



Universidad  
Politécnica  
de Cartagena

**E.T.S. DE INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y  
PUERTOS Y DE INGENIERÍA DE MINAS**



**MÁSTER EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DEL  
AGUA Y DEL TERRENO**

TRABAJO FIN DE MÁSTER

***Modelización de la subsidencia minera del  
polígono Lo Tacón (La Unión - Murcia)***

OCTUBRE DE 2019

DIRECTOR: EMILIO TRIGUEROS TORNERO

ALUMNO: DAVID ALEMÁN SÁNCHEZ



## Agradecimientos

Antes de comenzar, me gustaría agradecer a mi tutor Emilio Trigueros Tornero el apoyo ofrecido durante el desarrollo de este trabajo y a mi pareja y familia por la paciencia y comprensión que me han ofrecido, sin ellos este trabajo no habría sido posible.

# ÍNDICE

<b>1. RESUMEN / ABSTRACT .....</b>	<b>5</b>
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>5</b>
<b>3. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>6</b>
3.1 - localización geográfica .....	6
3.2 - Contexto geológico .....	8
3.2.1 Marco geológico regional:.....	8
3.2.2 Marco geológico local: .....	10
3.3 – Tipos de subsidencia .....	13
3.4 – Conceptos sobre subsidencia .....	16
3.5 – Efectos de la subsidencia.....	21
<b>4. ANTECEDENTES.....</b>	<b>24</b>
<b>5. METODOLOGÍA.....</b>	<b>25</b>
5.1. Breve descripción del software utilizado .....	25
5.2. Ventajas y desventajas del software Phase2 .....	26
<b>6. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA.....</b>	<b>27</b>
<b>7. PRESENTACIÓN DEL MODELO .....</b>	<b>33</b>
<b>8. RESULTADOS .....</b>	<b>34</b>
8.1. Explotación y vaciado de las cámaras de las galerías mineras.....	34
8.2. Colapso de parte de los pilares que separan las cámaras de explotación.....	38
8.3. Colapso de parte de las galerías mineras en los niveles de explotación .....	42
<b>9. CONCLUSIONES.....</b>	<b>48</b>
<b>10. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>50</b>

# 1. RESUMEN / ABSTRACT

La sierra minera de La Unión ha sido un importante emplazamiento para la explotación subterránea de minería metálica (la cual se remonta a más de 2500 años atrás en el tiempo y que fue finalmente desmantelada en los años 80). Debido a esta intensa actividad minera y el posterior abandono de las galerías mineras, se han producido (continúan en la actualidad) diversos problemas medioambientales y relacionados con el terreno, como es el hundimiento (subsidencia minera) que en este distrito se está produciendo afectando a una amplia extensión de terreno, la cual se manifiesta en la superficie del mismo. Dicha subsidencia esta afectando a varias viviendas e industrias de la zona donde están apareciendo grietas, roturas, etc. En el presente trabajo fin de máster se va a realizar una modelización de la subsidencia del polígono industrial de Lo Tacón (La Unión - Murcia) mediante el software Phases 9.0 y para ello se han recopilado datos de la actividad minera producida, hundimientos, extensión afectada, etc. Una revisión bibliográfica previa de la actividad minera desarrollada en esta zona ayudara a entender y precisar la subsidencia acontecida y su posible restauración o mitigación de tales efectos.

---

The mining mountain range of La Unión has been an important site for underground mining of metallic mining (which dates back more than 2,500 years in time and was finally dismantled in the 80s). Due to this intense mining activity and the subsequent abandonment of the mining galleries, various environmental and land-related problems have occurred (and continue to occur today), such as the subsidence (mining-subsidence) that is occurring in this district affecting a wide area of land, which manifests itself on its surface. This subsidence is affecting several homes and industries in the area where cracks, breaks, etc. are appearing. In this final master's thesis, a modelling of the subsidence of the industrial estate of Lo Tacón (La Unión - Murcia) will be carried out using the Phases 9.0 software and for this purpose, data have been collected on the mining activity produced, subsidence, affected extension, etc. A previous bibliographic review of the mining activity carried out in this area will help to understand and specify the subsidence that has occurred and its the possible restoration or mitigation of its effects.

## 2. OBJETIVOS

Los objetivos del presente Trabajo fin de máster pueden simplificarse en los siguientes puntos:

- Recopilar información de los estudios previos.
- Analizar la evolución de la subsidencia con el fin de determinar en qué momento se encuentra la subsidencia para predecir su evolución futura de manera fiable.
- Generar modelos para el estudio de la subsidencia en la zona afectada.
- Definir los límites de la zona previsiblemente afectada.
- Obtener unas claras conclusiones.

### 3. INTRODUCCIÓN

El término de subsidencia hace referencia al hundimiento progresivo de la corteza terrestre, continental o submarina, la Real Academia de la Lengua Española define el término de subsidencia desde el punto de vista geológico de la siguiente manera “*hundimiento paulatino del suelo, originado por las cavidades subterráneas producidas por las extracciones mineras*”.

La subsidencia es un proceso natural que ocurre principalmente en respuesta a los vacíos creados al extraer sólidos, líquidos o gases del subsuelo y esta controlada por multitud de factores como son: Métodos de extracción, profundidad de extracción, espesor del depósito, topografía o las propiedades de la masa rocosa encima del depósito (F.T. Lee, et al 1983). Este fenómeno es un importante riesgo natural que afecta a amplias zonas de territorio en todo el mundo y es responsable de importantes pérdidas económicas y gran alarma social y aunque el hundimiento no se puede eliminar, si se puede reducir o controlar en áreas donde la deformación de la superficie del suelo produciría efectos peligrosos o costosos. La subsidencia acontecida en la superficie del terreno puede deberse a numerosas causas como la disolución de materiales profundos, la construcción de obras subterráneas o galerías mineras (como es el caso de La Unión), la erosión del terreno en profundidad, el flujo lateral del suelo, la compactación de los materiales que constituyen el terreno, la actividad tectónica o la explotación de las aguas subterráneas. Debido a estas causas, en la superficie del terreno pueden aparecer deformaciones verticales que varían desde pocos milímetros hasta varios metros durante periodos que oscilan desde minutos hasta años. El presente trabajo se centra en la subsidencia producida por el asentamiento de la superficie terrestre en un área que ha sufrido una intensa minería subterránea en el pasado, por lo tanto, la subsidencia aquí acontecida se debe a la actividad humana y no a efectos naturales (aunque también pueden contribuir).

La subsidencia es un fenómeno geológico que no suele causar víctimas mortales, pero los daños materiales como consecuencia de este fenómeno pueden llegar a ser importantes y cuantiosos (Roberto Tomás, et al. 2009). Las zonas más vulnerables al fenómeno de la subsidencia del terreno son las áreas urbanas e industriales, donde las pérdidas económicas ocasionadas pueden llegar a ser muy elevadas, ya que supone un riesgo importante para edificaciones, canales, vías de comunicación, así como todo tipo de infraestructuras asentadas sobre el terreno que se deforma. Mientras que en zonas rurales y despobladas el impacto económico es muy inferior pudiendo ser casi nulo, debido a las escasas infraestructuras que hay en estas áreas.

Es importante realizar un estudio y análisis de la posible subsidencia que puede llegar a producirse como consecuencia de la futura explotación minera, esto debe de hacerse con el suficiente tiempo para que la planificación sea la correcta y no cometer errores en la explotación.

#### 3.1 - Localización geográfica

La zona donde se ha realizado el presente estudio se encuentra ubicada en el sureste de la Península Ibérica en la ciudad de La Unión (Murcia), concretamente al oeste de la ciudad, en el polígono industrial de Lo Tacón. Este emplazamiento tiene una superficie aproximada de 135.000 m<sup>2</sup> y se encuentra situado en plena Sierra minera de Cartagena a 16 km de la propia ciudad de Cartagena y a 57 km de la capital

regional, Murcia. Esta formación montañosa tiene unos 25 km de longitud y su máxima cota es el cerro Sancti Spiritus, de 388 msnm.



Fig. 1 - Ubicación de la Unión en google maps



Fig. 2 – Ubicación de la Unión sobre mapa topográfico (Universidad de Oviedo, 2010).

Esta zona ha sido explotada en varias etapas por la minería de plomo y zinc desde la época de los romanos llegando, tras varios periodos de inactividad, hasta finales del siglo XX (Manteca y Ovejero, 1992). Debido a la intensa actividad minera, se encuentran bajo la superficie gran cantidad de galerías mineras abandonadas que están ocasionando inestabilidades en el terreno con la consiguiente subsidencia y todos los problemas que esto conlleva.



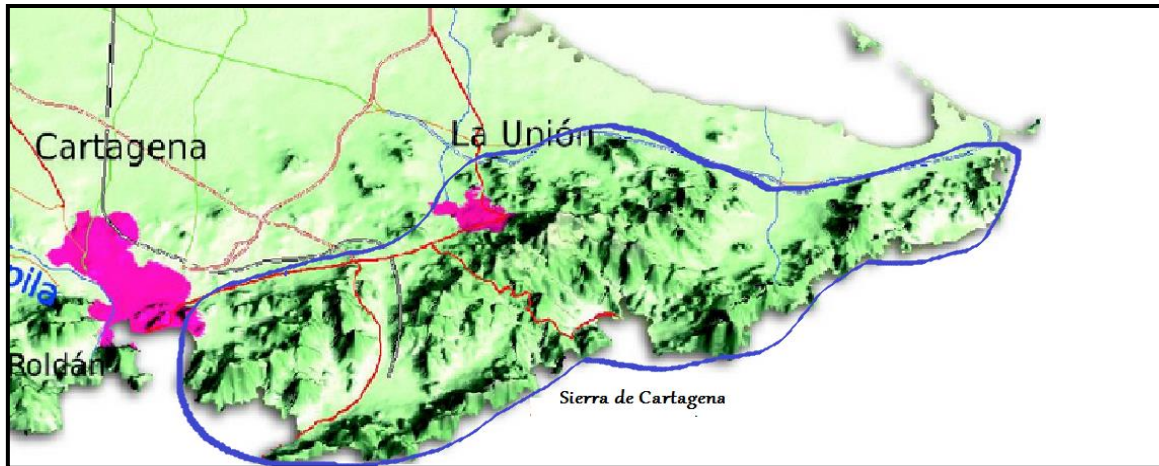


Fig. 3 – Localización de la Sierra minera de Cartagena, donde se ubica La Unión (Murcia)

## 3.2 - Contexto geológico

### 3.2.1 Marco geológico regional:

La zona de estudio pertenece a la parte oriental de las Cordilleras Béticas, cadena de plegamiento alpino que se extiende al sur de la Península Ibérica desde el extremo occidental de Andalucía hasta el sur de comunidad de Valencia y las Baleares. Las cordilleras Béticas pueden dividirse en dos grandes unidades bien diferenciadas: las Zonas Externas y las Zonas Internas. Entre ambas y dentro de ellas se sitúan cuencas sedimentarias posteriores a la orogenia alpina.

