos

### 2.3.2 Zonas del aparato kárstico

- Zona de absorción: zona superficial por donde penetra el agua;
- Zona vadosa: en la cual los conductos están rellenos de aire, salvo en momentos de lluvia o similar.
- Zona freática: zona con cavidades por donde circula permanentemente el agua y karstificación activa.
- Zona epifreática: situada entre la vadosa y la freática, sufre inundaciones periódicas.

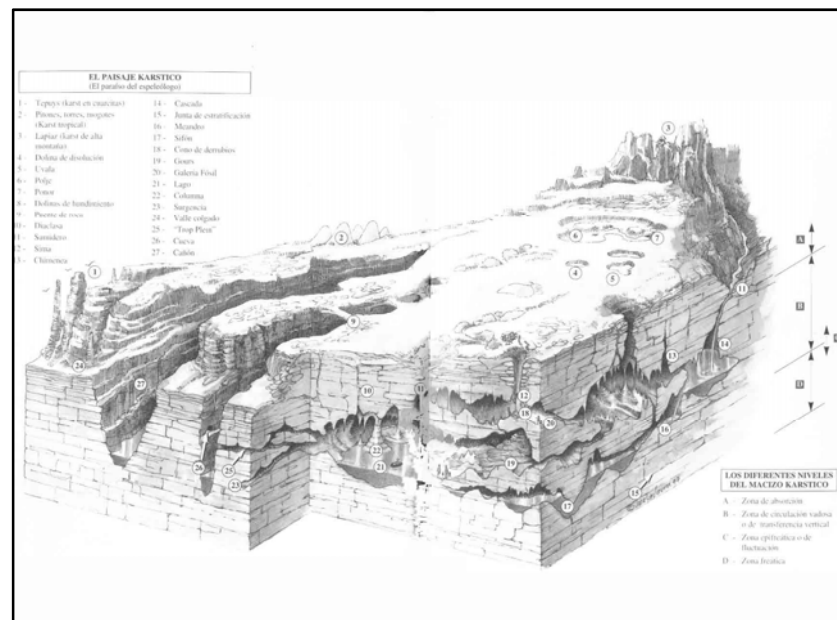


Figura 2.3.2.a-Esquema de una zona kárstica



### 3. CIMENTACIÓN

#### 3.1 CIMENTACIÓN PROFUNDA

La cimentación de puentes y otras estructuras en obras de carretera exige, en general, la transmisión de grandes cargas concentradas, por lo que en ocasiones la cimentación directa (zapatas superficiales, losas de cimentación, etc.) no es conveniente. Complementariamente la limitación de asientos en el diseño de dichas estructuras restringe en muchas más ocasiones la adopción de cimentaciones superficiales. En otros casos es la presencia de determinados factores de riesgo los que condicionan la elección del tipo de cimentación.

La presencia de espesores grandes de suelos blandos próximos a la superficie es una de las razones principales para proyectar una cimentación profunda, pero, además, existen otros motivos que pueden hacerla más recomendable. La previsión de posibles socavaciones en cauces fluviales o en zonas costeras o la presencia de huecos netos importantes con riesgo de colapso o hundimiento (cavidades kársticas, por ejemplo) son también motivos frecuentes para elegir una cimentación profunda.

Los tipos de cimentación profunda que pueden resultar en un determinado proyecto son muy variados, si bien, a efectos de ordenar las recomendaciones que siguen, pueden agruparse de la manera siguiente:

- *Pilotes aislados*: También denominados pila-pilote. Suelen ser elementos de gran capacidad portante que prolongan la estructura de la pila de apoyo dentro del terreno, hasta la profundidad requerida. Es una solución bastante extendida para puentes de luces moderadas y acciones reducidas tal y como ocurre con las estructuras tipo pérgola. Se ha aplicado en muchas ocasiones con pilotes hincados.
- *Grupos de pilotes*: Es la solución más usual. Las tensiones son transmitidas a un nivel más profundo a través de varios pilotes a través de un encepado relativamente rígido, que enlaza sus cabezas.
- *Zonas pilotadas*: Pilotes regularmente espaciados que en ocasiones se usan para reducir asientos o mejorar la seguridad frente al hundimiento de losas, terraplenes

etc. Suelen ser pilotes con baja capacidad de estructural o con bajo porcentaje de aprovechamiento de su tope estructural.

En cuanto a su forma de trabajo, los pilotes pueden clasificarse en (véase figura 3.1.a):

- *Pilotes por fuste*: En aquellos terrenos en los que la capacidad portante crece de una manera paulatina con la profundidad, sin existir un nivel claramente más resistente, el pilotaje transmitirá su carga al terreno fundamentalmente a través del fuste. Se suelen denominar pilotes «flotantes».
- *Pilotes por punta*: En aquellos terrenos en los que aparezca, a cierta profundidad, un estrato claramente más resistente, las cargas del pilotaje se transmitirán fundamentalmente por punta. Se suelen denominar pilotes «columna».

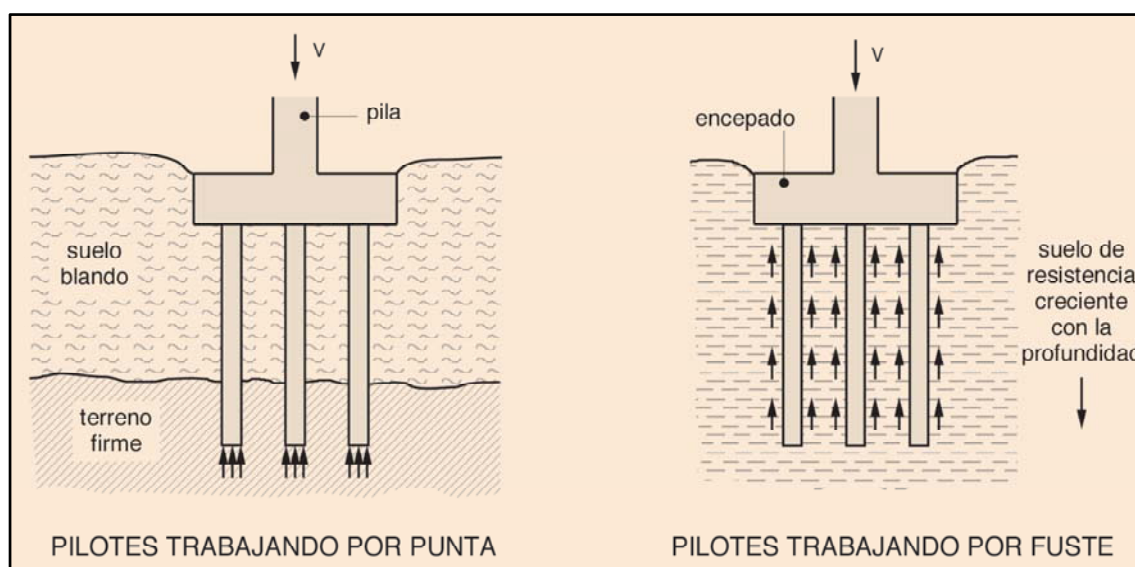


Figura 3.1.a-Esquema de cimentaciones profundas

### 3.2 MICROPILOTES

Los micropilotes presentan una serie de características comunes con los pilotes ya que permiten transmitir cargas de las estructuras a zonas más profundas del terreno. El elemento transmisor de la carga, micropilote, es usualmente metálico, ya se trate de barras corrugadas o tubos de acero.

La transmisión de la carga desde el elemento metálico al terreno se realiza, fundamentalmente, por adherencia a la inyección, que a su vez transmite el esfuerzo de corte a las paredes de la perforación.

Los elementos primarios de transmisión de cargas, o armaduras, pueden ser cables o redondos de acero o tubos metálicos cuando la sollicitación es fundamentalmente en compresión como resulta habitual en los micropilotes (también pueden utilizarse para sollicitaciones de flexión, cortante y tracción).

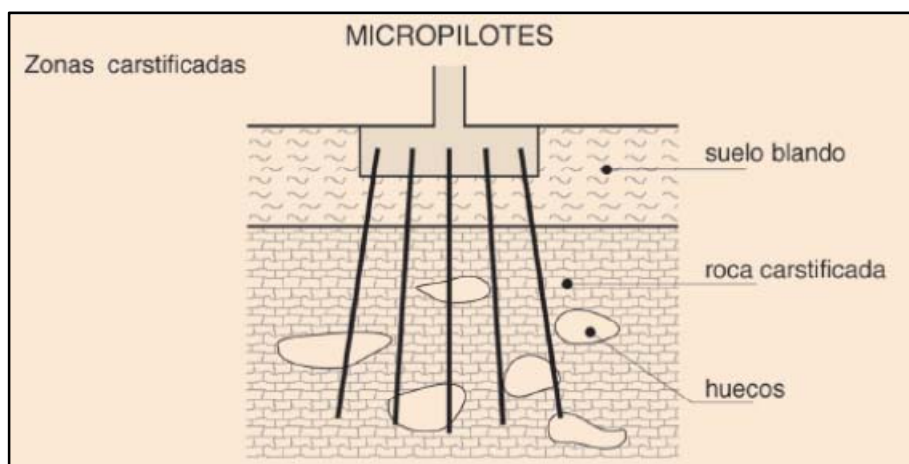
La ejecución de micropilotes incluye una fase final de inyección del contacto armadura-terreno que no es usual en los pilotes convencionales. En lo relativo a su diámetro, éste no suele superar los 350 mm.

Los micropilotes fueron, en su momento, ideados para resolver problemas de recalce de estructuras.

El desarrollo de las técnicas de ejecución ha hecho que su uso sea conveniente incluso en obras de nueva planta.

En cimentaciones a realizar pueden ser de interés en algunas circunstancias, entre ellas las siguientes (**véase figura 3.2.a**):

- Cimentaciones profundas en lugares de difícil acceso: Los equipos necesarios para ejecutar micropilotes son mucho más ligeros y permiten acceder a lugares donde las máquinas necesarias para realizar pilotes no podrían llegar.
- Cimentaciones sobre zonas karstificadas: La presencia de huecos en el subsuelo puede conducir a la necesidad de ejecutar una cimentación profunda. La ventaja de los micropilotes, en estos casos, estriba en la movilización de una mayor superficie lateral de la roca, en mayor número de puntos (más unidades de micropilotes que la solución equivalente de pilotes convencionales), e incluso de un modo más efectivo.



**Figura 3.2.a-Micropilotes en zonas karstificadas**

Además de las situaciones anteriores existen muchas otras abordables con esta técnica.

### **3.2.1 Ventajas e inconvenientes de los micropilotes**

#### **➤ Ventajas:**

1. Rapidez, economía y mínimas molestias en la obra comparado con otros sistemas.
2. Posibilidad de incorporar los micropilotes a la parte sana de la estructura, sin la necesidad de ejecutar elementos estructurales adicionales.
3. Facilidad de ejecución en ángulos inclinados, lo cual permite aumentar su capacidad portante frente a fuerzas horizontales.
4. Versatilidad de ejecución en espacios reducidos.
5. Permite solucionar problemas de accesibilidad o perforabilidad con eficacia y rendimiento adecuado.
6. No requieren grandes excavaciones de suelos.
7. Pueden utilizarse en suelos duros, en suelos blandos y en materiales con bloques de roca.
8. No impiden el movimiento de las corrientes de agua.

➤ **Desventajas:**

1. La resistencia al cortante de un micropilote es muy pequeña por su gran esbeltez y sección nominal relativamente pequeña.
2. La capacidad de resistencia horizontal a tensión de un micropilote inclinado con respecto de la vertical es relativamente pequeña.
3. Para estabilizar deslizamientos de tamaño mediano o grande se requiere colocar una gran cantidad de micropilotes.
4. No existen metodologías de diseño universalmente aceptadas.
5. Muchos procesos de cálculo son empíricos y sólo se pueden contrastar con pruebas de carga si se pretende aprovechar al máximo la resistencia del micropilote.
6. La calidad depende mucho de que el proceso de ejecución sea riguroso.

#### 4. SOLUCIÓN PROPUESTA CIMENTACIÓN

A partir del análisis de toda la información disponible, teniendo en cuenta la presencia de la karstificación que fue el condicionante principal en la decisión de optar por una cimentación profunda.

Para ello se analizaron e interpretaron los resultados de los sondeos realizados en la ubicación del encepado de dicha pila (SM-3, SM-4, S-5, S-6, S-7, S-8 y S9), además de la información obtenida durante la ejecución de la obra, optando por la siguiente solución de cimentación, consistente en un encepado de 12,75 x 12,75 metros micropilotado con elementos armados de tubo de acero.

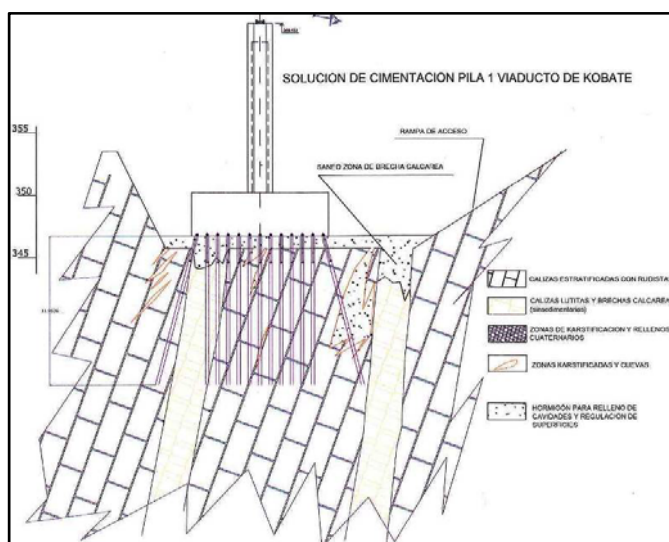


Figura 4.a-Perfil geológico del apoyo de la pila

Efectuándose una excavación y saneo de la zona de implantación del apoyo, con una profundización del plano de cimentación con el consiguiente aumento de la longitud de pila. Efectuándose a la nueva cota topográfica.

## **5. APLICACIÓN DE UNA HERRAMIENTA GIS Y ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO**

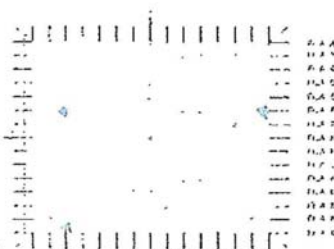
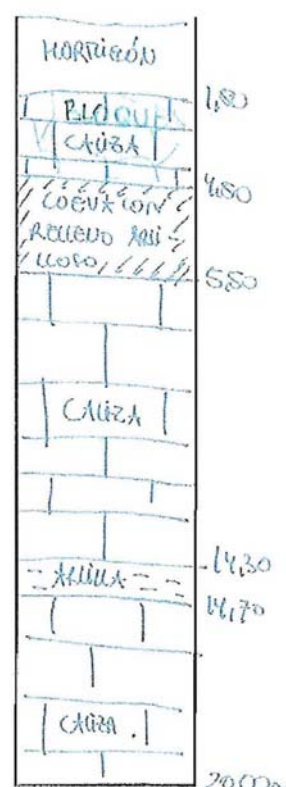
### **5.1 PREPARACIÓN DE LOS TRABAJOS**

El trabajo se centró en los trabajos de cimentación de la pila de un viaducto que atraviesan una zona karstificada.

Al comenzar el proyecto, se realizó una recopilación de los datos necesarios que se iban a necesitar para la aplicación de un Sistema de Información Geográfica y la posterior modelización en 3-D de las cuevas producidas por la disolución de las rocas carbonatadas. Para la modelización se usaron métodos geoestadísticos de interpolación.