Las **Zonas Internas** se componen de rocas metamórficas, con diverso grado de metamorfismo y litología, y a su vez se subdividen en tres grandes unidades:

- ❑ **Complejo Nevado-Filábride:** es el más profundo y está constituido por potentes series metamórficas de rocas silicatadas: esquistos, micasquistos, cuarcitas, gneises y anfibolitas. La edad de estos materiales abarca desde el Precámbrico al Triásico inferior. Hay un conjunto de rocas de cobertera, de litología carbonatada, formada principalmente por mármoles de edad Triásica. Existen también intrusiones de diabasas, metabasitas y capas de yeso intercaladas ocasionalmente.
- ❑ **Complejo Alpujárride:** formado por materiales metamórficos silicatados: esquistos, cuarzoquistos, pizarras y filitas, de edad Precámbrico-Triásico. Sobre dichos materiales se sitúan una serie triásica de calizas y dolomías. También hay diques de diabasas y metabasitas y capas de yeso.
- ❑ **Complejo Maláguide:** se encuentra estructuralmente más alto y está formado por calizas, dolomías, pizarras y areniscas de edad Paleozoico – Terciario. Tiene un grado de metamorfismo menor que los dos complejos anteriores y aflora en menor extensión.



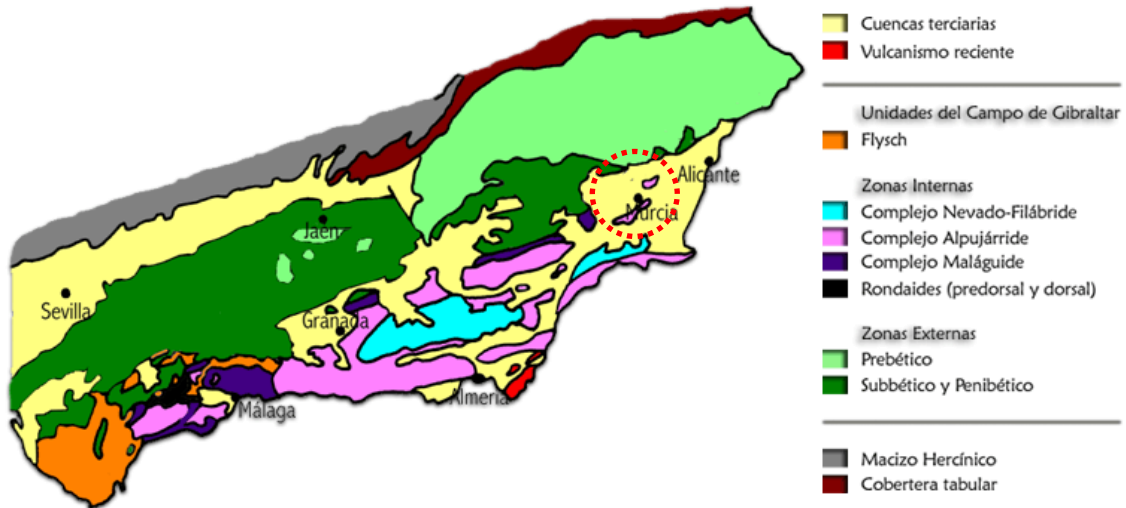


Fig. 4 - Marco Geológico Regional.

Las **Zonas Externas** están constituidas por materiales depositados en su día en el borde meridional de la Placa Ibérica. Son por lo tanto, rocas sedimentarias principalmente carbonatadas y se distinguen dos grandes dominios:

- **Zona Prebética:** los términos más antiguos son del Triásico que afloran mayoritariamente en estructuras extrusivas (diapiros) en los que los materiales arcillosos ricos en sales perforan los términos más modernos situados sobre ellos. Los siguientes términos en edad son los del Jurásico formados por rocas carbonatadas que afloran de forma muy reducida en los núcleos de antiformes o a favor de fallas con importante salto vertical. Los materiales del Cretácico afloran ampliamente dando importantes relieves montañosos, entre los que dominan las calizas organógenas y margas marinas pelágicas. El paleógeno destaca por el gran desarrollo de calizas pararecificales con Alveolinas y Nummulites o margas ricas en foraminíferos planctónicos con intercalaciones de turbiditas.
- **Zona Subbética:** en la que aparecen esencialmente materiales mesozoicos y terciarios de facies marinas. El Triásico está representado por arcillas violáceas con abundantes yesos. El Jurásico está formado por dolomías en los términos más antiguos y calizas con ammonites en el resto. El Cretácico, mucho menos extenso, se caracteriza por una sedimentación pelágica relativamente profunda, representada por margas y calizas margosas con ammonites y calizas margosas con foraminíferos.

Durante el Neógeno (Mioceno-Plioceno) se produce una compartimentación del sustrato a lo largo de una serie de corredores de dirección NE – SO en los que se sitúan diversas **cuencas sedimentarias** que recogen sedimentos procedentes de los relieves circundantes, con depósitos de ambiente marino y/o continental. Se pueden separar las que fueron rellenadas por sedimentos marinos de edad Mioceno Inferior y Medio simultáneos a la principal etapa de colisión continental y por otro, las que fueron rellenadas por sedimentos marinos y continentales de edad Mioceno Superior a Cuaternario.

### 3.2.2 Marco geológico local:

El área sobre el que se sitúa el polígono de Lo Tacón y la Unión se emplaza dentro del sector suroccidental de la zona bética.

Los grandes complejos y unidades estratigráficas que afloran en la zona son: **El complejo Alpujárride y los materiales Postorogénicos.**

- **Complejo Alpujárride:**

En este complejo se pueden diferenciar dos subunidades o mantos superpuestos, como son:

#### **Manto Alpujárride Inferior:**

Está constituido por un primer tramo basal paleozoico, formado por micaesquistos que afloran en la zona. Un tramo intermedio compuesto por filitas grises, verdes y rojas con lentejones de cuarzo y por un tramo superior carbonatado de edad triásica, constituido por calizas tableadas azules y negras (“franciscanas”) y a techo por un nivel dolomítico de color negro.

#### **Manto Alpujárride Superior:**

Esta formación (manto) se sitúa sobre la anterior y esta constituida completamente por materiales triásicos. En el primer tramo de esta serie aparecen unas filitas areniscosas de color naranja con lentejones de cuarzo; hacia techo la serie evoluciona hacia unas margo-calizas amarillentas sobre las que aparece una brecha carbonatada con cantos de calizas y filitas. Sobre esta serie aparece un nuevo paquete de calizas de color claro y calizas dolomíticas de color oscuro y aspecto ruinoso.

Hay que destacar que a lo largo de toda esta serie abundan las rocas intrusivas básicas del tipo de las diabasas. Estas rocas ígneas están constituidas esencialmente por piroxenos y plagioclasas y presentan varios grados de alteración.

- **Materiales Postorogénicos:**

Sobre los materiales de las formaciones anteriores se sitúan los materiales más actuales de la cuenca neógeno – cuaternaria del Campo de Cartagena y del Mar Menor; conglomerados, gravas, areniscas, limos, arcillas y margas.

La cuenca del Campo de Cartagena, caracterizada en superficie por una extensa llanura en cuyo extremo oriental se sitúa el Mar Menor, y en cuyo extremo meridional se encuentra la zona del presente estudio.

Los materiales que aparecen en la zona pertenecen a una sedimentación litoral marina, con gran aporte de terrígenos. En principio dichos aportes llegarían de los relieves circundantes.

La zona marina, estaría formada por materiales cuaternarios, en concreto Holocenos, que corresponden a sedimentos de plataforma con gran componente terrígena.

Podemos dividir los materiales postorogénicos que están situados sobre el Complejo Alpujárride en dos formaciones distintas, que son:

**Pliocuaternalario:**

Esta constituido por una alternancia de materiales que pertenecen a dos términos principalmente.

Un primer término claramente arenoso de tonos beige amarillentos, con influencia marina y presencia de conchas de organismos, que aparecen con frecuencia cementados por carbonato dando lugar a areniscas calcáreas y biocalcarenitas.

Un segundo término de granulometría arcilloso – limosa, que presenta frecuentes gruesos y de procedencia fundamentalmente continental. Este nivel de tonos rojizos presenta frecuentes encostramientos, caliches, etc., dando lugar a tramos de aspecto conglomerático, pero de escaso espesor.

**Cuaternalario reciente:**

Esta formación está formada por gravas y arenas de aporte continental (aluvial) y por arenas y limos grises de ambiente marino, limos y arcillas oscuros (de tonos grises y negros) de ambiente de marisma, ricos en materia orgánica y con presencia de conchas.

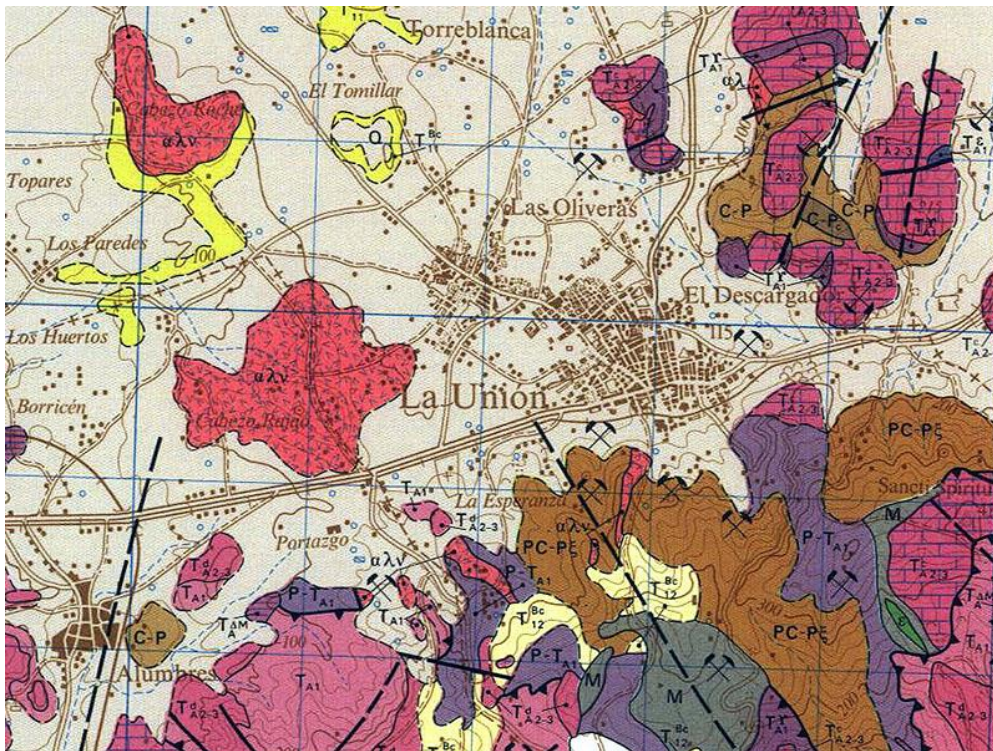


Fig. 5 - Mapa geológico.

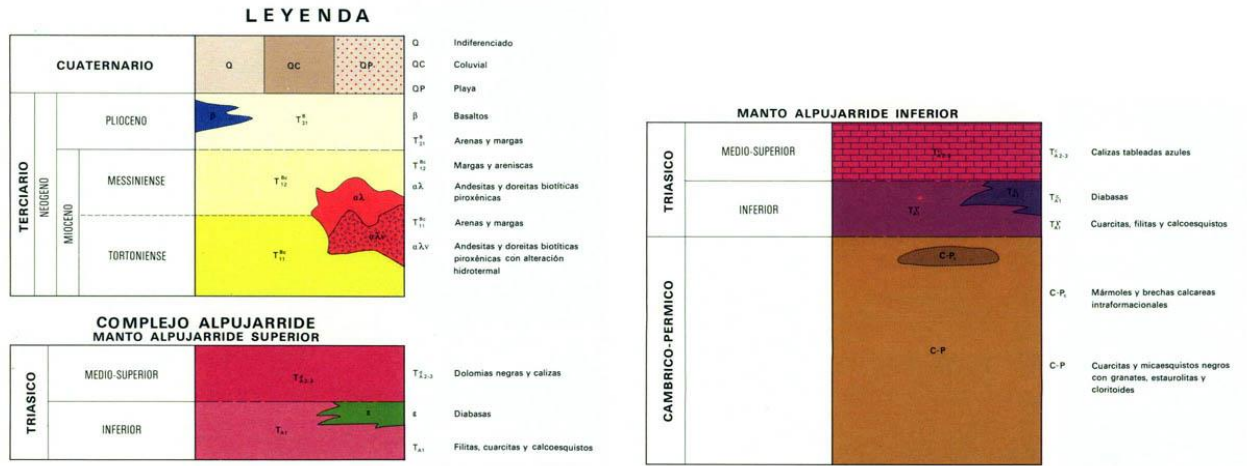


Fig. 6 - Leyenda mapa geológico.

### 3.3 – Tipos de subsidencia

La subsidencia del terreno es básicamente la manifestación en superficie de una serie de mecanismos subsuperficiales de deformación como respuesta a la eliminación de gas, líquido o materia sólida, esta depende del tiempo (1). Prokopovich (1979) define desde un punto de vista genético dos tipos de subsidencia: endógena y exógena.

SUBSIDENCIA TERRESTRE	EXOGÉNICA	TRASLADO DE SÓLIDOS
		DISMINUCIÓN DE LA RESISTENCIA DEL SUELO
		AUMENTO DE PRESIÓN
		VARIACIONES DE HUMEDAD
	ENDOGENICA	PLIEGUES
		FALLAS
		VULCANISMO
		TECTONICA DE PLACAS
		OTROS

Fig. 7 - Tipos de subsidencia. Adaptada de Prokopovich (1979). Extraída de Vázquez (2001).

El primero de estos términos hace referencia a aquellos movimientos de la superficie terrestre asociados a procesos geológicos internos, tales como pliegues, fallas, vulcanismo, etc. El segundo término hace referencia a los procesos de deformación superficial o antrópica de los suelos (como el caso de La Unión) y puede subdividirse en subsidencia causada por la eliminación, debilitamiento de capas o estratos de soporte y la subsidencia causada por un aumento de la carga real o efectiva.

Por otra parte, Scott (1979), González vallejo (2002) o tomas clasifican la subsidencia en función de los mecanismos que la desencadenan, estos se resumen en la siguiente tabla:

<b>Por disolución subterránea</b>	En sal
	En yeso
	En rocas carbonáticas
<b>Por construcción de obras subterráneas o galerías mineras</b>	
<b>Por erosión subterránea (tubificación o <i>piping</i>)</b>	
<b>Por flujo lateral</b>	Rocas salinas
	Arcillas
<b>Por compactación</b>	Por carga
	Por drenaje
	Por vibración
	Por extracción de fluidos
	Por hidrocompactación
<b>Tectónica</b>	

Fig. 8 -. Tipos de subsidencia. Clasificación de la subsidencia según la causa que la origina. Extraída de Tomás et al. (2009).



La sal (NaCl), el yeso y las rocas carbonatadas (Calizas y dolomías mayoritariamente) pueden ser solubles bajo determinadas condiciones, esto hace que se puedan generar grandes cavidades y sistemas de huecos interconectados que pueden llegar a deformar el terreno en superficie (subsidencia) y finalmente incluso colapsar completamente.

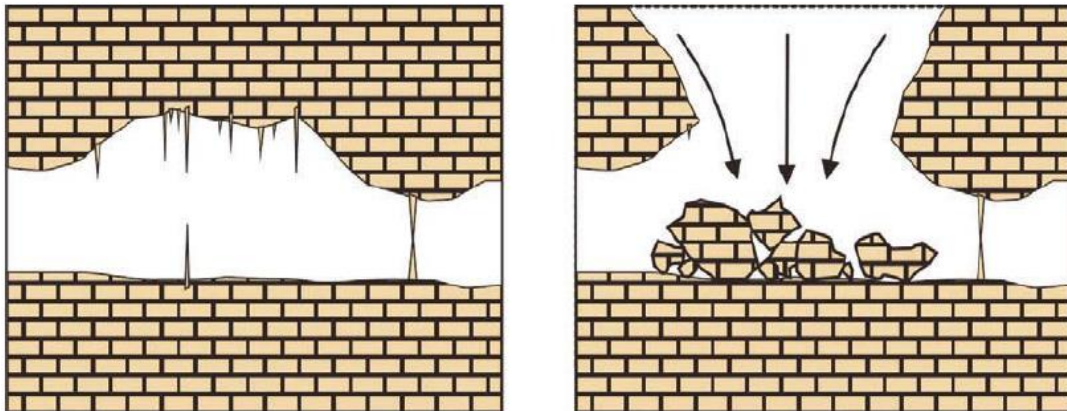


Fig. 9 – Ejemplo de subsidencia debida a disolución subterránea.

Por otro lado, la subsidencia minera se refiere al hundimiento de la superficie del terreno debido a la deformación y/o colapso de galerías generadas para la extracción de minerales o por la construcción de infraestructuras subterráneas (túneles), ya que el suelo intenta ocupar el vacío generado por estas obras. En este TFM se va a tratar de modelizar un claro ejemplo de este tipo de subsidencia como es la generada por la actividad minera (en épocas pasadas) del polígono de Lo Tacón en La Unión (Murcia).

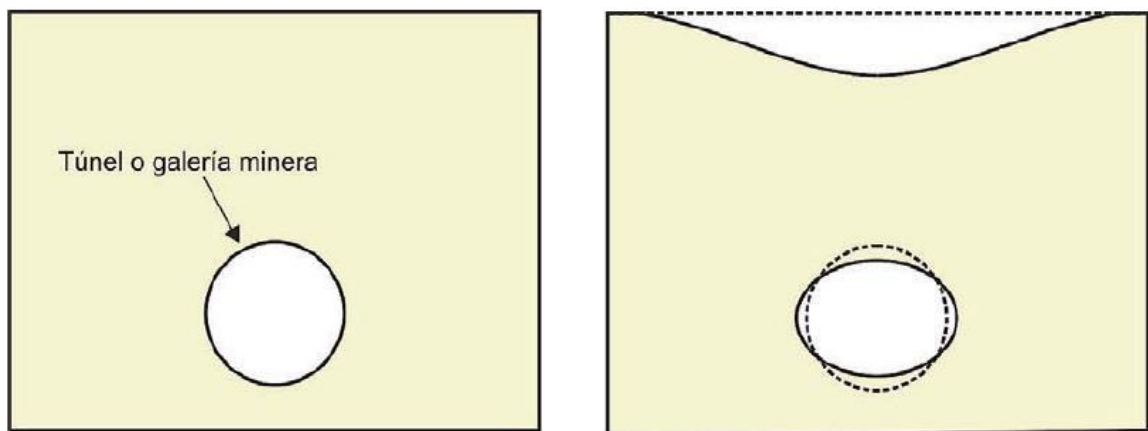


Fig. 10 – Ejemplo de subsidencia producida por construcción de obras subterráneas o galerías mineras.

La subsidencia por erosión subterránea se produce cuando las partículas del suelo son removilizadas debido a procesos mecánicos de arrastre causados por el flujo de agua subterránea. Si estos procesos se mantienen en el tiempo pueden llegar a producir la formación de una serie de canales que finalmente pueden llegar a desencadenar colapsos del terreno (Roberto Tomás et al, 2009).

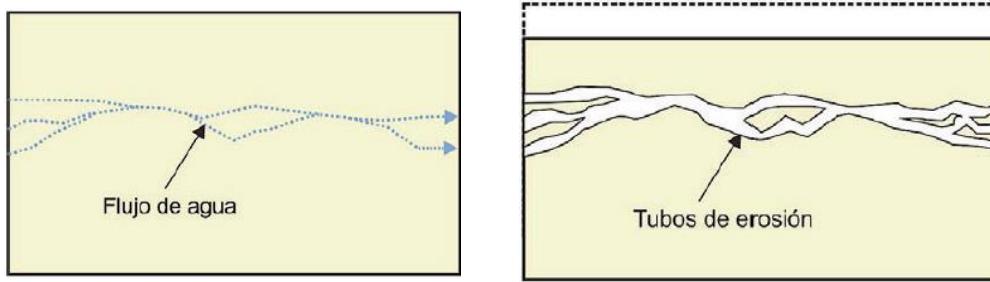


Fig. 11 – Ejemplo de subsidencia debida a erosión subterránea.

Mediante flujo lateral de agua también se puede producir subsidencia, esto sucede cuando el flujo atraviesa diversas formaciones evaporíticas o diapiros salinos que son solubles en agua, causando la removilización de los mismos y dejando huecos.

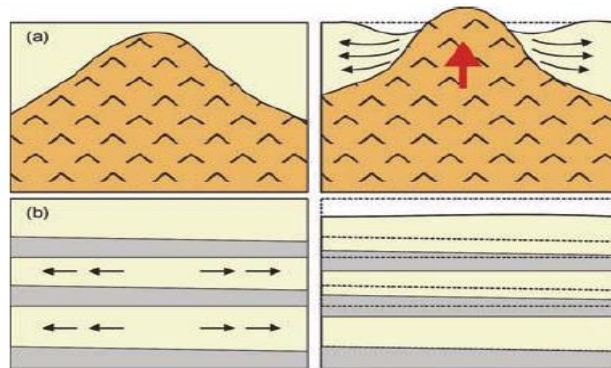


Fig. 12 – Ejemplo de subsidencia debida a flujo lateral de agua en formaciones evaporíticas o diapiros salinos.