Entre estos datos, se encontraban las coordenadas geográficas de la situación exacta de los reconocimientos disponibles, planos topográficos de la zona en formato .dwg (ver Anexo I) e información geológica proporcionada, tanto de planos como de la información obtenida “in situ” durante la perforación.

En la siguiente imagen se observa un ejemplo de las fichas rellenas por el técnico responsable (geólogo) de cada perforación realizada, en las que se incluye además de información relativa al sistema de perforación, los materiales que se atraviesan y la profundidad a la que se encuentran.

<p><b>OBRA:</b></p> <p><b>CLIENTE:</b></p> <p>PILA: 1      FILA: <input type="text" value="2"/>      COLUMN: <input type="text" value="3"/></p> <p>Ø MICROPILOTE: <input type="text" value="250"/></p> <p>Ø ARMADURA: <input type="text" value="127"/></p>	<p><b>MÁQUINA:</b> <u>CTC-900</u></p> <p><b>OPERARIO:</b> <u>OSCAR</u></p> <p><b>SISTEMA DE PERFORACIÓN:</b> <u>ROTACIONAL (móvil en fondo)</u></p> <p>ENT. RECUPERABLE <input type="checkbox"/>    ENT. PERDIDA <input checked="" type="checkbox"/></p> <p>Ø ENTUBACIÓN: <u>200 mm</u></p> <p>PROFUN. ENTUBADA: <u>6.0 m</u></p>				
<p><small>INFORMACIÓN DE LOS MICROPILES PARA</small></p> 	<p><b>PROFUNDIDAD (m)</b></p> <p><b>MATERIALES PERFORADOS</b></p> 				
<p><b>DATOS PERFORACIÓN</b></p> <p>FECH. INICIO: <u>7/07/2011</u></p> <p>FECH. FIN: <u>7/07/2011</u></p> <p>LONGITUD TOTAL: <u>20.00 m</u></p>					
<p><b>ARMADURA</b></p> <p>LONGITUD DE LA ARMADURA (m): <u>15.00 m</u></p> <p>LONGITUD CONEXIÓN ENCEPADO (m): _____</p>					
<p><b>INYECCION DE LECHADA</b> <u>MORTERO (11/07/2011)</u></p> <p>CEMENTO INYECTADO (KG): _____</p> <p>TIEMPO DE INYECCIÓN (horas): _____</p> <p>VOLUMEN (m³) = <u>0.3</u></p>					
<p><b>CONFORME</b></p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;"><b>CLIENTE</b></td> <td style="width: 50%;"><b>ENCARGADO ATSG 98</b></td> </tr> <tr> <td style="height: 40px;"></td> <td style="height: 40px;"></td> </tr> </table>		<b>CLIENTE</b>	<b>ENCARGADO ATSG 98</b>		
<b>CLIENTE</b>	<b>ENCARGADO ATSG 98</b>				
<p><b>OBSERVACIONES</b></p> <div style="border: 1px solid black; height: 40px; width: 100%;"></div>					

**Figura 5.1.a-Parte de supervisión de perforación**

En total se han recogido durante este proyecto, más de 400 fichas y registros de perforaciones, así como más de 1000 metros de sondeos con recuperación continua de testigo debidamente testificados por un técnico superior especialista.



## 5.2 CREACIÓN DE TIN DE LA ZONA DE UBICACIÓN DE LOS RECONOCIMIENTOS

A partir de los planos topográficos en formato Autocad se realizó mediante ArcGis, dos TIN de la zona, uno con la topografía anterior al desmonte y otro una vez realizado la excavación en la ubicación de las pilas y estribos del viaducto.

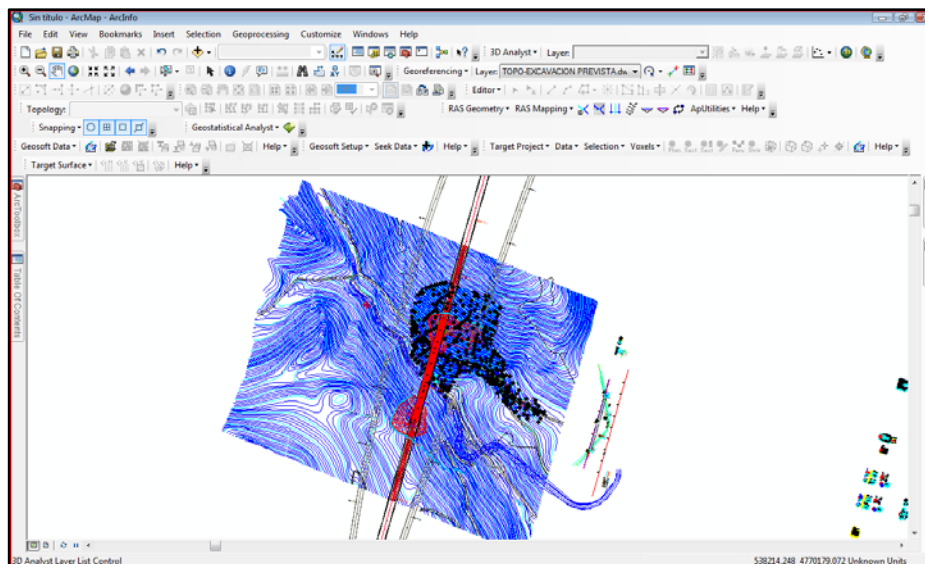


Figura 5.2.a-Topografía sin filtrar

Se ha efectuado un filtrado y evaluación de confiabilidad de los datos, descartando los valores posiblemente anómalos y revisando la cota de todos los reconocimientos disponibles. Con esta acción se consiguió dejar únicamente las curvas de nivel y los puntos de cota conocida, con lo que se obtuvo un fichero limpio a partir del cual poder trabajar.

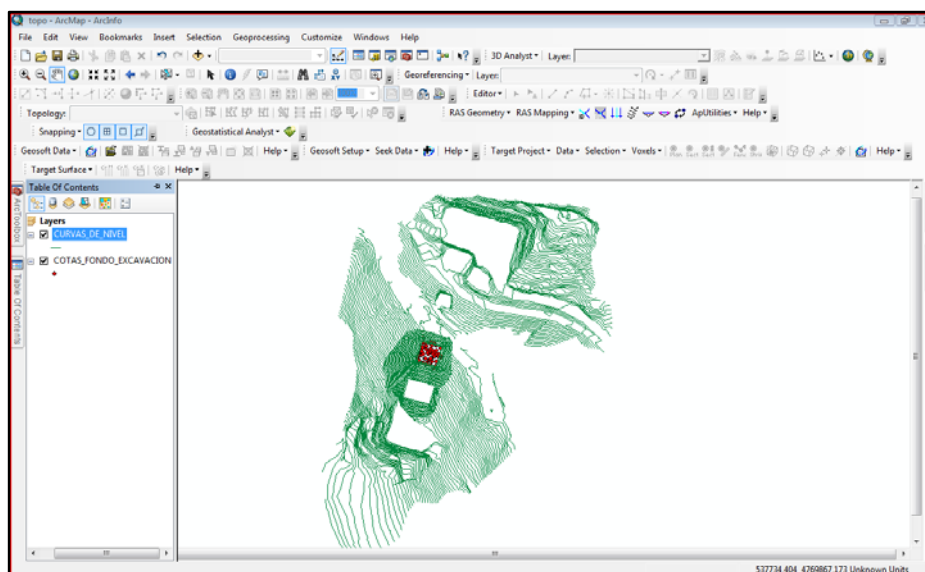


Figura 5.2.b-Curvas de nivel de la zona obtenida tras el filtrado

El siguiente paso fue crear el TIN de la zona. Para ello se utilizó la herramienta de ArcGis, “Create TIN”, en la que utilizamos las curvas de nivel obtenidas del filtrado del archivo y los puntos de cota conocida.

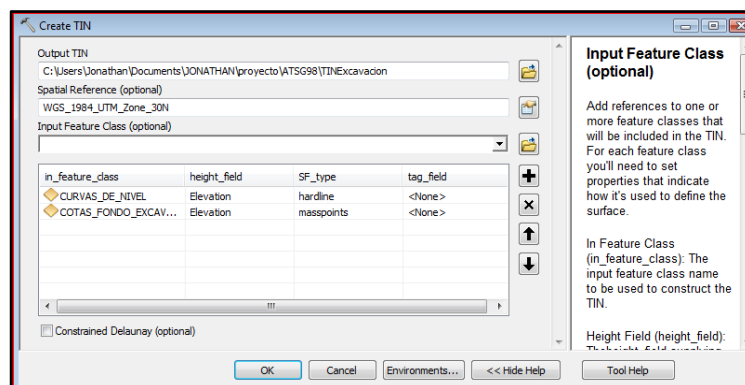


Figura 5.2.c-Herramienta “Create TIN” ArcGis

En la siguiente figura se observa el TIN resultante de utilizar esta herramienta mediante ArcGis.

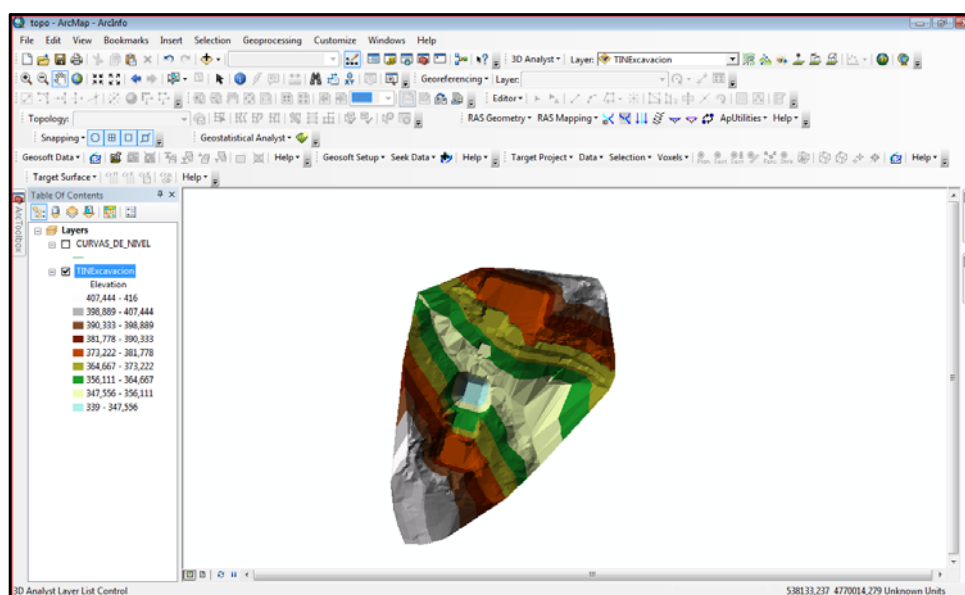
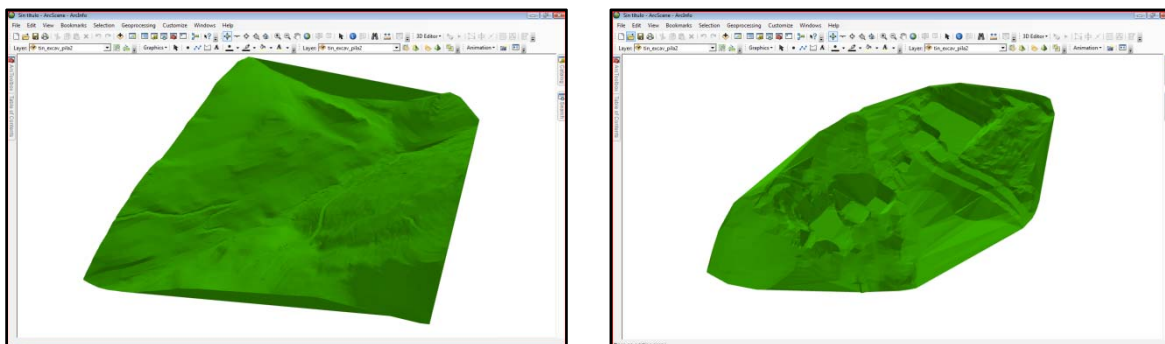


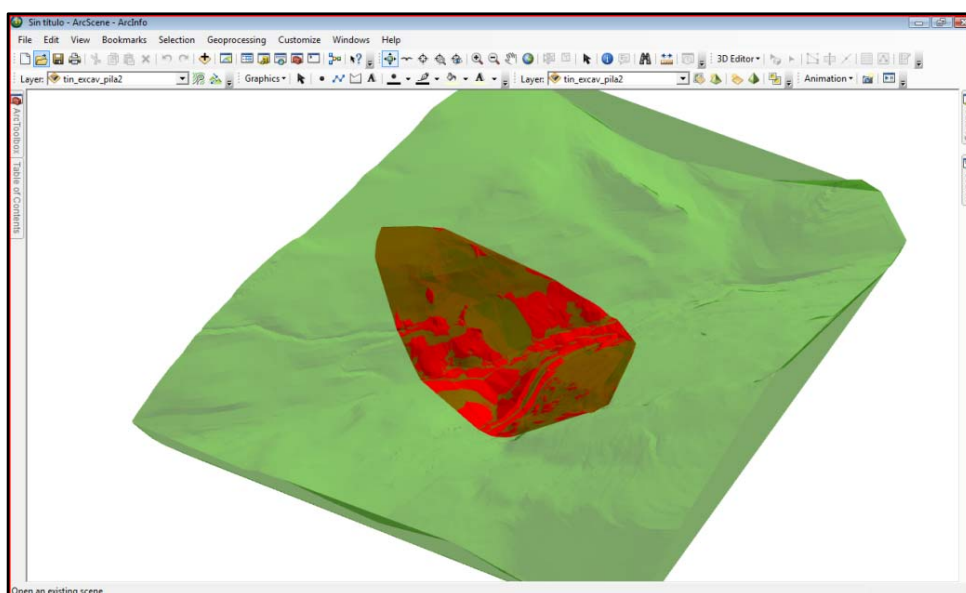
Figura 5.2.d-TIN creado mediante ArcGis

Para una mejor visualización, se cargan los ficheros creados en ArcScene, dónde se ve claramente la topografía anterior de la zona, y la ocasionada al excavar.



**Figura 5.2.e-Visualización tridimensional mediante ArcScene de la topografía**

Se superponen las 2 representaciones anteriores, para poder observar qué zona fue realmente afectada por la excavación.



**Figura 5.2.f-Zona afectada por el movimiento de tierras (ROJO)**

### 5.3 CREACIÓN DE UNA BASE DE DATOS

El siguiente paso fue la creación de una base de datos con toda la información recopilada anteriormente. En ella se incluye toda la información geológica y geográfica de cada reconocimiento. Entre la información recopilada se encuentra:

- Sondeos y reconocimientos geotécnicos de las distintas fases de proyecto.
- Cartografía y topografía de proyecto (relieve original sin modificar por la obra).

- Cartografía y topografía generada durante la fase de obra (comprende información de parte de las fases constructivas que han afectado al relieve durante la obra)
- Sondeos y reconocimientos geotécnicos efectuados durante la fase de la obra, y en particular perforaciones a destroza parametrizadas de investigación.
- Excavaciones y perforaciones efectuadas durante la cimentación.

Para la creación de esta base de datos se utilizó el software de la compañía Rockware, “ROCKWORKS 15”, que se trata de un programa con aplicación en geotecnia, minería, medio ambiente, etc., y con conectividad a un Sistema de Información Geográfica.

En primer lugar, se importan los datos geográficamente referenciados de los reconocimientos al programa. Estos datos se encuentran en formato Excel, por lo que su importación es cómoda y sencilla.

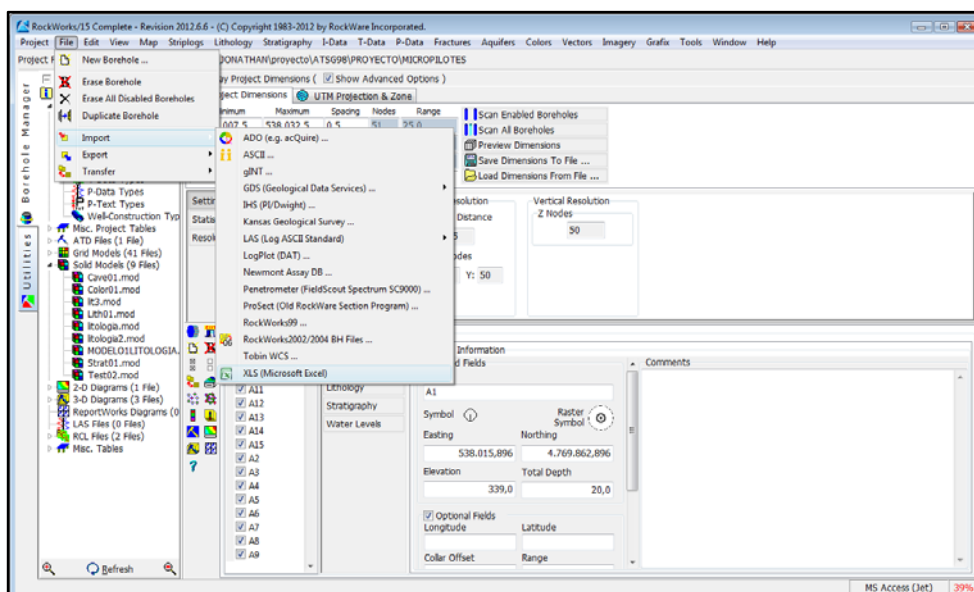


Figura 5.3.a-Importación de datos al programa ROCKWORKS

A partir de los datos geográficos de todos los sondeos, se determinan las dimensiones del proyecto y además, es en este momento, cuando se le asigna un sistema de coordenadas al proyecto, que en nuestro caso es el WGS-84.

	Minimum	Maximum	Spacing	Nodes	Range
X:	538.007,5	538.032,5	0,5	51	25,0
Y:	4.769.843,0	4.769.868,0	0,5	51	25,0
Z:	315,0	341,0	0,1	261	26,0

UTM Projection (Datum): WGS-84 (NAD-83)

UTM Zone: 30 (Northern Hemisphere)

Figura 5.3.b-Dimensiones proyecto

Figura 5.3.c-Proyección utilizada

Posteriormente se pasa toda la información geológica que se tiene de la zona. En este caso, los datos están en papel, por lo que se pasan de uno en uno al programa.

Se introduce por un lado la orientación de los datos disponibles, siendo la mayoría verticales, existiendo algunos elementos con 15° respecto a la vertical.

En la figura siguiente se muestra una captura de pantalla con la información de la orientación de los reconocimientos de tipo lineal, en la que hay que introducir la inclinación de la perforación y el azimuth.

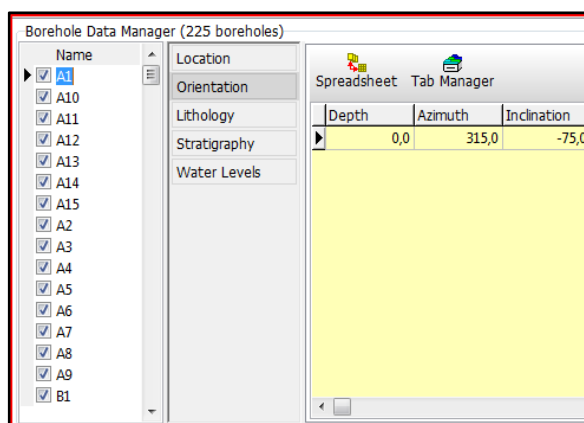


Figura 5.3.d-Orientación de los micropilotes

El valor de la inclinación va de 0 a 90°, siendo 90° si es totalmente vertical y 0° si es horizontal. El valor positivo o negativo de la inclinación nos indica para en que dirección se inclina el reconocimiento respecto a la vertical.

Por último se introduce los datos de la geología, en este caso la litología y la profundidad a la que se observan los contactos entre los distintos materiales.

La zona de cuevas (Karst), se consideró como una litología aparte, aunque proviene de la disolución de los materiales calcáreos (calizas) que aparecen en profundidad. Esto se realizó así, para que el programa realizara, por medio de cálculos de interpolación una

interpretación de las cuevas y se pudieran modelizar, lo que resultó fallido, como se verá posteriormente.

Los materiales atravesados por los reconocimientos fueron:

- **ÁNTROPICO:**
  - Hormigón
  - Relleno de arcillas y bloques
- **CALIZA:**
  - Caliza poco fracturada
  - Caliza muy fracturada
- **ARCILLA**
- **BRECHAS CALCÁREAS**
- **KARST:**
  - Huecos netos huecos (Cuevas).
  - Huecos netos con rellenos arcillosos (Cuevas rellenas de arcilla).

The screenshot shows the 'Borehole Data Manager (225 boreholes)' window. On the left, a list of boreholes (A1 to A6) is visible with checkboxes. The main area displays a table with columns: Depth to Top, Depth to Base, Keyword, and Comment. The data rows are as follows:

Depth to Top	Depth to Base	Keyword	Comment
0,0	1,5	HORMIGÓN	
1,5	2,1	RELLENO DE ARCILLA	
2,1	4,0	CALIZA	
4,0	5,0	ARCILLA	
5,0	10,0	CALIZA	
10,0	10,5	ARCILLA	
10,5	20,0	CALIZA	

**Figura 5.3.e-Datos sobre la litología**

Una vez introducido toda la información, el programa directamente la guarda en una base de datos en formato MS Access, donde automáticamente calcula las coordenadas geográficas exactas para los distintos contactos litológicos.

Lithid	Bhid	Depth1	Depth2	LithTypeID	Comment	X1	Y1	Z1	X2
1	1	0	1	1		538015,896	4769862,896	339	538015
2	1	1	15	2		538015,712987298	4769863,0790127	338,034074173711	538013
3	2	0	1,5	1		538023,254	4769860,803	339	
4	2	1,5	3	3		538023,254	4769861,19122857	337,551111260566	
5	2	3	4	2		538023,254	4769861,57945714	336,10222521133	
6	3	0	1,5	1		538024,071	4769860,571	339	
7	3	1,5	3,2	3		538024,071	4769860,59322857	337,551111260566	
8	3	3,2	5	4		538024,071	4769861,39922094	335,909037355875	
9	3	5	15,4	2		538024,071	4769861,86509523	334,170370868555	
10	4	0	1,8	1		538024,889	4769860,338	339	
11	4	1,8	4,2	3		538024,889	4769860,80397428	337,26133351268	
12	4	4,2	20	2		538024,889	4769861,42503998	334,943111529586	
13	5	0	2	1		538025,706	4769860,106	339	
14	5	2	6	5		538025,706	4769860,62263809	337,068148347422	
15	5	6	6,8	4		538025,706	4769861,65891427	333,204445042266	
16	5	6,8	20	2		538025,706	4769861,86596951	332,431704381234	
17	6	0	1,5	1		538026,524	4769859,873	339	
18	6	1,5	2,7	3		538026,524	4769860,26122857	337,551111260566	
19	6	2,7	8	2		538026,524	4769860,57181142	336,392000269019	
20	6	8	9	5		538026,524	4769861,94355236	331,27299389687	
21	6	9	20	2		538026,524	4769862,20237141	330,306667563398	
22	7	0	1	1		538027,342	4769859,64	339	538027
23	7	1	3,2	3		538027,525012702	4769859,8230127	338,034074173711	538027
24	7	3,2	6	2		538027,927640646	4769860,22564065	335,909037355875	538028
25	7	6	7	5		538028,440076211	4769860,73807621	333,204445042266	538028
26	7	7	17	2		538028,623088913	4769860,92108891	332,238519215977	538030

Figura 5.3.f-Detalle de la base de datos creada por ROCKWORKS

## 5.4 MODELIZACIÓN DE LOS DATOS EN PROFUNDIDAD

A partir de la base de datos que se ha creado por “Rockworks”, con el mismo software podemos realizar una recreación de los datos en 3-D.

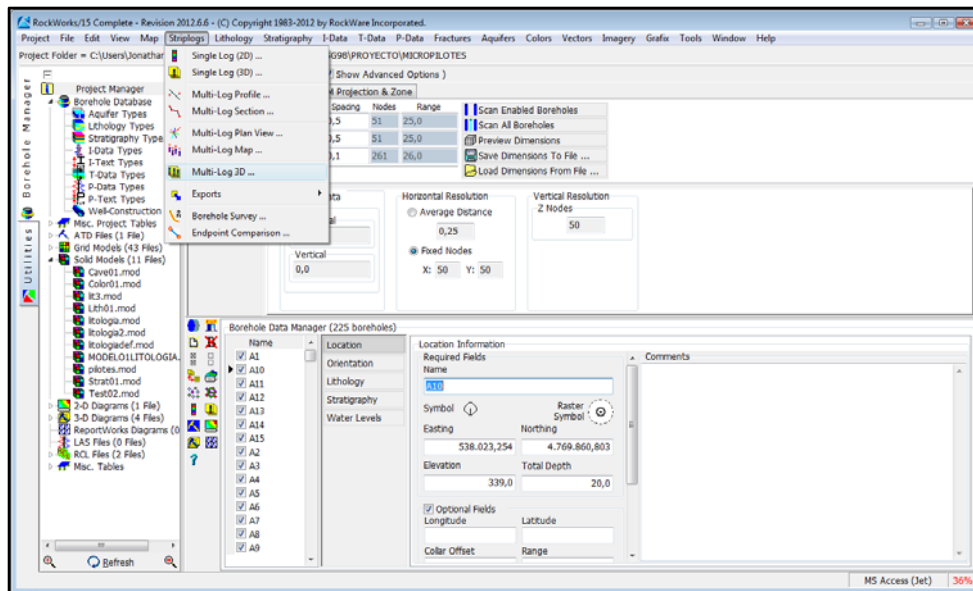
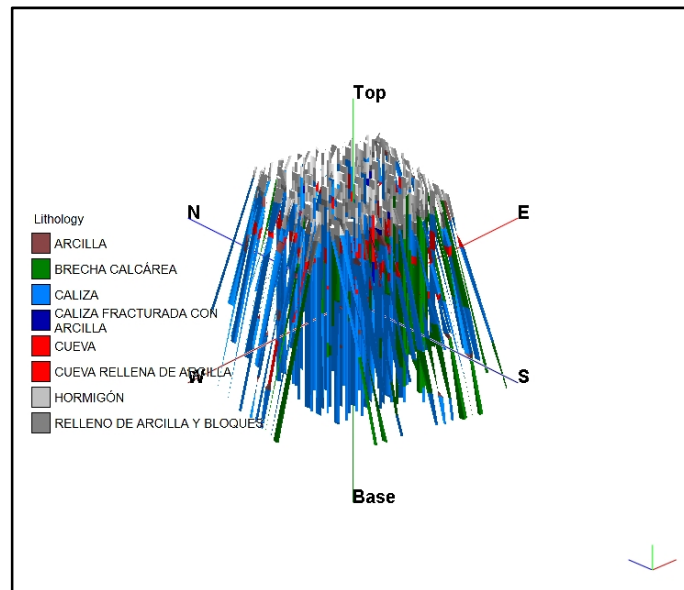


Figura 5.4.a-Captura de pantalla ROCKWORKS

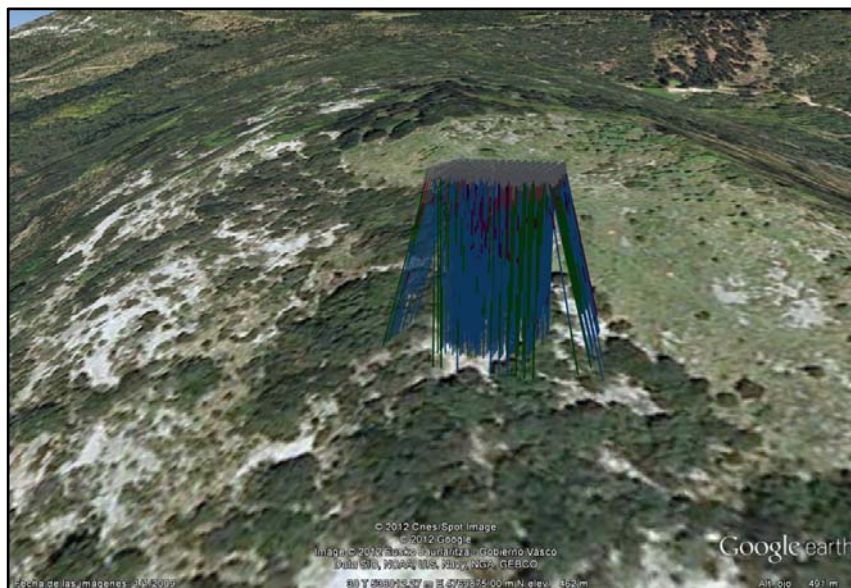
En la siguiente figura se muestra el resultado de la representación tridimensional de la población de datos, con la leyenda de los materiales atravesados durante la perforación.





**Figura 5.4.b-Representación en 3-D de los datos mediante ROCKWORKS**

Podemos pasar esta modelización de los datos al “Google Earth”, para una mejor visualización sobre el terreno.



**Figura 5.4.c-Visualización de la malla de datos en Google Earth**

Otra posibilidad fue exportar la modelización realizada con “Rockworks” a formato ESRI shape, para poder abrirlo con ArcGIS.



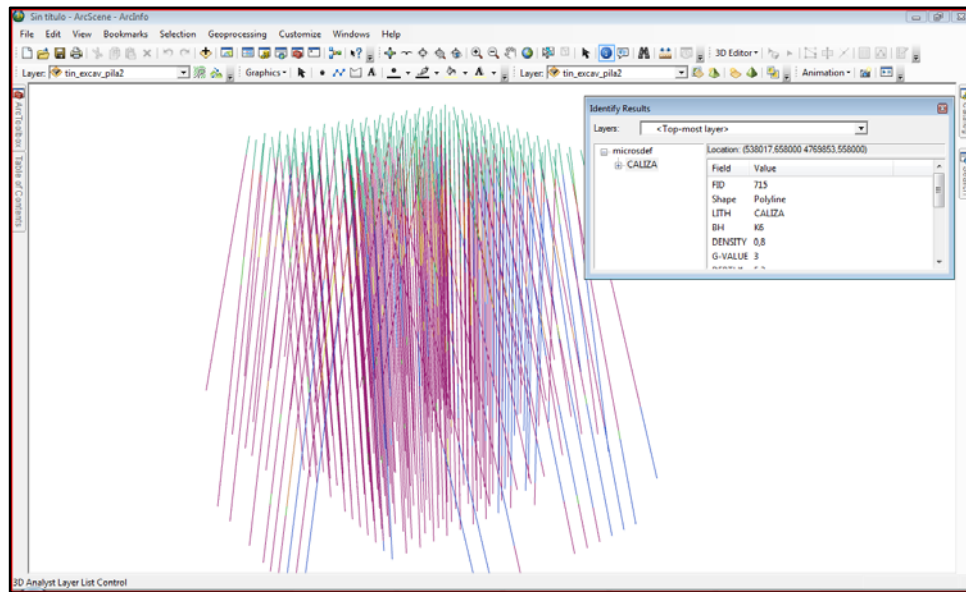


Figura 5.4.d-Visualización de la malla de datos mediante ArcGis

Finalmente, se le añadió la topografía de la zona excavada para obtener una representación lo más real posible de la cimentación profunda realizada como sostenimiento del apoyo del viaducto.