Otro tipo de subsidencia es la causada debida a la consolidación que se puede llegar a dar en el terreno a causa de la acumulación de sedimentos o por determinados tipos de cimentaciones que producen un incremento del peso que ejercen los sedimentos o construcciones sobre el terreno (se reducen los huecos). La geotecnia se encarga entre otras cosas, de que las cimentaciones escogidas en construcción sean adecuadas para el terreno donde se va a construir (Roberto Tomás et al, 2009).

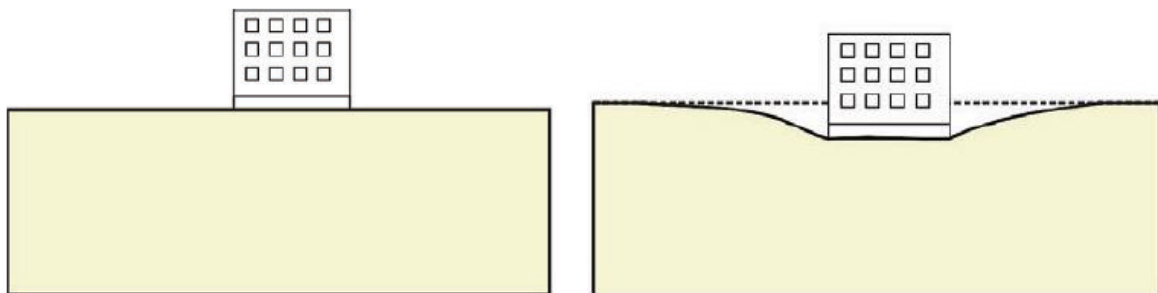


Fig. 13 – Ejemplo de subsidencia debida a la consolidación.



Los terremotos o sismos también pueden desencadenar la subsidencia en terrenos granulares como consecuencia de un reajuste en las partículas, reduciendo el espacio de los poros entre los granos minerales (Roberto Tomás et al, 2009).

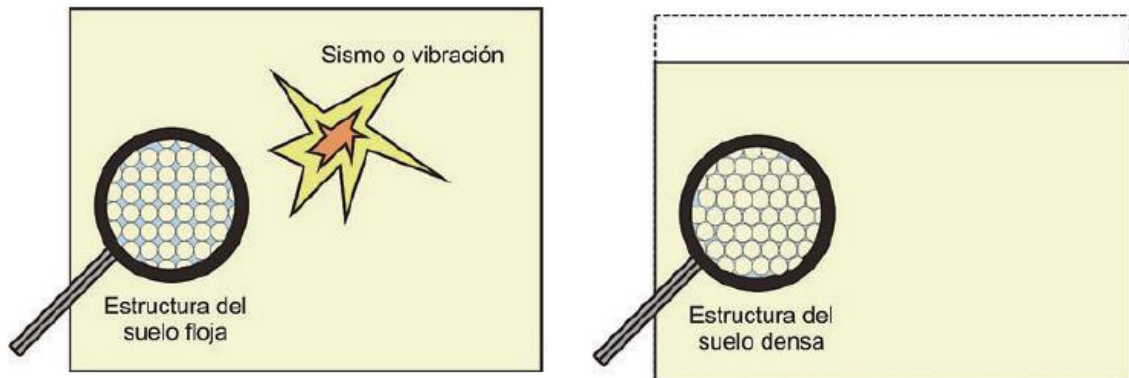


Fig. 14 – Ejemplo de subsidencia causada por terremotos o sismos.

La hidrocompactación también puede llegar a producir subsidencia, causada por la extracción de agua de los acuíferos y se puede producir por la disolución de los enlaces entre partículas o por la pérdida de las tensiones capilares (en ambos casos sostienen las partículas de suelo para configurar la estructura). Murcia y los suelos limosos del Este de España son un ejemplo de este tipo de subsidencia.

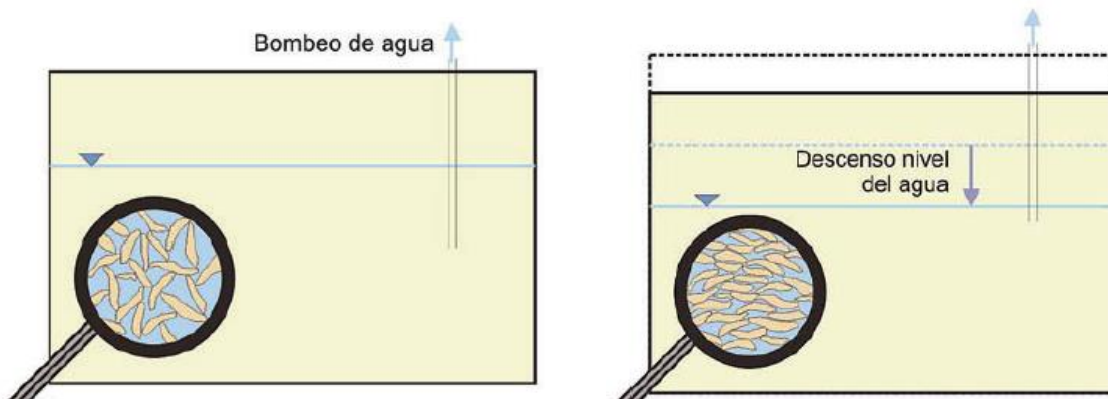


Fig. 15 – Ejemplo de subsidencia producida por hidrocompactación.

Finalmente, las fallas geológicas también son propensas a producir subsidencia, debida a los descensos de la superficie que estas generan (subsidencia tectónica) (Roberto Tomás et al, 2009). Este tipo de subsidencia es el menos importante de todos, debido a que sus efectos son por lo general de muy baja magnitud (pocos mm al año).

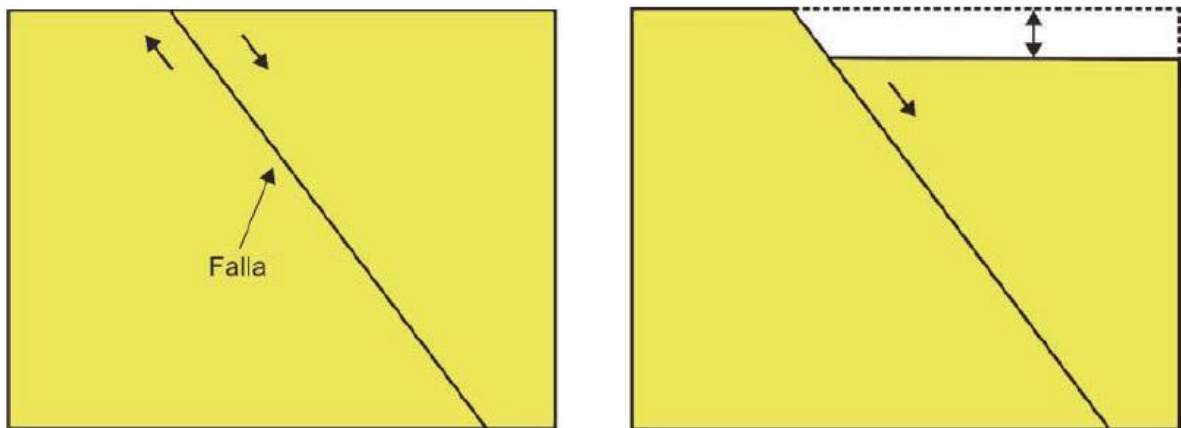


Fig. 16 – Ejemplo de subsidencia causada por fallas geológicas.

En el presente TFM, nos vamos a centrar en la subsidencia debida a la actividad minera, ya que este tipo de subsidencia es de los que más problemas pueden ocasionar en el presente y futuro para las poblaciones asentadas en lugares donde en tiempos pasados ha habido una intensa minería (subterránea principalmente).

### 3.4 – Conceptos sobre subsidencia

El vacío creado por la extracción de recursos (minerales en este caso) causa cambios significativos en la magnitud y orientación de los campos de tensión y da como resultado deformaciones en el terreno. En general, los lados del área excavada se mueven hacia dentro, el muro hacia arriba y el techo hacia abajo.

La subsidencia es un proceso dependiente del tiempo, ya sea natural o inducido por el hombre, en el cual hay una disminución de la superficie del suelo en respuesta a la eliminación de gas, líquido o materia sólida (F.T. Lee, et al 1983).

Las primeras deformaciones en aparecer pueden ser elásticas lo que se traduce en que esas deformaciones iniciales podrían desaparecer si se eliminan las fuerzas de deformación. Por otro lado, tenemos las deformaciones no elásticas que suceden con el tiempo a medida que la región de influencia de la cavidad aumenta por la extracción continua lo que hace que se excedan las resistencias de la roca y se produzcan movimientos de bloques irreversibles (F.T. Lee, et al 1983).

En minería subterránea donde se opta por utilizar el método de explotación mediante cámaras y pilares (como en el polígono de Lo Tacón), el mineral se explota siguiendo un patrón llamado “tablero de ajedrez” con el que se puede extraer un 50% aproximadamente del mineral a explotar (dependiendo del uso que el terreno tenga en superficie). Posteriormente los pilares podrán ser eliminados total o parcialmente durante la extracción final. Después de la eliminación completa de los pilares, la roca se derrumba sobre la mina y la sobrecarga se asienta gradualmente, creando fisuras superficiales y la correspondiente subsidencia (F.T. Lee, et al 1983).

Existe una discusión obvia entre minimizar el hundimiento y maximizar la recuperación de recursos. En algunas áreas se pueden tolerar más asentamientos superficiales que

en otras áreas, por ejemplo en áreas urbanas solo puede recuperarse algo menos del 50% de los recursos para evitar el hundimiento.

Los movimientos descendentes de las rocas suprayacentes inducirán movimientos laterales de roca hacia la cavidad como puede observarse en la figura 17.