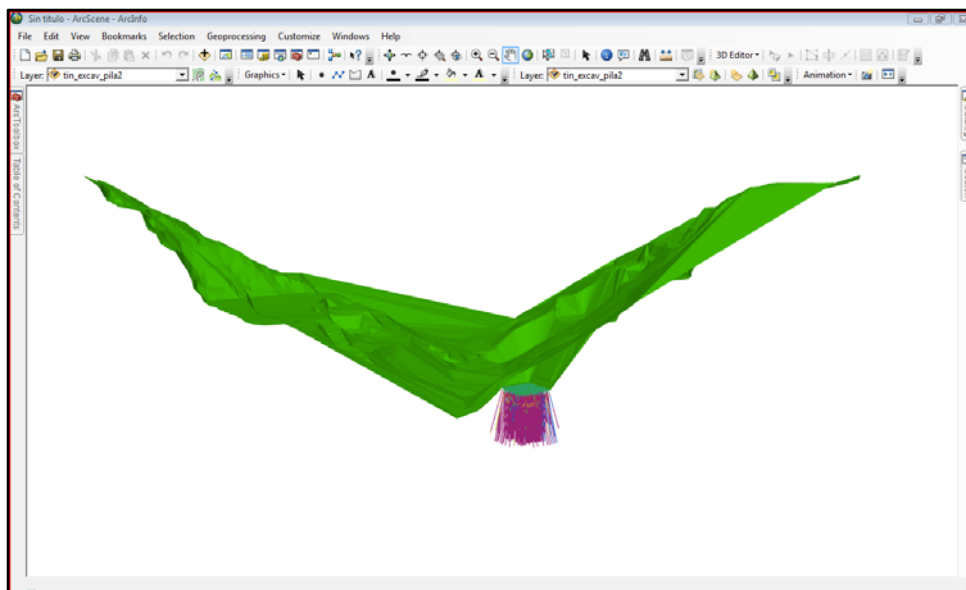


Figura 5.4.e-Representación conjunta de la topografía y la malla de datos

## 5.5 MODELO LITOLÓGICO Y ESTRATIGRÁFICO

El siguiente paso en nuestro trabajo fue el intento de modelización de los materiales en profundidad, para poder obtener una representación fiable del recorrido que seguían las cuevas en profundidad.

### 5.5.1 Modelo litológico

El primer paso fue la creación de un modelo, a partir de la información litológica que habíamos introducido en el programa.

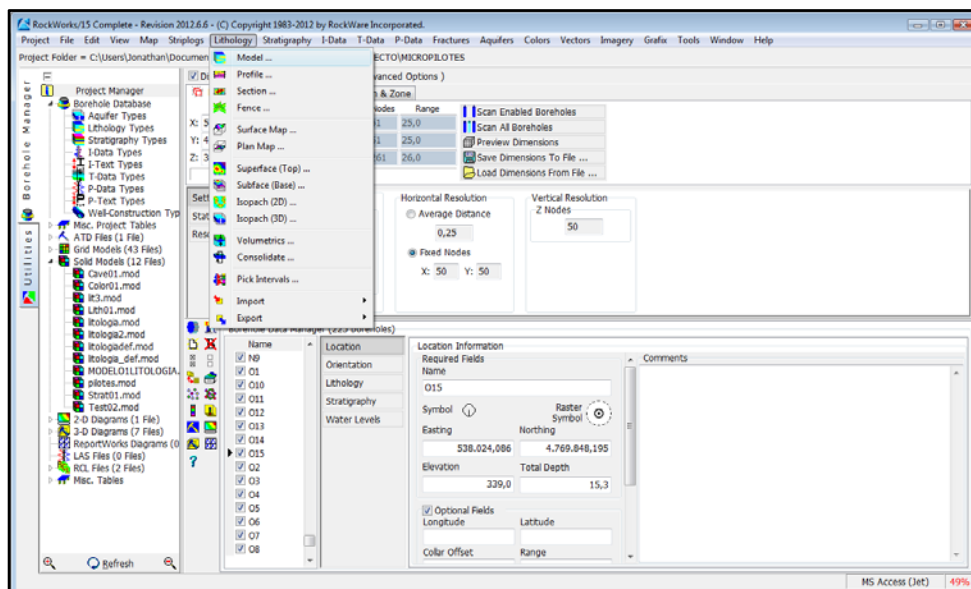


Figura 5.5.1.a-Creación del modelo litológico

En este momento apareció el primer problema, ya que para que el programa fuera capaz de modelar las cuevas, necesitaba datos de direcciones y buzamientos de las fracturas, y únicamente se constaba de datos sobre los materiales y la profundidad a la que iban apareciendo durante la perforación.

Por tanto, se tomó la decisión de indicarle al programa que las cuevas se trataran como un material litológico aparte.

El software Rockworks utiliza para la interpolación, algoritmos con los que se crea el posible modelo geológico que encontramos en la zona del ámbito de la cimentación.

El resultado de la modelización litológica se puede observar a continuación, en la siguiente figura.

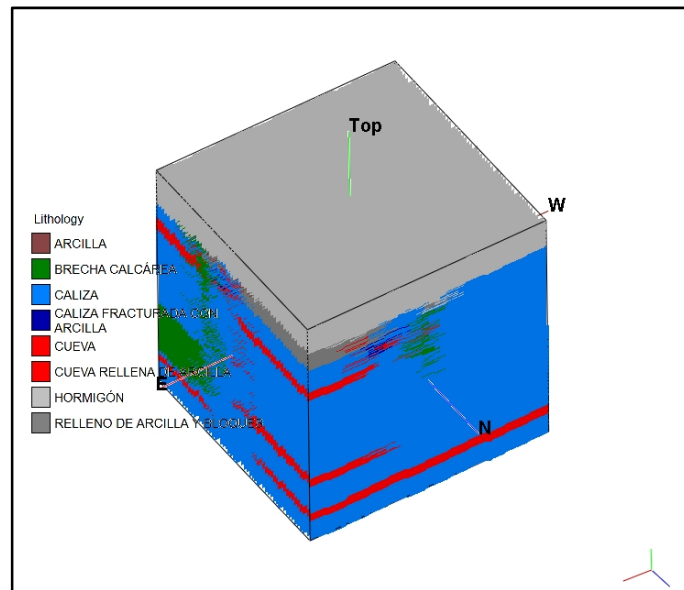


Figura 5.5.1.b-Representación modelo litológico

A partir de este modelo, se pueden realizar perfiles litológicos que se pueden exportar a distintos formatos, como por ejemplo .dxf o ESRI shape.

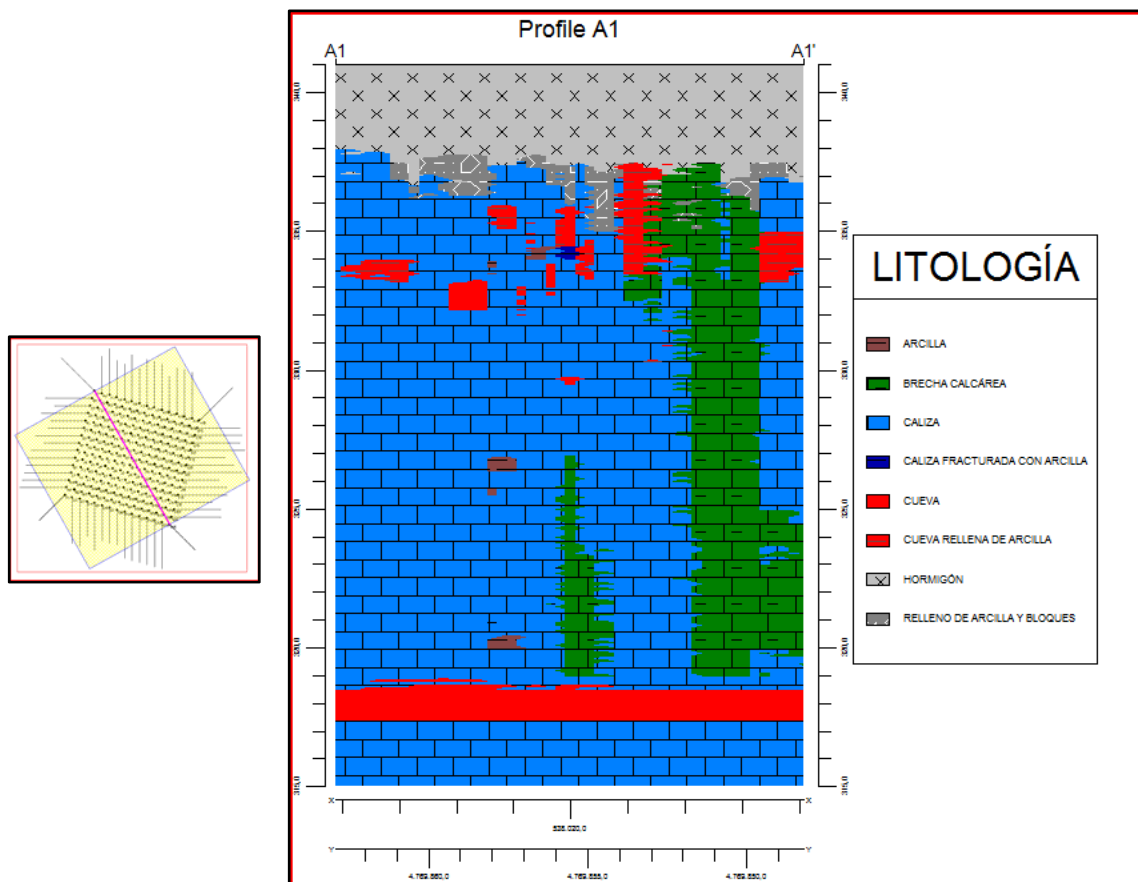
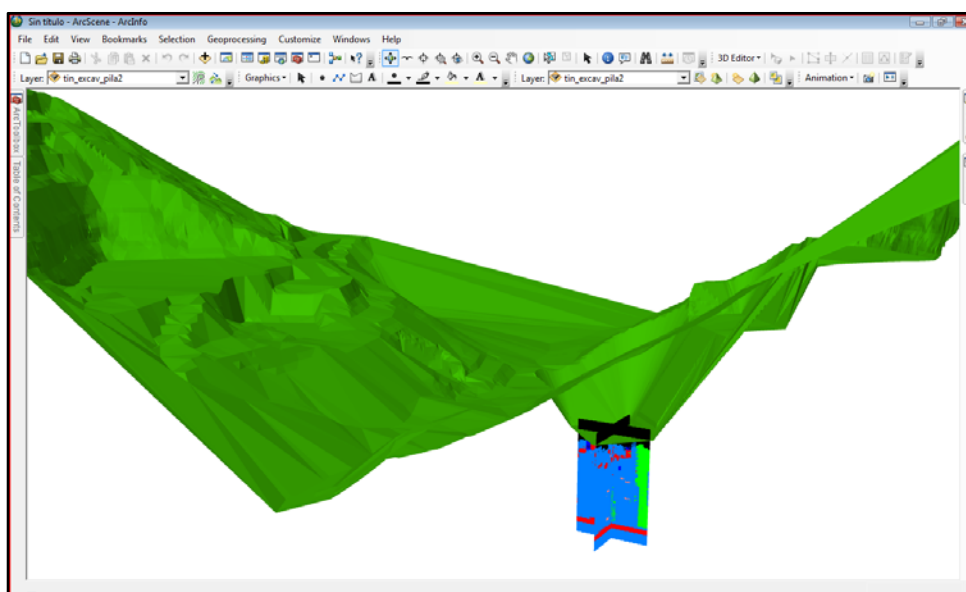


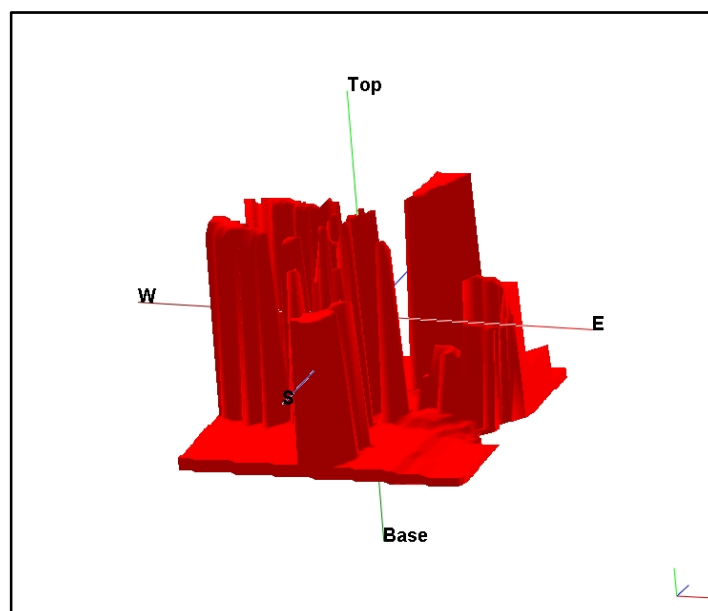
Figura 5.5.1.c-Perfil realizado a partir del modelo litológico

En la siguiente figura se muestra una representación tridimensional de 2 perfiles litológicos, mediante ArcGis.



**Figura 5.5.1.d-Representación de los perfiles litológicos en ArcGis**

Por último, se pasa a intentar modelar las cuevas a partir del modelo litológico creado anteriormente. Para ello, utilizamos una herramienta que nos crea un modelo de isopacas que sirve para obtener la distribución de las cuevas en tres dimensiones.



**Figura 5.5.1.e-Intento de modelización de las cuevas a partir del modelo litológico**

Como vemos, el resultado no fue el esperado, ya que el recorrido de las cuevas debía tener una forma tubular.

### 5.5.2 Modelo estratigráfico

Al ver que el primer modelo no fue nada realista, se pensó en utilizar otras herramientas del Rockworks.

Se nos ocurrió crear un modelo estratigráfico, ya que en este caso el programa utiliza para su creación métodos geoestadísticos de interpolación, como el “Krigging” o la Inversa de la distancia:

➤ **“Krigging”**

El “krigging” es un método de interpolación Geoestadístico lineal porque los estimadores se forman por la combinación lineal de los datos disponibles; tiene 2 características básicas:

1. Minimiza la varianza del error (el cuadrado de las desviaciones)
2. Es insesgado porque trata que la suma de los errores sea cercana a 0

El “krigging” utiliza el variograma para predecir valores desconocidos de variables distribuidas espacialmente, a partir de datos observados en lugares conocidos. “Krigging” es por lo tanto, el método para calcular el valor de una variable  $Z$  en un punto  $X_0$  que ha sido considerado anteriormente, realiza una combinación lineal tomando los vecinos más cercanos al punto de interés  $X_0$ , utiliza la fórmula que es la suma ponderada sobre todos los sectores que conforman la zona de estudio.

$$Z(X_0) = \lambda_1 z(x_1) + \lambda_2 z(x_2) + \dots + \lambda_n z(x_n)$$

$$\hat{Z}(x_0) = \sum_i^n \lambda_i Z(x_i) \quad \text{y} \quad \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$$

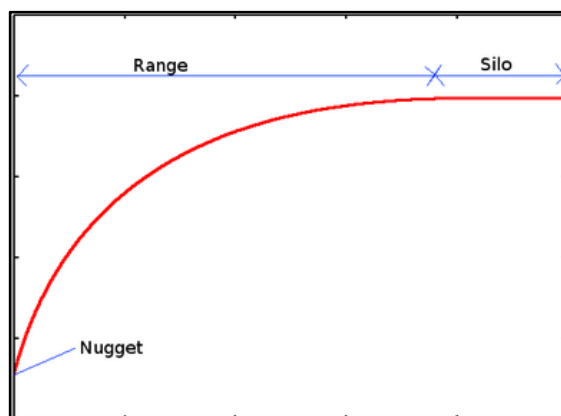
donde,

$z(x_i)$  : Valores en los sitios donde hubo medición

$\lambda_i$  : Vector de ponderación que minimiza el error de predicción

El “kriging” consiste en asignar pesos a los valores observados más cercanos, los pesos son calculados de manera que minimice la varianza de estimación resultante, teniendo en cuenta las características geométricas del problema, estos pesos son asignados a partir de un análisis espacial, basado en el Variograma experimental.

Un método de interpolación será exacto cuando pase por los puntos de la muestra, lo más cercano posibles a ellos.



**Figura 5.5.2.a.-Variograma**

- **Efecto nugget ( $C_0$ )**

Por lo general, el variograma no tiende a cero como lo hace la distancia  $h$ , el efecto nugget es una discontinuidad de salto en el origen conocido también como efecto Pepita, representa la discontinuidad en el semivariograma para distancias que sean menores que la menor distancia dada entre los puntos muestrales. Esta discontinuidad se puede dar también debido a errores en la medición o a una pobre precisión analítica.

- **Sill ( $C$ )**

El “sill” conocido también como La “Meseta” es el valor máximo que alcanza el semivariograma cuando la variable es estacionaria. Teóricamente, la meseta coincide con el valor de la varianza y por tanto un buen estimador de la misma será la varianza experimental de los datos.

- **Rango ( $a$ )**

Conocido también como Alcance, el Rango es la distancia a la cual el variograma se estabiliza y las muestras se relacionan espacialmente.

➤ **Método de interpolación por la inversa de la distancia**

Este método de interpolación consiste en estimar los puntos del modelo, asignando los pesos de los datos del entorno en función inversa a la distancia. Es decir, los puntos más cercanos al valor a calcular “z” intervienen más que los más alejados.

Su fórmula es la siguiente:

$$z_j = \frac{\sum z_i / d_{ij}^\beta}{\sum 1 / d_{ij}^\beta}$$

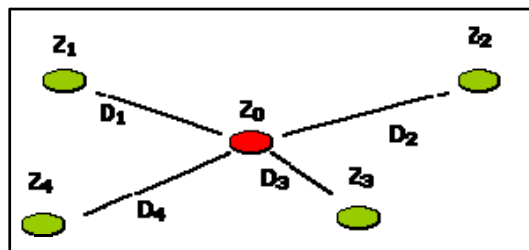
donde ,

$z_j$  : punto problema

$z_i$  : punto del entorno

$\beta$  : exponente de ponderación;

$d_{ij}$  = distancia entre los puntos



5.5.2.b-Esquema del procedimiento de la IDW

❖ **Creación del modelo estratigráfico**

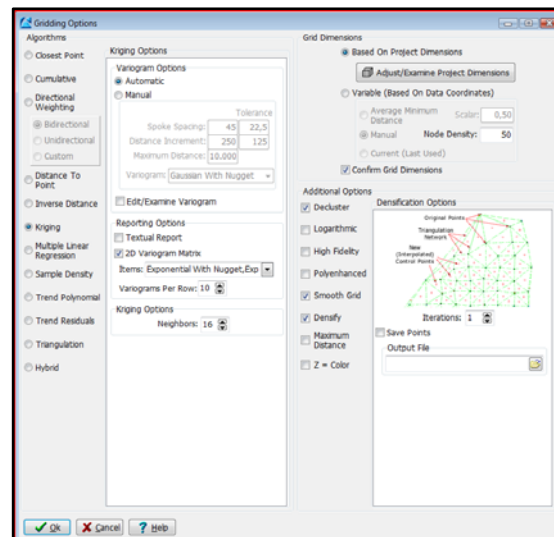
Los modelos estratigráficos se diferencian de los litológicos, en que los primeros representan las formaciones (conjunto de litologías de la misma edad) y en los litológicos los materiales rocosos por separado.

Para realizar este tipo de modelo, se establecieron 5 formaciones distintas:

- Antrópico
- Arcilla
- Caliza
- Brecha Calcárea
- Karst

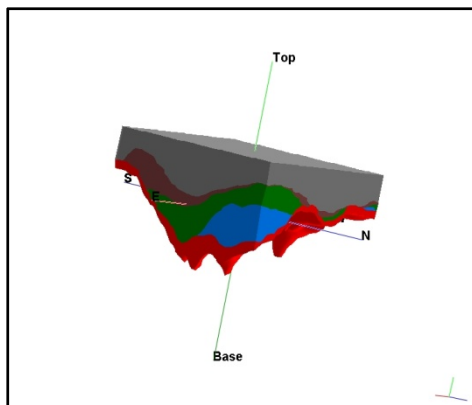
Formation	Pattern	Fill Percent
▶ ANTRÓPICO		100
CALIZA		100
ARCILLA		100
BRECHA CALCÁREA		100
KARST		100

Se realizaron 2 modelos distintos, uno mediante Krigging y otro utilizando el Método de la Inversa de la Distancia.

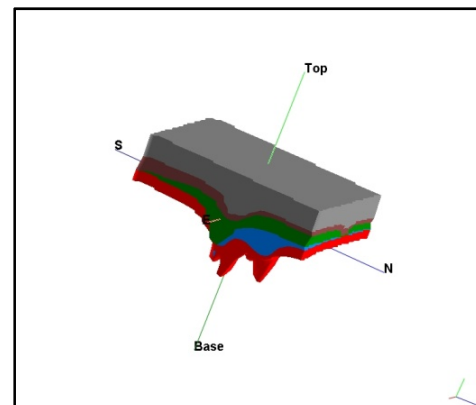


### 5.5.2.c-Métodos de interpolación utilizados por ROCKWORKS

En las siguientes figuras se muestran los resultados de crear estos modelos.



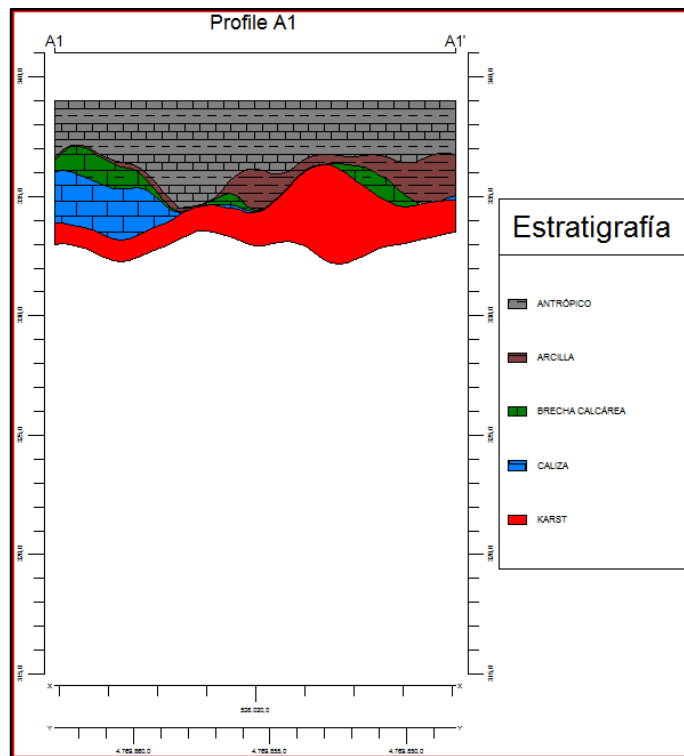
5.5.2.d-Modelo por la Inversa de la distancia



5.5.2.e-Modelo por Krigging

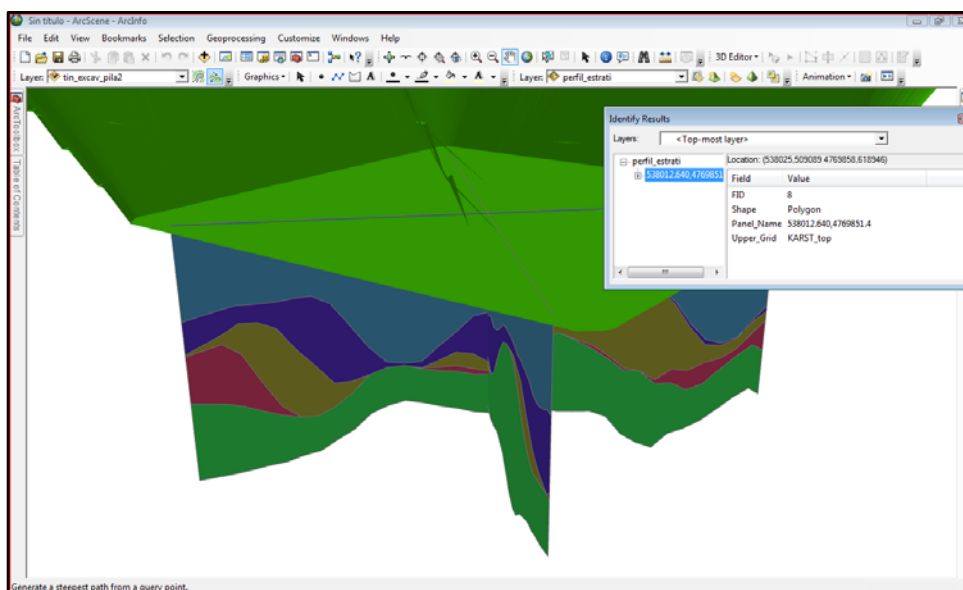


Como en el caso del modelo litológico, se pueden realizar perfiles en dos y tres dimensiones para ser visualizados posteriormente en ArcGis.



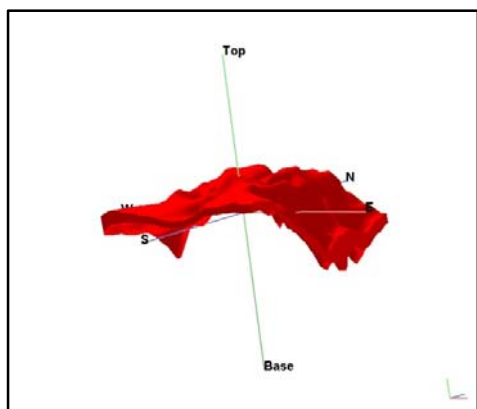
### 5.5.2.f-Perfil creado a partir del modelo estratigráfico

En la siguiente figura se observa el resultado de la exportación de 2 perfiles longitudinales en ArcGis, con la representación de la topografía después de la excavación.

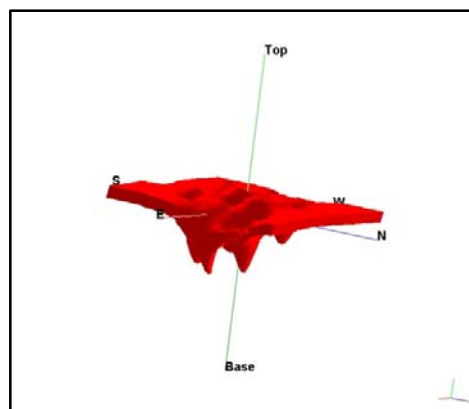


### 5.5.2.g-Importación de los perfiles estratigráficos a ArcGis

Por último, se intentó modelar las cuevas a partir de los modelos estratigráficos realizados, pero como se observa en las figuras siguientes, los resultados después de la interpolación son nuevamente fallidos, ya que considera al Karst como una capa prácticamente plana y no aparecen las formas tubulares propias de la formación de cuevas.



**5.5.2.h-Modelo cuevas por Inversa de la distancia**



**5.5.2.i-Modelo cuevas por Krigging**

Se concluye por tanto que, con el Rockworks, el seguimiento de las cuevas producidas por la formación de un karst es imposible de modelizar mediante métodos de interpolación, sin datos referentes a las fracturas del terreno.

## **5.6 MODELO KARST MEDIANTE VOXLER**

Al no obtener resultados satisfactorios en el intento de modelización del karst mediante la utilización del programa Rockworks, se pasó a utilizar el software de la compañía Golden Software denominado “Voxler 3”. Se trata de un software muy sencillo de utilizar para crear modelos tridimensionales a partir de la utilización de métodos geoestadísticos de interpolación.

### **5.6.1 Introducción de datos en el programa**

El primer paso de modelización, es conocer las coordenadas de los distintos puntos donde aparecen las cuevas.

Para ello, a partir de la base de datos creada directamente por el programa Rockworks, se creó una tabla en MS Excel, en la que para cada contacto litológico tenemos unas coordenadas geográficas específicas.

The screenshot shows a Microsoft Excel spreadsheet titled 'LITOLOGIA(tema) - Microsoft Excel'. The spreadsheet has the following data:

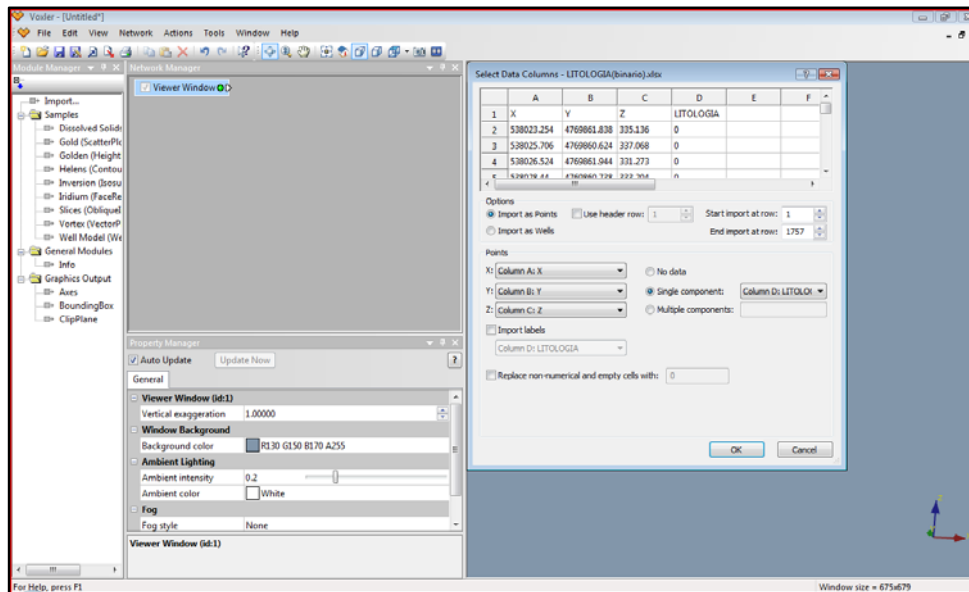
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	X	Y	Z	LITOLOGIA							0 karst				
2	538.023,25	4.769.861,84	335,136	0							1 resto de litologia				
3	538.025,71	4.769.860,62	337,068	0											
4	538.026,52	4.769.861,94	331,273	0											
5	538.028,44	4.769.860,74	333,204	0											
6	538.030,45	4.769.862,75	322,579	0											
7	538.022,44	4.769.862,07	335,136	0											
8	538.023,84	4.769.859,75	336,5	0											
9	538.025,47	4.769.859,29	335	0											
10	538.026,29	4.769.859,06	334,5	0											
11	538.028,40	4.769.858,82	334,17	0											
12	538.029,54	4.769.858,82	329,52	0											
13	538.016,48	4.769.861,85	334	0											
14	538.018,12	4.769.861,38	325	0											
15	538.018,93	4.769.861,15	335,8	0											
16	538.022,20	4.769.860,22	335,8	0											
17	538.014,32	4.769.861,26	334,847	0											
18	538.022,79	4.769.859,17	335,8	0											
19	538.023,61	4.769.858,84	335	0											
20	538.026,06	4.769.858,24	336	0											
21	538.016,25	4.769.861,03	334,9	0											
22	538.017,07	4.769.860,80	334	0											
23	538.018,70	4.769.860,33	334,5	0											
24	538.019,52	4.769.860,10	334,4	0											
25	538.020,34	4.769.859,87	334,2	0											
26	538.021,15	4.769.859,63	335	0											
27	538.021,97	4.769.859,40	334	0											

5.6.1.a-Tabla creada mediante MS Excel a partir de la base de datos

Para el procesamiento, Voxler necesita las coordenadas geográficas XYZ, junto con un valor que permita aplicar un método de interpolación.