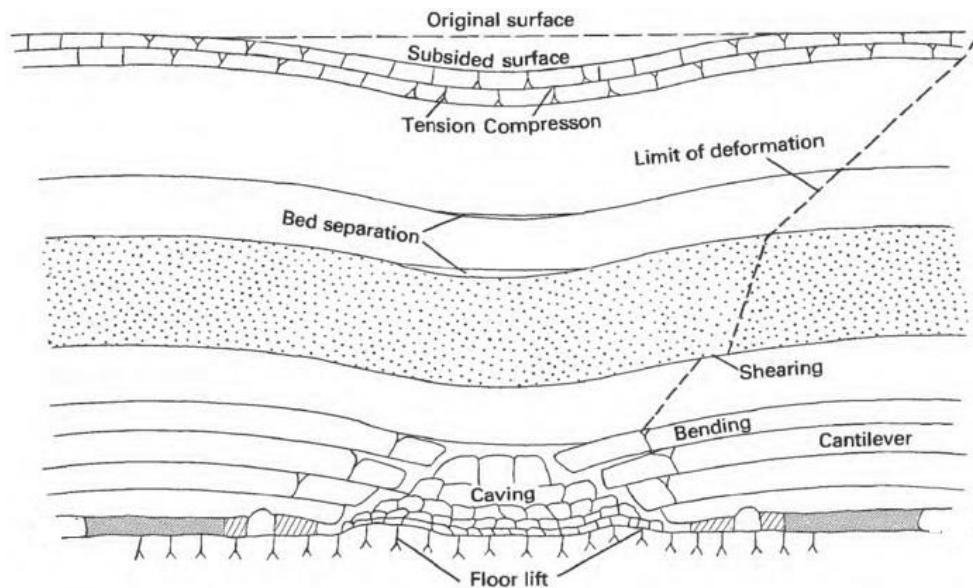


Fig. 17 – Sección de terreno donde se ha producido subsidencia debida a la extracción minera (pueden observarse los movimientos que se producen en las rocas y el límite de la deformación).

Todos estos movimientos y deformaciones que se producen por efecto de la subsidencia tienen lugar dentro de la región de influencia la cual está definida por una serie de factores que se resumen a continuación:

- **Método minero:** Hace referencia a la manera en que se extrae un recurso, cierto es que cualquier vacío subterráneo potencialmente inducirá hundimiento pero el modo de extracción ejerce una gran influencia en las deformaciones superficiales. El diseño del pilar, la forma de la cavidad y el volumen del material eliminado rigen el tiempo y la configuración de las expresiones de la superficie. Para el caso de la minería de cámaras y pilares las deformaciones de las paredes y el hundimiento del techo se puede prolongar o retrasar por muchos años.
- **Ángulo de influencia:** Es el ángulo que se forma entre la vertical en el borde de la explotación y la línea que une este borde con el punto donde la subsidencia es nula y que por lo tanto define el límite de la subsidencia con respecto a la explotación subterránea (P. Ramírez, et al. 1980).
- **Potencia de la capa:** Hace referencia al espesor de la capa explotada puesto que es evidente que este afecta a la magnitud de la subsidencia desarrollada, a mayor espesor de la capa en la cual se está produciendo la explotación minera mayor será la subsidencia debido a que se debe de rellenar un mayor volumen de espacio vacío (P. Ramírez, et al. 1980).

- Litología y estructura:** La resistencia y las propiedades de deformación de las masas rocosas están controladas en gran medida por el tipo de roca y las características estructurales, como fallas, foliación, estratificación, etc. Estas condiciones geológicas son responsables de variaciones significativas en el desarrollo de la subsidencia y afectan sobre todo a la extensión de la superficie y al momento de hundimiento (F.T. Lee, et al 1983). Por lo tanto, un conocimiento de las condiciones geológicas de la zona antes de comenzar la minería puede ayudar a la predicción de la subsidencia. Una disminución gradual de la superficie se asocia con rocas “débiles”, mientras que el colapso violento, a menudo retrasado, es más típico de rocas “duras”.
- Anchura y profundidad de la explotación:** Estos factores están íntimamente relacionados con la superficie de subsidencia, porque juntos determinan que el “área crítica” o área de influencia” sea de mayor o menor extensión. Si consideramos la explotación de una capa situada a  $h$  metros de profundidad y un punto  $P$  en la superficie podemos calcular la anchura crítica trazando unas líneas inclinadas con un ángulo igual al de influencia a ambos lados del punto  $P$ , ambas líneas cortaran a la capa de explotación en los puntos  $A$  y  $B$ . La distancia entre  $AB$  sería la anchura crítica y el área que queda englobado con vértice en  $P$  y la anchura critica se denomina área crítica o área de influencia y tendrá forma de cono (fig. 18). Generalmente cuanto más profundo es el nivel de minería, mayor es el tiempo requerido para que las deformaciones de las rocas alcancen la superficie (P. Ramírez, et al. 1980).

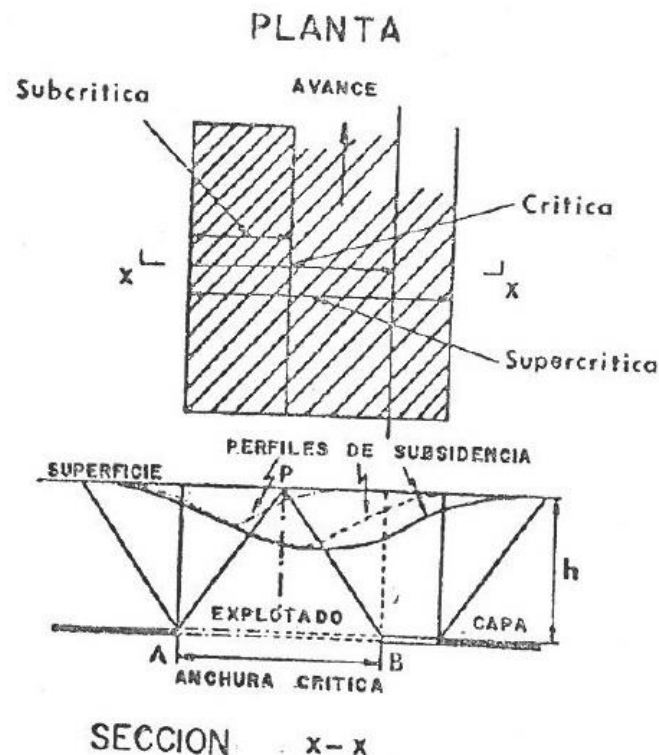


Fig. 18 – Relación de la anchura crítica según la profundidad.

Se puede llegar a la conclusión de que la anchura crítica aumenta conforme aumenta la profundidad de la capa explotada.

Se pueden dar tres casos en la manera de explotar un estrato subterráneo relacionados con la subsidencia que se vaya a producir según la anchura que se vaya a explotar, que son los siguientes (P. Ramírez, et al. 1980):

1. Que la explotación subterránea tenga exactamente la anchura crítica a una profundidad fija, en este caso solo existe un punto de la superficie que alcanzará la subsidencia máxima posible.
2. Que la explotación subterránea sea más ancha que la anchura crítica, en este caso existirá un área en el fondo de la artesa que tendrá la máxima subsidencia.
3. Que la explotación subterránea sea más estrecha que la anchura crítica entonces, en este caso la máxima subsidencia se producirá en el tramo medio de la artesa de hundimiento, pero será menor a la máxima subsidencia posible correspondiente a la capa explotada, este tipo de subsidencia se denomina "subsidencia subcrítica".

Hay que tener en cuenta que una explotación con una anchura determinada tendrá una subsidencia supercrítica a una profundidad somera, pero que llega a ser crítica y posteriormente subcrítica a mayores profundidades. Por lo tanto, la profundidad y la anchura (relación anchura/profundidad) de la capa a explotar deben de quedar bien definidas y acotadas si se quiere calcular la magnitud de la subsidencia eficazmente.

- **Tipo de sostenimiento:** La magnitud de la subsidencia depende también del tipo de sostenimiento usado en la explotación, este sostenimiento tiene como finalidad limitar el posible hundimiento del techo de la explotación lo que indirectamente limita la subsidencia de la superficie (P. Ramírez, et al. 1980).
- **Inclinación de la capa y topografía:** Otro de los factores que definen los movimientos y deformaciones que tienen lugar por efecto de la subsidencia es la inclinación de la capa de explotación y las variaciones topográficas, ya que la simetría de la subsidencia que se produce cuando la capa de explotación es horizontal desaparece cuando hay irregularidades y variaciones topográficas en la capa de explotación. En el caso de que la capa de explotación se encuentre inclinada la superficie de subsidencia se desplaza hacia el extremo más profundo de la explotación, dependiendo del ángulo de inclinación de la capa. La máxima subsidencia se desarrolla en el punto de intersección de la superficie con la normal a la capa de explotación en el centro del área explotada, y no sobre la vertical del centro de la explotación como sucede cuando se trata de capas horizontales (P. Ramírez, et al. 1980). En la siguiente figura se ilustra la variación del ángulo de influencia según el buzamiento de la capa de explotación.

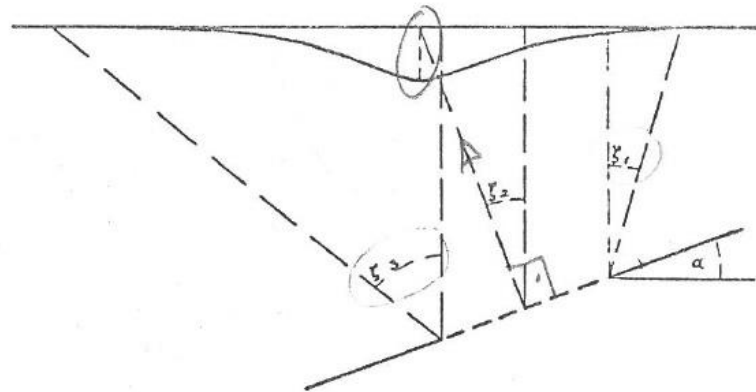


Fig. 19 – Variación del ángulo de influencia según el buzamiento de la capa de explotación.

- **Tiempo:** Medidas tomadas en campo han indicado que tanto la subsidencia instantánea como la dependiente del tiempo están asociadas con la excavación, pero la porción dependiente del tiempo es menor que la instantánea y a veces tan pequeña que es difícil de detectar sin un instrumento de nivelación de alta precisión (P. Ramírez, et al. 1980).

Desde hace tiempo se sabe que a cuanto más profundidad se encuentra la capa (filón) a explotar mayor tiempo durara el movimiento en la superficie (subsidencia).

La influencia de la profundidad de la minería y la posición del frente de avance en el hundimiento (subsidencia) dependiente del tiempo se vuelve más significativa en la minería de cámaras y pilares principalmente debido a la dificultad de predecir el deterioro de los pilares.

### 3.5 – Efectos de la subsidencia

Los daños causados por el fenómeno de la subsidencia de las minas subterráneas han sido un problema grave en las zonas urbanas durante muchos años y se generalizará a medida que aumente la demanda de recursos. En numerosos emplazamientos alrededor del mundo ciertas áreas urbanas (P. ej. Colorado y Wyoming) se han ido extendiendo y se han llegado a instalar sobre áreas con minas subterráneas abandonadas en donde el hundimiento retardado ha causado daños extensos en dichas áreas. Los impactos económicos en áreas rurales también pueden ser significativos, ya que los campos deben de ser renovados para evitar el estancamiento del agua (los pozos de agua pueden secarse cuando los acuíferos son perturbados por los movimientos de las rocas) y como en las áreas urbanas, las carreteras deben ser renovadas y las viviendas deben ser reparadas. Las tuberías de gas principales son especialmente vulnerables al hundimiento y, si se rompen, pueden incendiarse y explotar (F.T. Lee, et al 1983).