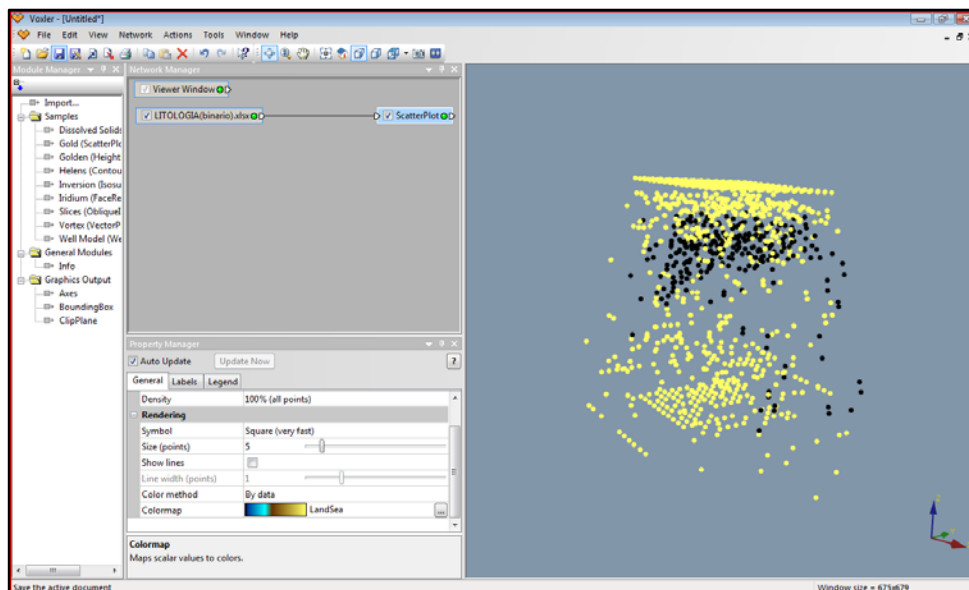
Después de varias pruebas y gracias a la lectura de algunos artículos que utilizaban el Voxler para la modelización de acuíferos (TABARES RÓDENAS, P. ET AL. (2009)), se llegó a la conclusión de que el valor utilizado para interpolar debía adquirir un carácter binario, aplicando un valor “1” para zonas donde existen material y “0” en las áreas correspondientes a las zonas de huecos netos.

El siguiente paso es la importación de esta tabla al programa. Los datos geográficos se importaron como puntos.



### 5.6.1.b-Importación de los datos al programa

A continuación, se realiza una representación de la disposición de los puntos en la zona, como se ve en la siguiente figura. Los puntos amarillos corresponden a zonas con material y los puntos negros corresponden a los huecos producidos por la karstificación.

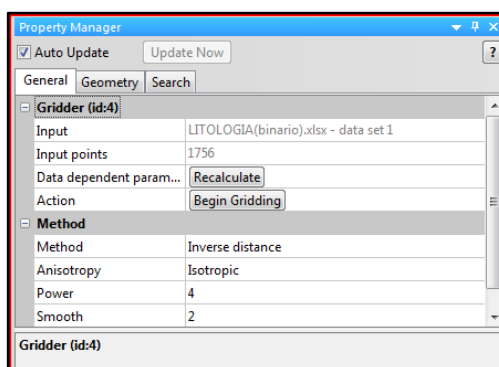
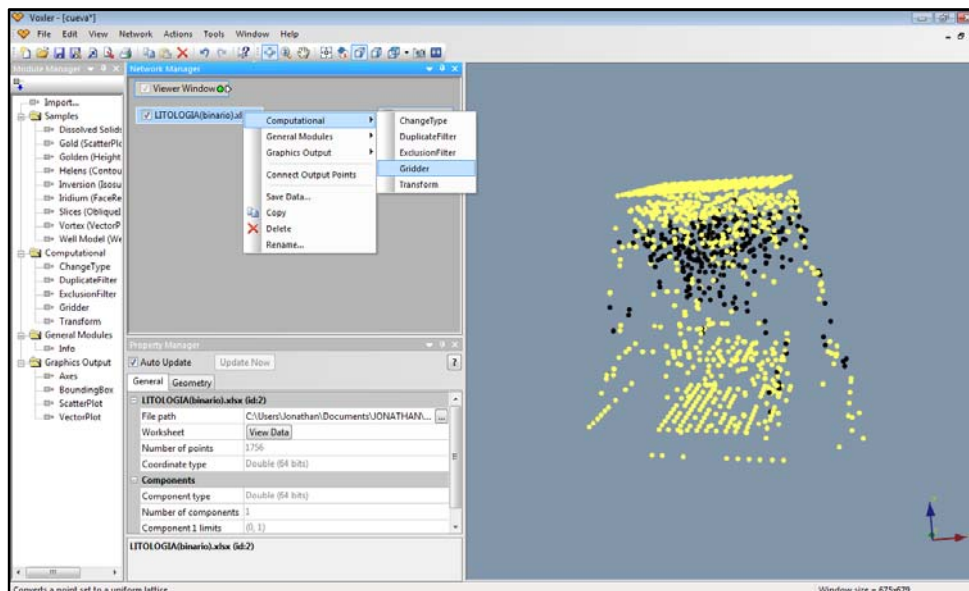


### 5.6.1.c-Representación de los puntos georeferenciados mediante VOXLER

## 5.6.2 Modelo del Karst

El siguiente paso en la modelización es utilizar una interpolación tridimensional según el método de la inversa de la distancia, que permite generar un cuerpo geométrico tridimensional que representa la estructura de las cuevas.

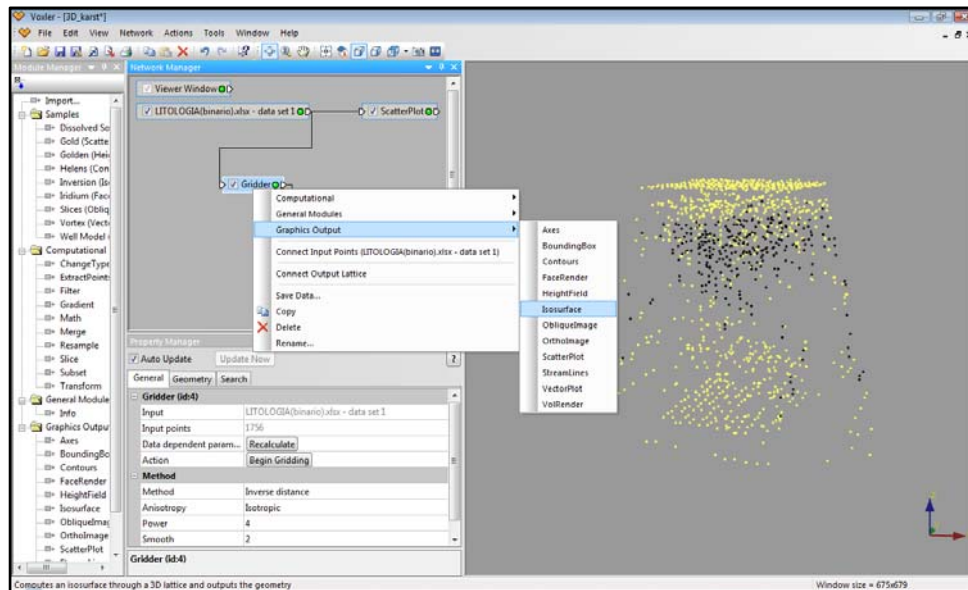
Para realizar la interpolación, debemos entrar en la opción “Gridder” del programa, lo que conllevará muchos cálculos por parte del programa, por lo que tarda unos minutos en realizarlos.



### 5.6.2.a- Aplicación de métodos de interpolación

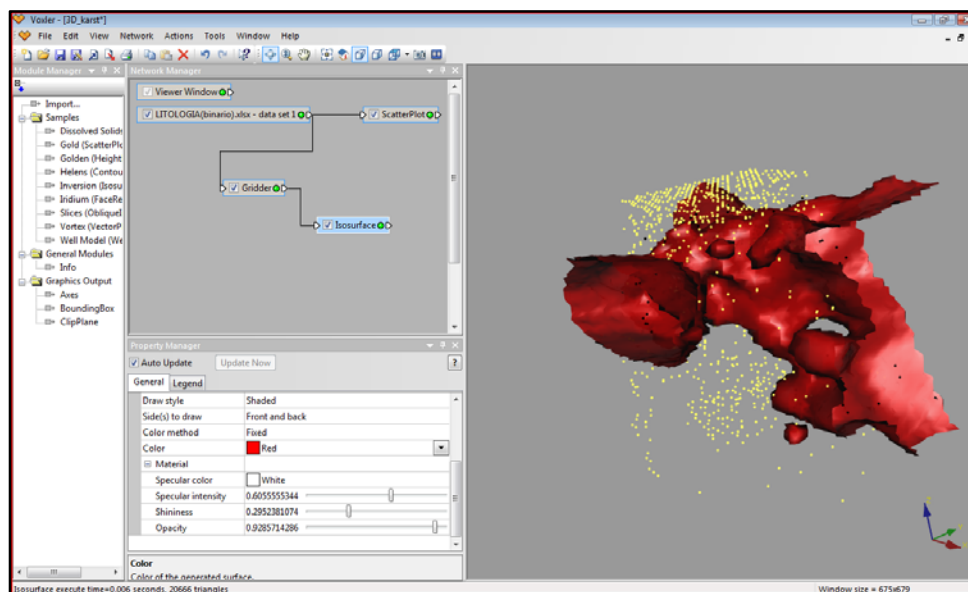
Una vez acabados los cálculos, el siguiente paso es la visualización gráfica de los resultados obtenidos.

A partir de la interpolación realizada mediante VOXLER, se crean isosuperficies que determinarán la forma de las cuevas presentes.



### 5.6.2.b-Creación de isosuperficies

Como se observa en la figura mostrada a continuación, la modelización de las cuevas parece más realista, ya que ahora parece adquirir algunas formas tubulares, propias de las cuevas.



### 5.6.2.c-Modelización del Karst

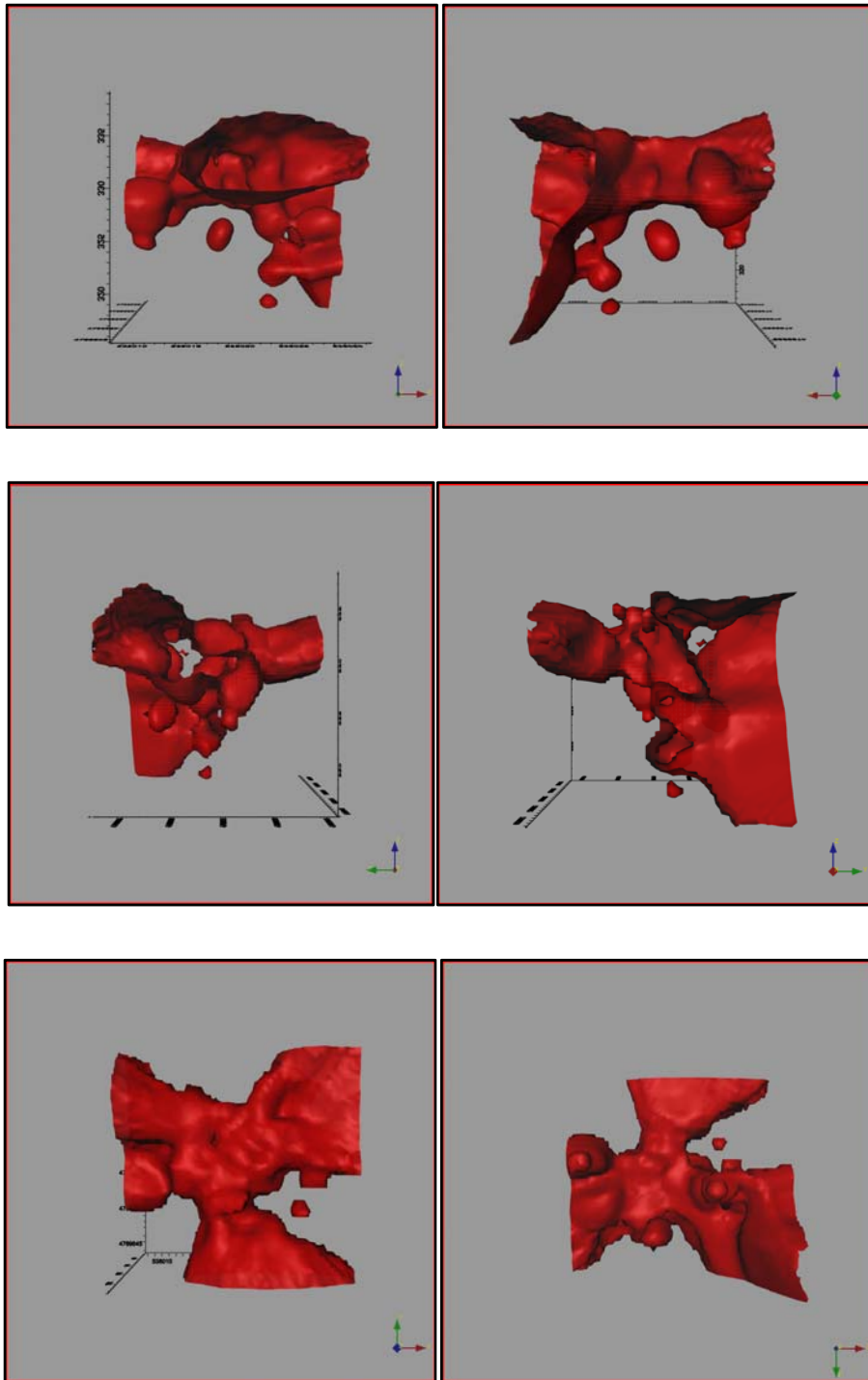
En la siguiente página se muestran diversas perspectivas obtenidas al modelizar mediante VOXLER.