El daño debido al hundimiento de la superficie puede ser causado por cambios en la pendiente de la superficie, desplazamientos verticales diferenciales y deformaciones horizontales. Los planificadores deben saber si estos cambios están completos o en progreso.



A continuación, se muestran algunas imágenes de viviendas e infraestructuras afectadas por el fenómeno de la subsidencia y que se encuentran en la zona de estudio del presente trabajo (polígono de Lo Tacón) (imágenes obtenidas del estudio global de la subsidencia en el polígono industrial Lo Tacón realizado por la universidad de Oviedo en el primer semestre de 2010).



Fig. 20 – Imágenes de grietas causadas por efecto de la subsidencia minera en el polígono de Lo Tacón. La imagen de la izquierda es del año 2005 y la de la derecha es del año 2009 (puede verse la evolución que ha tenido dicha grieta).



Fig. 21 – Continuación de imágenes de grietas. La imagen de la izquierda es del año 2005 y la de la derecha es del año 2009 (se observa como la grieta a pesar de haber sido sellada con cemento vuelve a abrirse).





*Fig. 22 – Deformación de baldosa debida a la subsidencia minera.*

## 4. ANTECEDENTES

Según se ha podido estimar en estudios previos la extensión afectada por el fenómeno de la subsidencia en el polígono de Lo Tacón se calcula que es de alrededor de 96.000 m<sup>2</sup> y la zona donde mayor impacto esta teniendo dicha subsidencia se localiza sobre la vertical de las explotaciones mineras de las concesiones de La Cierva y Lo Veremos (que es donde existe una mayor cantidad de galerías mineras).

Esta zona se encuentra próxima a la intersección de las fallas regionales de “Cartagena – La Unión” (N70E) con la falla de “Las Lajas – La Cierva” (N130E), la cual se encuentra en el límite nororiental de la zona de agrietamientos y deformaciones del polígono de Lo Tacón (T. Rodríguez Estrella et al, 2002). Estudios previos han puesto de manifiesto que la falla regional “Las Lajas – La Cierva” podría estar implicada en la subsidencia que se esta produciendo en el polígono de Lo Tacón, esto sería debido a los epicentros sísmicos que existen cercanos a esta área, destacando el epicentro que se localiza al oeste de Torre Pacheco, el cual se corresponde un con un sismo de magnitud 2,3 que aconteció el 2 de mayo de 1998 (T. Rodríguez Estrella et al, 2002).

Teniendo en cuenta los últimos sismos registrados en la Región de Murcia (Torres de Cotillas 1995, Ramonete 1996 y Mula 1999) se puede comprobar que tienen un mecanismo focal de desgarre dextral de dirección N140E, esto puede correlacionarse con el sismo acontecido en Torre Pacheco en 1998, que aunque no se ha podido determinar el mecanismo focal de dicho sismo (debido a la baja magnitud) muy probablemente se corresponde con el mismo tipo de cinemática (T. Rodríguez Estrella et al, 2002). Además, realizando un análisis sobre los minados se pudo comprobar que existen zonas de hundimientos coincidentes con la zona de falla “Las Lajas – La Cierva”.

Se analizo un testigo de sondeo y se comprobó que prácticamente el 100% del mismo se corresponde con materiales del Mioceno, presentándose la roca muy compacta con una alta densidad de valor medio 2,52 gr/cm<sup>2</sup>, este resultado se puede relacionar con otros ensayos de densidad realizados por la empresa Peñarroya años atrás, donde el valor medio fue de 2,50 gr/cm<sup>2</sup>, esto indicaría que no ha habido un esponjamiento de los materiales miocénicos y sugiere que el hundimiento se debió de producir de forma rápida y masiva y no por un reajuste progresivo (T. Rodríguez Estrella et al, 2002).

Por otra parte, otros expertos sostienen que lo que en realidad ocurrió el 2 de mayo de 1998 no fue un terremoto, sino el colapso y desplome de una antigua mina de zinc ubicada en el presente polígono de Lo Tacón (La Unión), lo que dio como resultado a que el suelo temblara de manera similar a la de un terremoto. Estos expertos sostienen que hay una alta probabilidad de que todo comenzara con la rotura de un pilar de la mina, lo que condujo a la rotura en cadena de otros pilares dando como resultado el temblor del suelo.

Si se confirmarse esta hipótesis, se trataría de un caso muy grave, debido a que sobre estas minas abandonadas se ha construido el polígono industrial de Lo Tacón (a pesar de la opinión en contra de un informe del Instituto Geológico y Minero de España).

## 5. METODOLOGÍA

Para realizar este trabajo y poder modelizar correctamente la subsidencia desarrollada debida a la actividad minera, se ha utilizado un software de métodos numéricos de elementos finitos. Como es bien sabido, los métodos numéricos se basan en la resolución de ecuaciones diferenciales que definen el comportamiento de los materiales por métodos de cálculo numérico.

### 5.1. Breve descripción del software utilizado

En el caso de este trabajo fin de máster se ha optado por utilizar el conocido software Phases<sup>2</sup> (del paquete de rockscience), este programa es uno de los que más hemos utilizado durante el desarrollo del máster y por lo tanto estamos bastantes familiarizados con él.

Este software es un potente simulador de elementos finitos en 2D que tiene muchas aplicaciones como la de poder simular el comportamiento tanto de suelos como de rocas. Se puede utilizar para una amplia gama de proyectos de ingeniería y diseño tales como, la excavación, la estabilidad de taludes, la filtración de aguas subterráneas, el análisis probabilístico, la consolidación, etc. En este TFM se ha utilizado para simular el comportamiento de unas galerías mineras (excavación) con el fin de observar que consecuencias tiene en la superficie y que respuesta ofrece el terreno a dichas excavaciones.

Para poder realizar correctamente esta simulación, debemos de conocer lo mejor posible las características geomecánicas y/o parámetros del suelo y macizo rocoso donde están excavadas las galerías mineras, si no conocemos exactamente dichas propiedades podemos estimarlas nosotros, pero siempre con un cierto margen de error. Las características que deberíamos de conocer son:

- La geometría de la zona de estudio y sus dimensiones tanto en profundidad como en anchura de la zona afectada por la excavación.
- Las propiedades de los materiales que conforman el terreno y macizo rocoso (cohesión, peso específico, ángulo de rozamiento interno, modulo E, etc.).

Entre las diversas aplicaciones que puede desarrollar Phases<sup>2</sup> podemos destacar que este software es ampliamente utilizado para el análisis y diseño de túneles subterráneos, así como galerías mineras (en este caso). Esto es debido a todas las posibilidades que ofrece el software, ya sea para la simulación de galerías tanto en rocas duras como en rocas débiles o en suelos blandos, la capacidad del programa para trabajar en varias etapas y todas las herramientas de diseño que ofrece, hacen que este software sea una potente herramienta de trabajo.

## **5.2. Ventajas y desventajas del software Phase2**

Este tipo de métodos presentan una serie de ventajas, que hacen que cada vez se utilicen con más frecuencia en diversos estudios y proyectos, estas ventajas son:

- Permiten realizar análisis en 3-D.
- Son válidos para analizar túneles y excavaciones en cualquier sección.
- Permiten suponer unos estados tensionales con cualquier sección.
- Aportan una gran información sobre el terreno y el sostenimiento.

La principal desventaja de los métodos numéricos de elementos finitos es la siguiente:

- El tiempo empleado suele ser muy elevado, sobre todo si queremos realizar el modelo con gran precisión y tenemos que simular tanto condiciones de materiales rocosos como de suelos (estos tiempos actualmente se están reduciendo gracias al desarrollo de nuevos y más potentes ordenadores).

## 6. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA

Las explotaciones mineras para extraer mineral de galena (que son la principal causa de la subsidencia que se está produciendo en esta ubicación) que se llevaron a cabo tenían una profundidad media de unos 150 m.

A grandes rasgos el terreno suprayacente se compone de arcillas, areniscas y rellenos hasta los primeros 70 m, por debajo de esta cota la litología predominante se caracteriza por ser filitas y cuarcitas. Los estratos de calizas azules de calidad media que configuran la roca encajante se localizan dentro de estas filitas y cuarcitas.

Como podemos observar (fig. 23) el hundimiento (subsidencia) provocado por las actividades anteriormente descritas fue de 1,3 m en 2005 y de 1,6 m en 2010, ese hundimiento se ha ido incrementando hasta la actualidad (2019) y se ve reflejado en las nuevas grietas que han ido apareciendo.

En la figura 23 se ilustra una sección de 1600 m (corte A – B) de longitud, en el eje vertical se representa el hundimiento (en mm) y en el eje horizontal la distancia longitudinal. Se incluye con fines de orientación la localización de la empresa “Mármoles El Perinero” y puede observarse como la máxima subsidencia se localiza a unos 200 m a la derecha de dicha empresa.

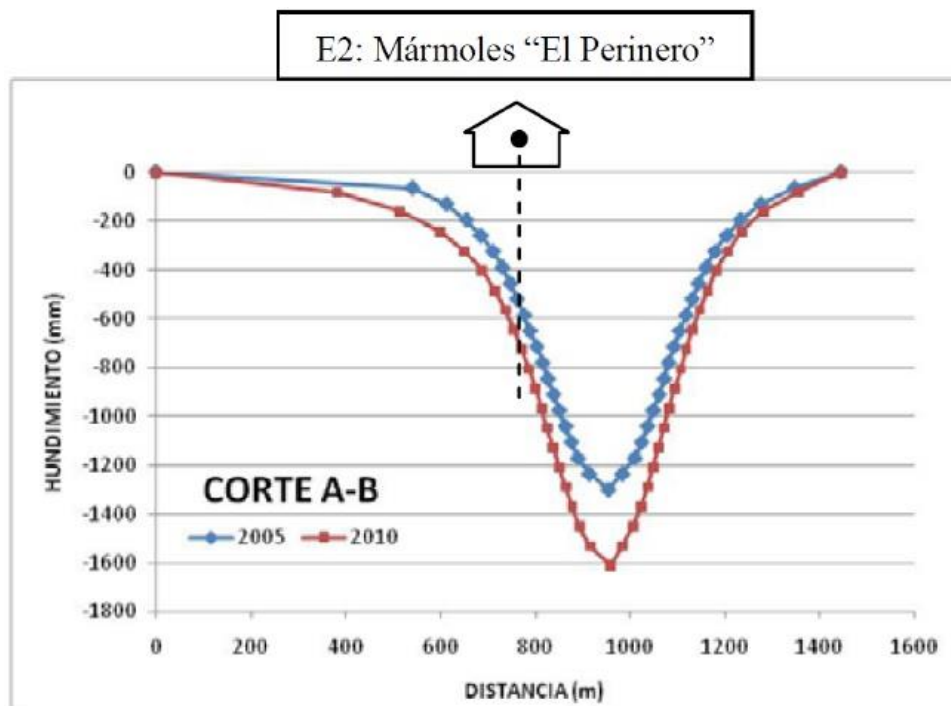


Fig. 23 – Gráfica sobre evolución del hundimiento entre los años 2005 y 2010, donde se aprecia el punto de la subsidencia máxima.