Estas figuras permiten obtener conclusiones sobre la disposición de las cuevas, y se pueden realizar alguna hipótesis de interpretación.

Teniendo en cuenta que aparecen brechas calcáreas, posiblemente originadas por la presencia de una falla, una posible conclusión sobre el origen del karst sea la circulación del agua a través de esta fractura, provocando una meteorización química de las calizas.

Además podemos indicar que parece que se trata de una falla conjugada o conjunto de fallas formadas al mismo tiempo por condiciones de esfuerzo similares.

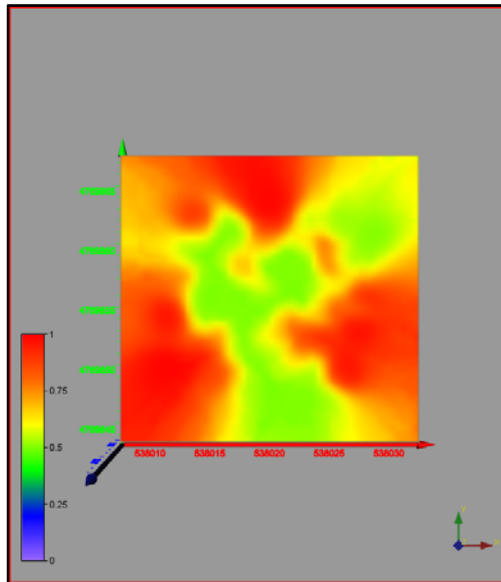
Como se muestra en la primera perspectiva, esta falla aparecería a unos 10 metros de profundidad respecto a la cota del plano de cimentación, y seguiría una dirección N-S con un ángulo entre las fallas de aproximadamente 60 °.



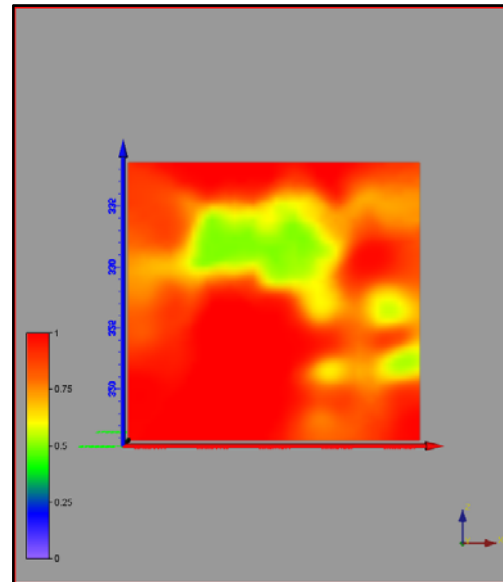
**5.6.2.d-Diferentes perspectivas de las cuevas**



Posteriormente para obtener datos sobre la longitud del karst, se realizaron varios perfiles de los conductos de las cuevas. En la siguiente figura se muestra un ejemplo de ellos, en la que el área de color verde corresponde al área del terreno ocupada por el endokarst.



5.5.2.e-Perfil en planta



5.5.2.f-Perfil para observar el ancho de la cueva

A partir de estos perfiles se deduce que la longitud que alcanzan las cuevas por debajo del encepado es de aproximadamente 10 metros y la anchura de las cámaras está comprendida entre valores centimétricos a 2 metros, pero hay que tener en cuenta que parte de las cuevas están rellenas de material arcilloso.

Gracias a esta modelización, se ha podido determinar el recorrido de un endokarst bajo la pila de un viaducto, usando para ello distinto software y demostrando la utilidad de los GIS en la posible resolución de problemas geotécnicos.

## 6. CONCLUSIONES

El objeto final de este proyecto es poder demostrar la utilidad de una herramienta GIS en el ámbito de la ingeniería civil, pudiendo ser de gran ayuda en la resolución de los distintos problemas que puedan surgir durante la realización de una obra.

Como resultado del análisis geoestadístico de la información recopilada, mediante métodos de interpolación tridimensional, se ha obtenido una representación gráfica de la geometría del endokarst que aparece bajo uno de los apoyos de un viaducto. La representación permite observar con gran detalle, la morfología de estas cuevas, permitiendo evaluar y modelizar la interacción terreno-estructura de la cimentación.

Para este estudio se utilizó la información procedente de las distintas fases de proyecto y obra con más de 400 reconocimientos recopilados.

El modelo tridimensional obtenido pone de manifiesto que las cuevas aparecerían a unos 10 metros de profundidad, alcanzando una longitud aproximadamente de unos 10 metros y con anchuras de los huecos, en algunos casos, de 2 metros.

El apoyo se encuentra sobre una falla, sugiriendo un desarrollo y propagación de la karstificación de tipo fisural, con un claro control litoestructural, a favor de la zona fracturada asociada a la falla, funcionando esta, a modo de vía preferencial de acumulación y migración de aguas.

El ejemplo desarrollado en el presente trabajo ilustra como la recopilación e integración de la información en herramientas GIS permite una mayor facilidad de interpretación de dichos datos, redundando en una mayor utilidad de los mismos. Esta conclusión por si misma es suficiente para justificar y fomentar el empleo de estas técnicas, no solo en el ámbito individual de proyectos de infraestructuras sino en el de bases de datos y plataformas dependientes de la administración, que permitan una mejor planificación, promoción y gestión de los recursos del estado.

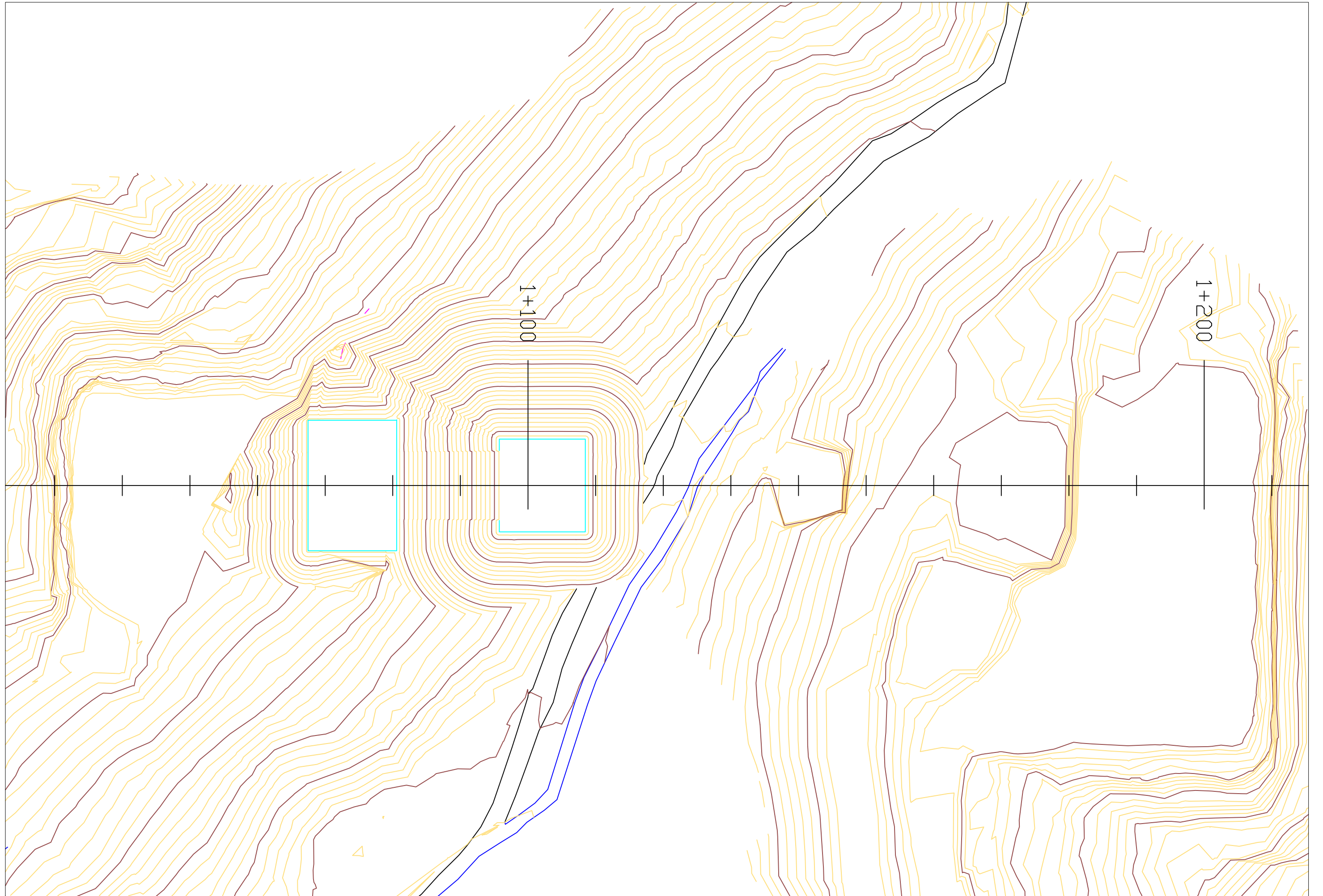
## 7. BIBLIOGRAFÍA

- PEDRAZA GILSANZ, J. (1996): *Geomorfología. Principios, Métodos y Aplicaciones*. Editorial Rueda. 414 pp.
- MINISTERIO DE FOMENTO (2004): *Guía de cimentaciones en obras de carretera*. 2ª edición, monografía, publicaciones de la Dirección General de Carreteras, Madrid, España. 304 pp.
- MINISTERIO DE FOMENTO (2005): *Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera*. Monografía, publicaciones de la Dirección General de Carreteras, Madrid, España. 142 pp.
- ROCKWARE (2010): *Manual de referencia software ROCKWORKS 15*. Editorial Rockware, Inc. (CO, USA). 316 pp.
- GOLDEN SOFTWARE (2012): *VOXLER 3, Quick Start Guide*. Editorial Golden Software, Inc. (USA). 47 pp.
- TABARES RÓDENAS, P. ET AL. (2009): *Modelización 3D del acuífero Terciario de Torre Vieja. Geometría del acuífero*. Boletín Geológico y Minero, 120.53-60 pp.