En la imagen inferior (fig. 24) se ilustra la zona estudiada y se muestra la dirección y orientación del perfil anteriormente representado en la imagen superior (fig. 23). Esta figura está coloreada con diferentes colores y tonos en función de la intensidad de la subsidencia (el rojo es ausencia de hundimiento y el azul oscuro es donde más

hundimiento se está produciendo), puede observarse como el epicentro de la subsidencia se encuentra a la derecha de la empresa “Mármoles El Perinero”.

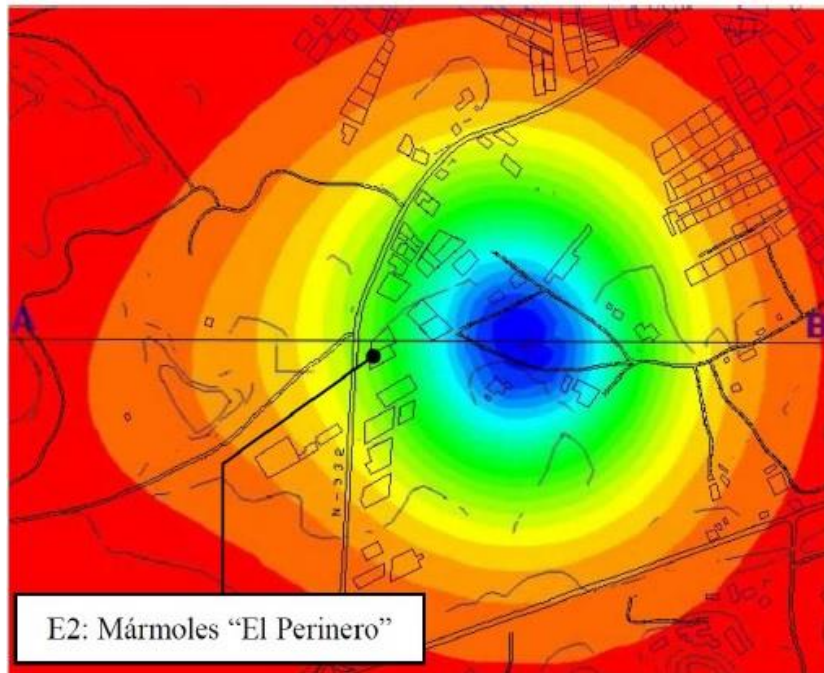


Fig. 24 – Mapa de colores donde se representa la intensidad de la subsidencia (rojo ausencia de hundimiento y azul oscuro máximo hundimiento).

En un estudio previo se procedió a la división del área de estudio según cinco zonas concéntricas, de radios crecientes de 100 metros entre ellas, siendo el centro de las mismas el área donde se registraron históricamente los mayores hundimientos, en la siguiente imagen se ilustra esta división sobre un plano.

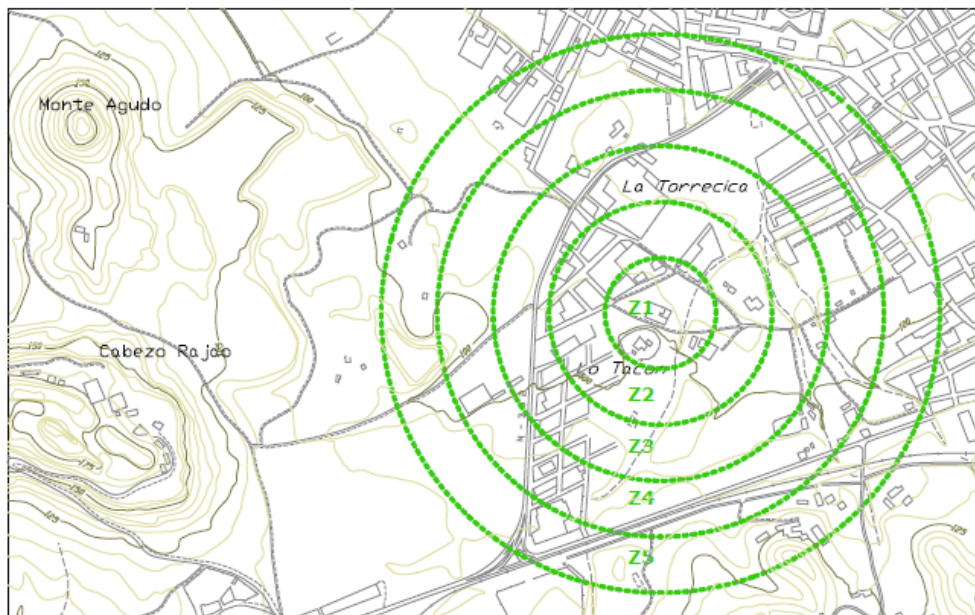


Fig. 25 – Mapa con la representación de la división de las cinco zonas circulares que conforman un estudio realizado previamente a este trabajo (Universidad de Oviedo, 2010).



Sobre dicho plano y para tener una idea más amplia de la intensa actividad minera que en esta zona se ha llevado a cabo en tiempos pasados, se han dibujado con diferentes colores los contornos de las minas que están (o estuvieron) presentes en la zona de estudio del polígono de Lo Tacón (fig. 26).

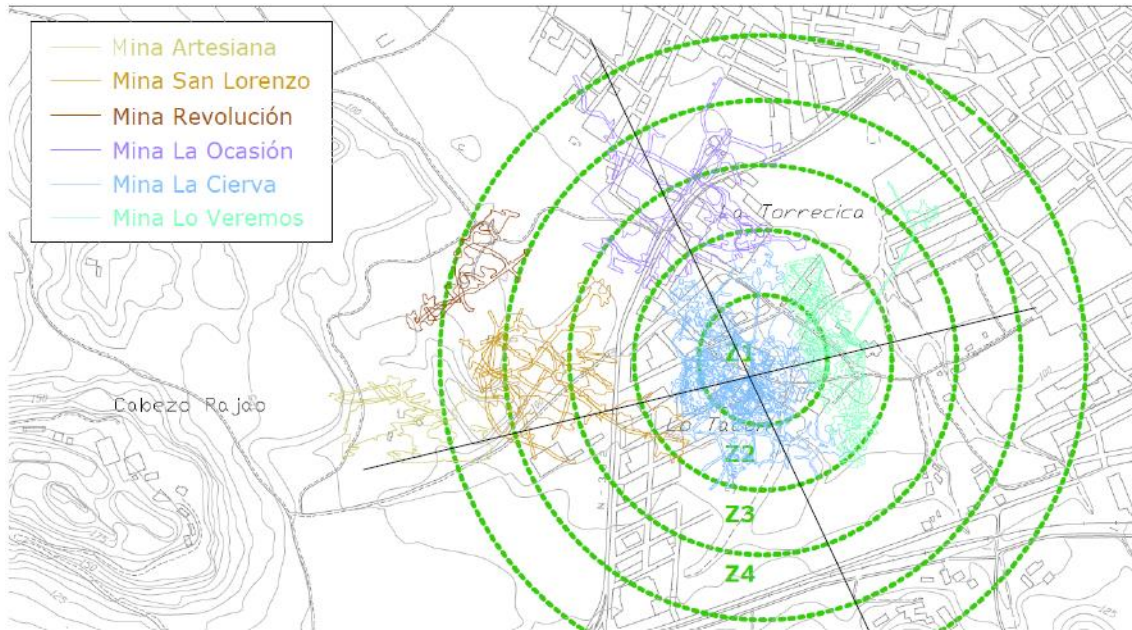


Fig. 26 – Ilustración de las minas presentes en el polígono de Lo Tacón sobre el mapa de la división de las cinco zonas circulares (Universidad de Oviedo, 2010).

Se puede observar como la mayor intensidad minera coincide con el mayor hundimiento (subsidencia) y se corresponde mayormente con la actividad minera llevada a cabo en las minas de La Cierva y Lo Veremos.

Sobre dicho plano (fig. 26), se levantaron dos perfiles geológicos con direcciones E-O y N-S (T. Rodríguez Estrella et al, 2002) aproximadamente, localizándose en el punto de intersección entre ambos perfiles el área donde se está produciendo la mayor subsidencia, en dichos perfiles se ilustra claramente el área afectada por este proceso (fig. 27).



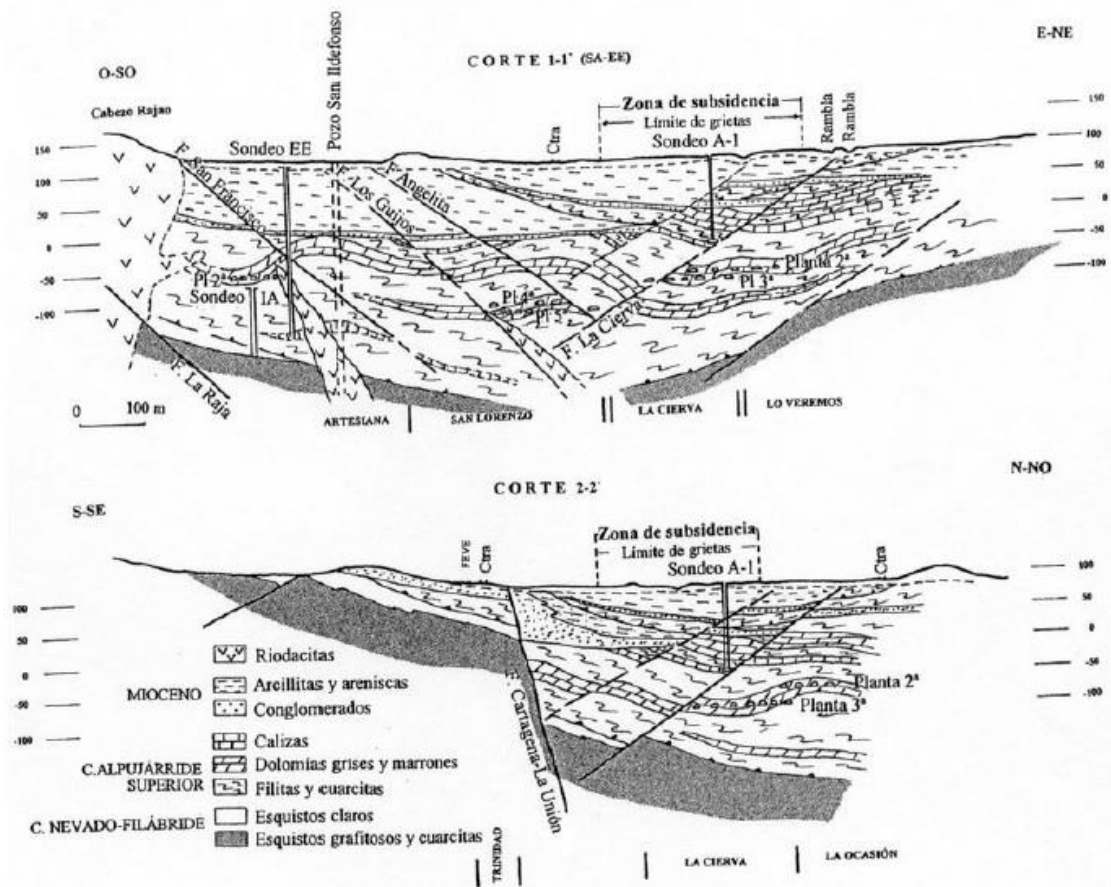


Fig. 27 – Perfiles OSO-ENE (superior) y SSE-NNO (inferior) que se realizaron en un estudio previo a este trabajo sobre el plano de la fig. 26 (T. Rodríguez Estrella et al, 2002).