# ANEXOS

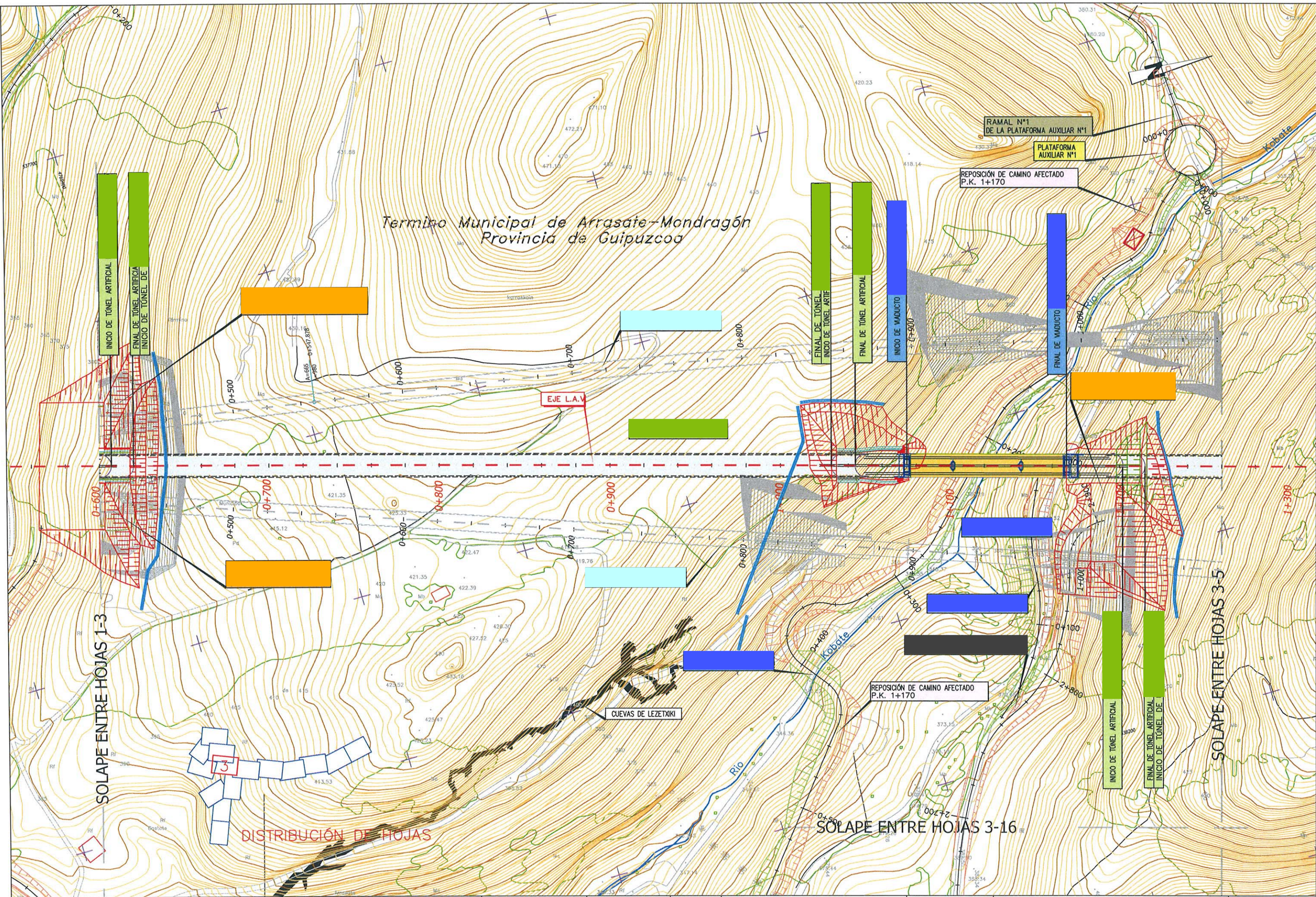
# **ANEXO I**

# **PLANOS**





Termino Municipal de Arrasate-Mondragón  
Provincia de Guipuzcoa



SOLAPE ENTRE HOJAS 1-3

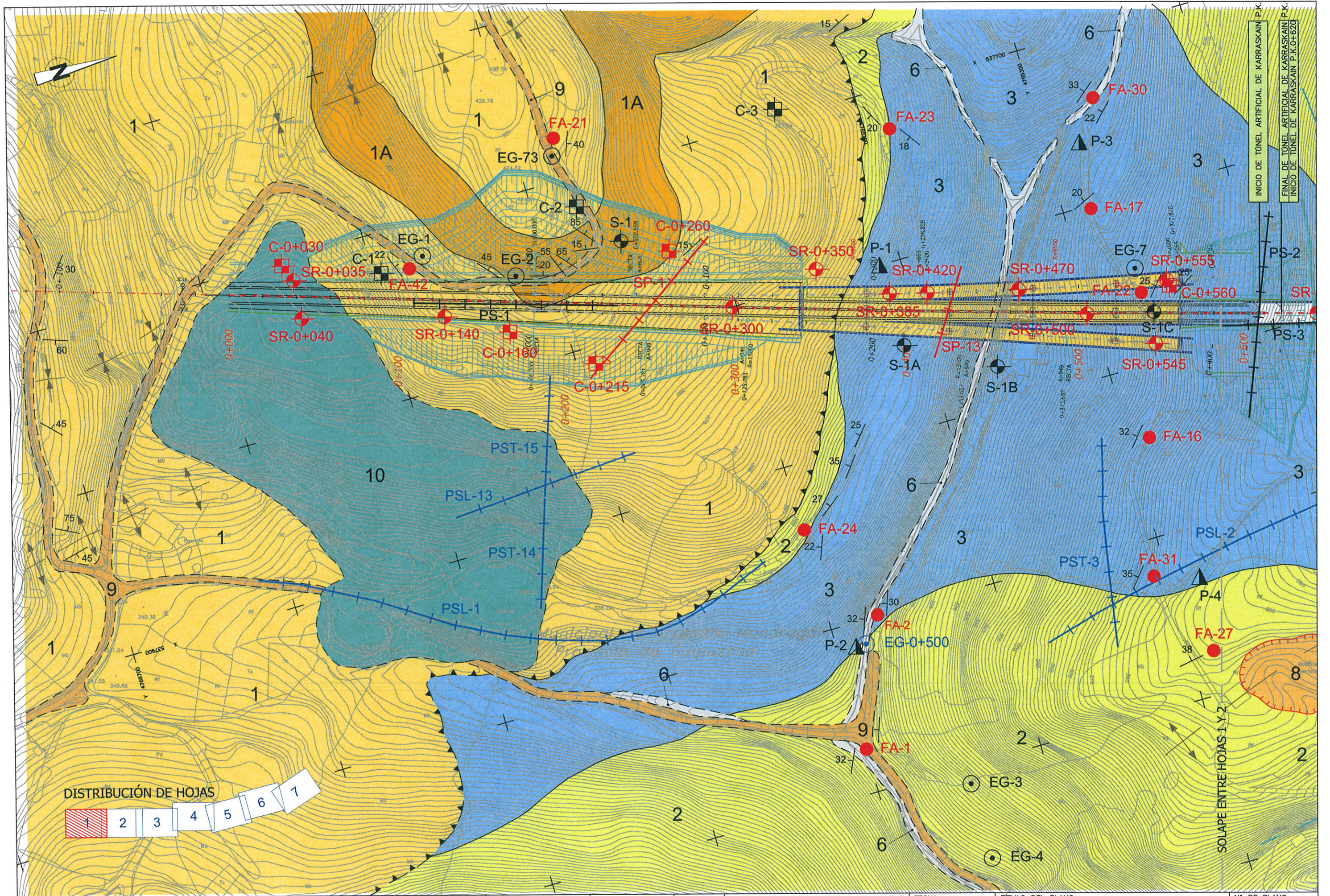
SOLAPE ENTRE HOJAS 3-5

SOLAPE ENTRE HOJAS 3-16

TÍTULO	ESCALA 1:1000	FECHA AGOSTO 2009	TÍTULO DEL PLANO TRAZADO PLANTA Y PERFIL LONGITUDINAL	Nº DE PLANO 2.4.2 Hoja 3 de 22
--------	------------------	----------------------	---	--------------------------------------

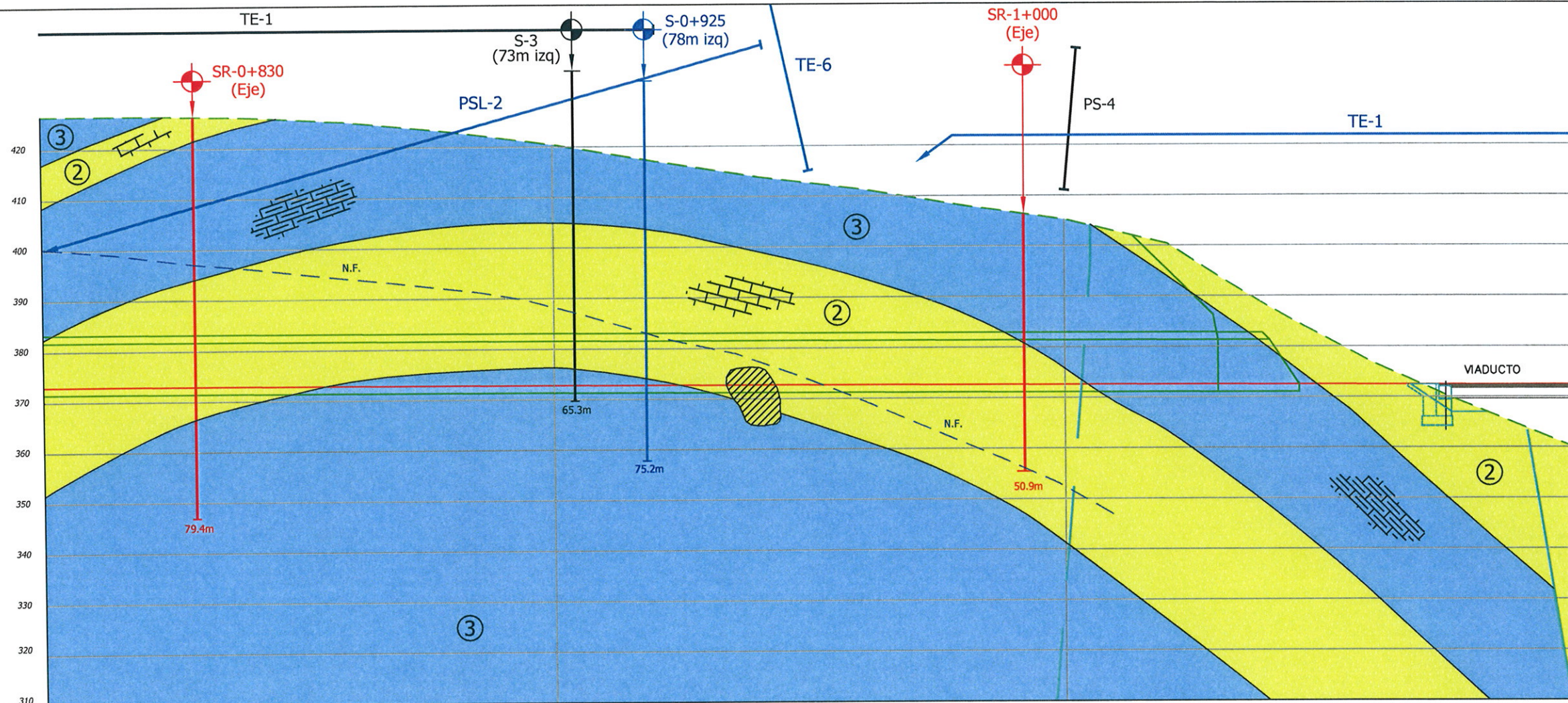






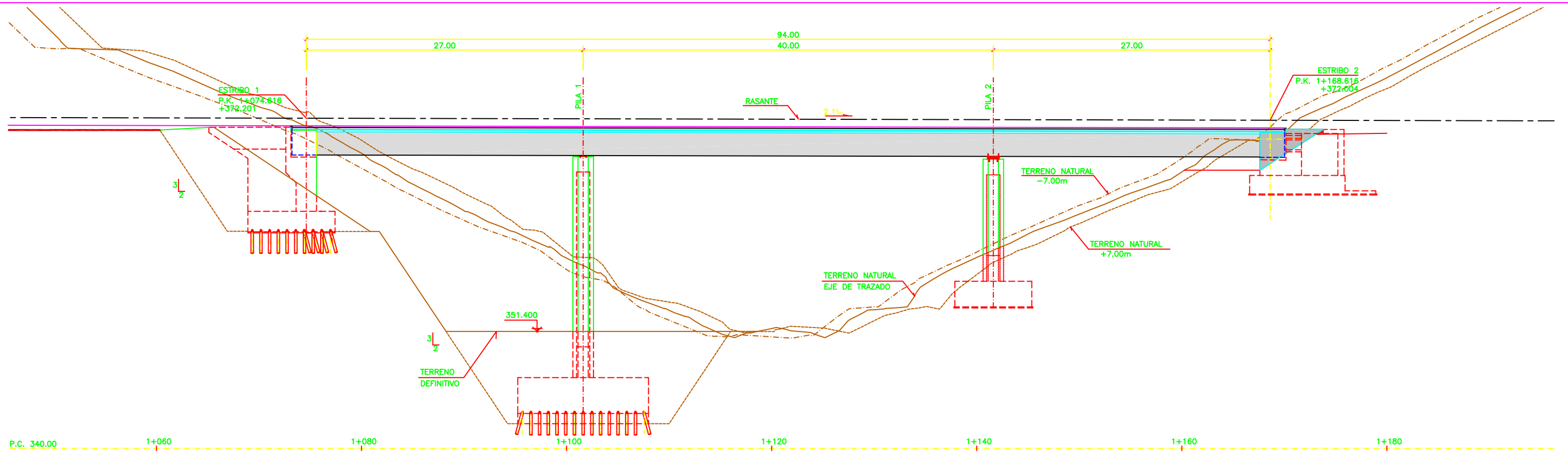
TÍTULO	ESCALA 1:2000	FECHA AGOSTO 2009	TÍTULO DEL PLANO PLANTA GEOLÓGICO. GEOTÉCNICA DE TUNELES. LEGENDA	Nº DE PLANO 2.10.1 Hoja 1 de 7
--------	------------------	----------------------	---	--------------------------------------



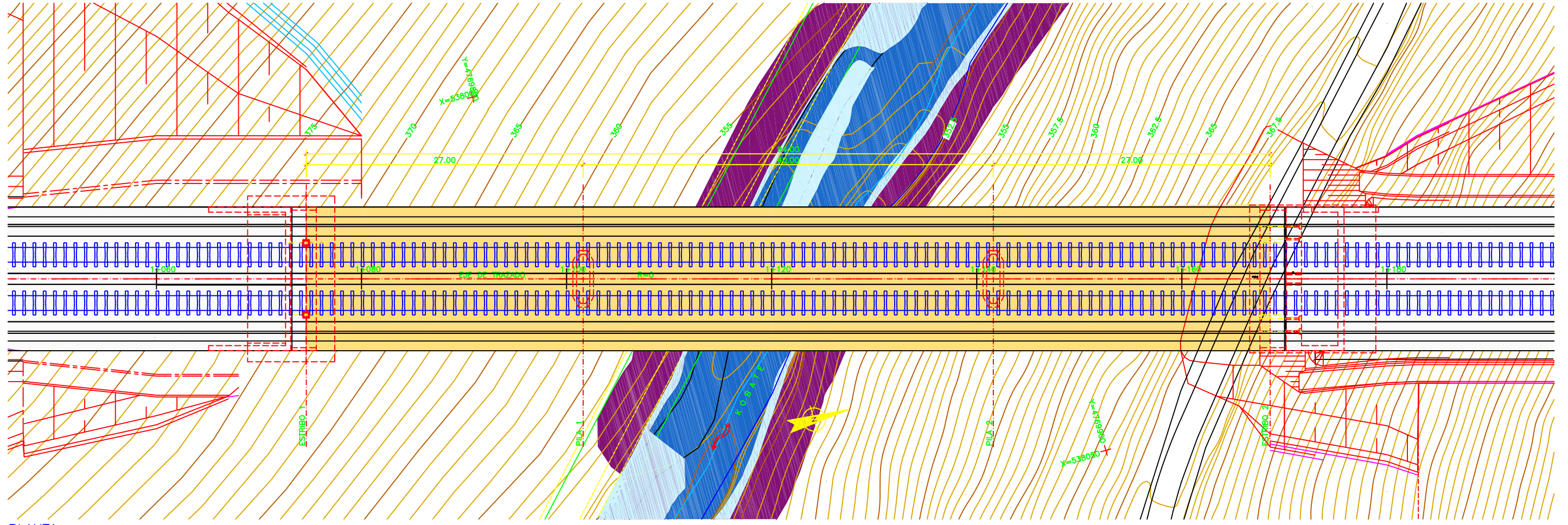


P.K.		0+800	0+900	1+000	1+100		
COTAS	TERRENO	426.48	420.38	372.56	359.74		
	RASANTE	372.98	372.77	405.20	372.35		
LITOLOGÍA		CALIZAS (2)	CALIZAS (2)	CALIZAS (2)	MARGOCALIZAS (3)	MARGOCALIZAS (3)	
SECCIÓN TIPO		ESTANCA (b)	ESTANCA (b)	ESTANCA (b)	ESTANCA (b)	ESTANCA (b)	
CALIDAD MACIZO	RESISTENCIA COMPRESIÓN SIMPLE (VALOR DE CÁLCULO, MPa)	20MPa	20MPa	20MPa	20MPa	20MPa	
	RMR (VALOR DE CÁLCULO)	60% 80; 40% 60	45% 80; 55% 60	100% KARST (< 45)	80% 80; 20% 70	100% FALLAS (< 45)	100% BOCA (< 45)
DEFINICIÓN	TIPO DE SOSTENIMIENTO	100% ST-I (b)	100% ST-I (b)	100% ST-IV (b)	100% ST-IV (b)	100% ST-B (b)	
	LONGITUD DEL TRAMO (m)	60	60	30	40	20	
	SISTEMA DE EXCAVACIÓN	VOLADURA (EX-I(b))	VOLADURA (EX-I(b))	VOL. o E.M. MIXTA (EX-IV(b))	VOLADURA (EX-I(b))	VOL. o E.M. MIXTA (EX-IV(b))	VOL. o E.M. MIXTA (EX-B(b))
AVANCE	PASE DE AVANCE (m)	4	4	1,5	4	1,5	
	PROTECCIÓN CON PARAGUAS					39 MICROPILOTES DE TUBO DE ACERO	
	SELLADO + SOSTENIMIENTO CON HMP/30/III (cm)	5	5	20	5	20	30
	BULONES L=4.0m	T	2,0 (SWELLEX)	2,0 (SWELLEX)	1,5	2,0	4 uds
	ESPACIADO (m)	L	4,0 (SWELLEX)	4,0 (SWELLEX)	1,5	4,0	1,0
DESTROZA	CERCHAS ESPACIADO (m)			TH-29/1,5		TH-29/1,5	HEB-140/1,0
	PASE DE DESTROZA (m)	8	8	3	< 8	3	2
	SELLADO + SOSTENIMIENTO CON HMP/30/III (cm)	50	50	20	50	20	30
	BULONES L=4.0m	T	2,0 (SWELLEX)	2,0 (SWELLEX)	1,5	2,0	4 uds
ESPACIADO (m)	L	4,0 (SWELLEX)	4,0 (SWELLEX)	1,5	4,0	1,0	
RECALCE DE CERCHAS/ESPACIADO (m)				TH-29/1,5		TH-29/1,5	HEB-140/1,0
ESPESOR CONTRABÓVEDA DEFINITIVA HA-25 (cm)		40	40	40	40	40	
ESPESOR REVESTIMIENTO HM-25 CON 2kg/m <sup>3</sup> FIBRAS POLIPROPILENO (cm)		40	40	40	40	40	
POSIBLES TRATAMIENTOS ESPECIALES		2 SONDEOS DE AVANCE		POSIBLE TRATAMIENTO DE CAVIDADES	2 SONDEOS DE AVANCE		





ALZADO FRONTAL  
ESCALA 1:200



PLANTA  
ESCALA 1:200

TÍTULO	PROYECTO DE CONSTRUCCIÓN	AUTOR	ESCALA INDICADAS Orig. DIN A-1 Numérica	FECHA JULIO 2009	TÍTULO DEL PLANO VIADUCTO PLANTA Y ALZADO	Nº DE PLANO 2.9.2 Hoja 1 de 10
--------	--------------------------	-------	--	------------------------	---	--------------------------------------