En este TFM se han utilizado (entre otras fuentes) estos perfiles para realizar y construir un modelo (mediante el software numérico de elementos finitos phase2) que se ajuste a la realidad lo más preciso posible y que se presenta y analiza a continuación.

## 7. PRESENTACIÓN DEL MODELO

El modelo como bien se ha comentado en apartados anteriores se ha realizado con el software Phases2 del paquete de Rockscience. Dicho modelo se ha ido ajustando (variando longitudes, ángulos, etc.) hasta conseguir un modelo que podría aproximarse a la realidad y que se ilustra a continuación (Fig. 28):

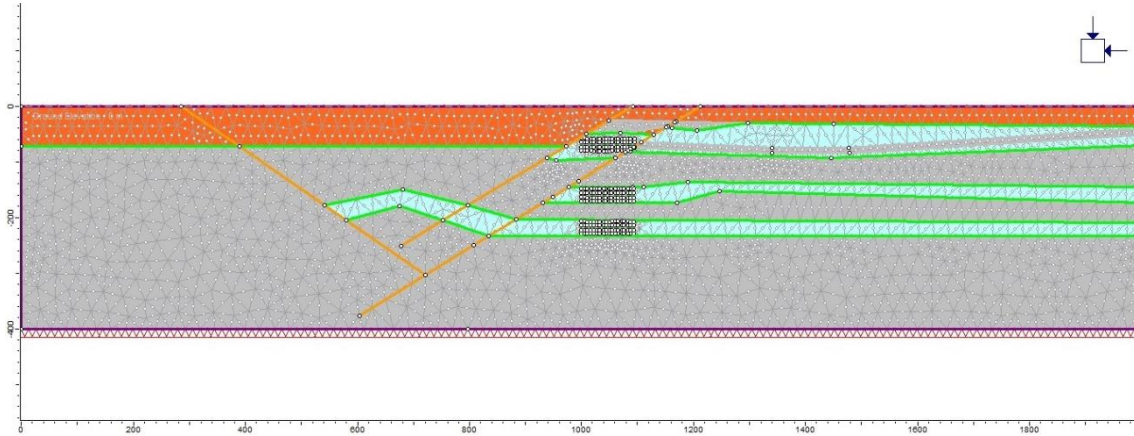


Fig. 28 – Modelo realizado con el software phases2 donde se han ido realizando simulaciones.

En esta imagen (fig. 28) se observa de manera general el modelo que se ha desarrollado para llevar a cabo este estudio, el modelo se engloba en un área de 2.000 m de longitud y 400 m de espesor (se ha decidido realizar con una longitud tan elevada para que simule una situación en la que no haya límites laterales (infinito) que puedan perturbar los resultados obtenidos), en esta primera imagen (fig. 28) se pueden resaltar las fracturas y fallas (F. angelita, F. la cierva...) que afectan a esta zona y que hacen que puedan existir zonas de debilidad en las proximidades y límites de dichas fracturas.

Dentro del presente modelo se han diferenciado tres litologías distintas (niveles geomecánicos), que son: areniscas y rellenos (naranja), filitas (gris) y calizas azules (azul - verdoso) con parámetros geomecánicos diferentes (fig. 29).

arcillas y rellenos		filitas		calizas azules	
Initial element loading	field stress & body force	Initial element loading	field stress & body force	Initial element loading	field stress & body force
Unit weight	0.023 MN/m <sup>3</sup>	Unit weight	0.027 MN/m <sup>3</sup>	Unit weight	0.027 MN/m <sup>3</sup>
Elastic type	isotropic	Elastic type	isotropic	Elastic type	isotropic
Young's modulus	20000 MPa	Young's modulus	6143.7 MPa	Young's modulus	2145.6 MPa
Poisson's ratio	0.3	Poisson's ratio	0.3	Poisson's ratio	0.3
Failure criterion	Mohr-Coulomb	Failure Criterion	Generalized Hoek-Brown	Failure Criterion	Generalized Hoek-Brown
Peak tensile strength	0.01 MPa	Material type	Plastic	Material type	Plastic
Residual tensile strength	0 MPa	Dilation Parameter 1		Dilation Parameter 2	
Peak friction angle	20 degrees	Compressive strength	30 MPa	Compressive strength	45 MPa
Peak cohesion	0.05 MPa	mb parameter	1.17374	mb parameter	0.641037
Material type	Plastic	s parameter	0.003866	s parameter	0.000713
Dilation Angle	0 degrees	a parameter	0.505734	a parameter	0.505734
Residual Friction Angle	18 degrees	GSI parameter	50	Residual mb parameter	0.37005
Residual Cohesion	0 MPa	mi parameter	7	Residual s parameter	0.000167
Jointed	No	D parameter	0	Residual a parameter	0.511368
Piezo to use	None	Residual mb parameter	0.480628	Jointed	No
Ru value	0	Residual s parameter	0.00024	Piezo to use	None
		Residual a parameter	0.531267	Ru value	0
		Jointed	No		
		Piezo to use	None		
		Ru value	0		

Fig. 29 – Litologías descritas en el terreno del polígono de Lo Tacón con los parámetros geomecánicos utilizados en la realización del modelo adoptado para las simulaciones realizadas.

La concentración y explotación del mineral de galena se concentró en las calizas azules a lo largo de tres niveles de explotación con dos plantas por nivel, estos estratos de calizas se encuentran encajados a techo y a muro entre las filitas (que es la litología predominante).

Las arcillas margosas y areniscas conforman el relleno de la parte superficial de la zona, el cual tiene un espesor variable que oscila entre 30 m (en la parte Este del modelo) hasta 70 m (en la zona Oeste del modelo), aproximadamente.

Los techos de los niveles de explotación de galena (calizas) se sitúan aproximadamente a 50 m, 145 m y 200 m de profundidad desde la superficie. Estos estratos de caliza tienen una potencia variable que se ha representado de la siguiente manera; El nivel más superficial es el de mayor espesor con 45 m, mientras que los dos niveles inferiores tienen un espesor similar de 30 m aproximadamente.

Como se ha mencionado anteriormente la explotación de galena (PbS) se llevó a cabo en los estratos de calizas a lo largo de los tres niveles de explotación con dos plantas por nivel y con una separación de 8 m aproximadamente entre ambas plantas, en cada nivel la explotación se realizaba en cámaras con unas dimensiones aproximadas de 7 m de altura x 7 m de anchura y con un recorrido de hasta 200 m, estas cámaras estaban separadas por pilares con una anchura de 4 m aproximadamente. En la siguiente imagen (fig. 30) del modelo realizado se muestra la zona afectada por la actividad minera y por lo tanto la zona que se está viendo más afectada por el fenómeno de la subsidencia.

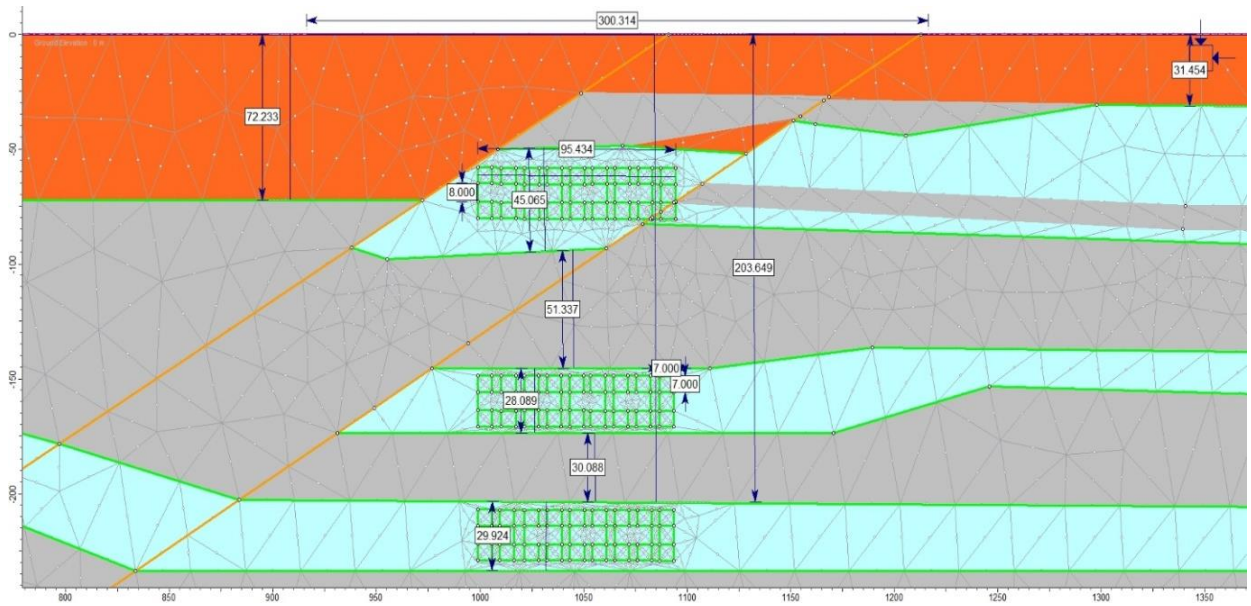


Fig. 30 – Modelo adoptado para la realización del presente estudio donde se indican las dimensiones y espesores de las galerías mineras entre otros.

En la siguiente imagen (fig. 31) se hace hincapié en un nivel de explotación (fig. 31) de este modelo (concretamente el nivel superior) para tener una visión más detallada tanto de las cámaras como de los pilares. Se puede observar la distribución de las cámaras en dos niveles de explotación (separados unos 8,0 m aprox.) en el interior de la litología carbonatada (calizas azules), también se pueden ver los pilares que separan dichas cámaras en el plano horizontal unos 4,0 m aproximadamente.

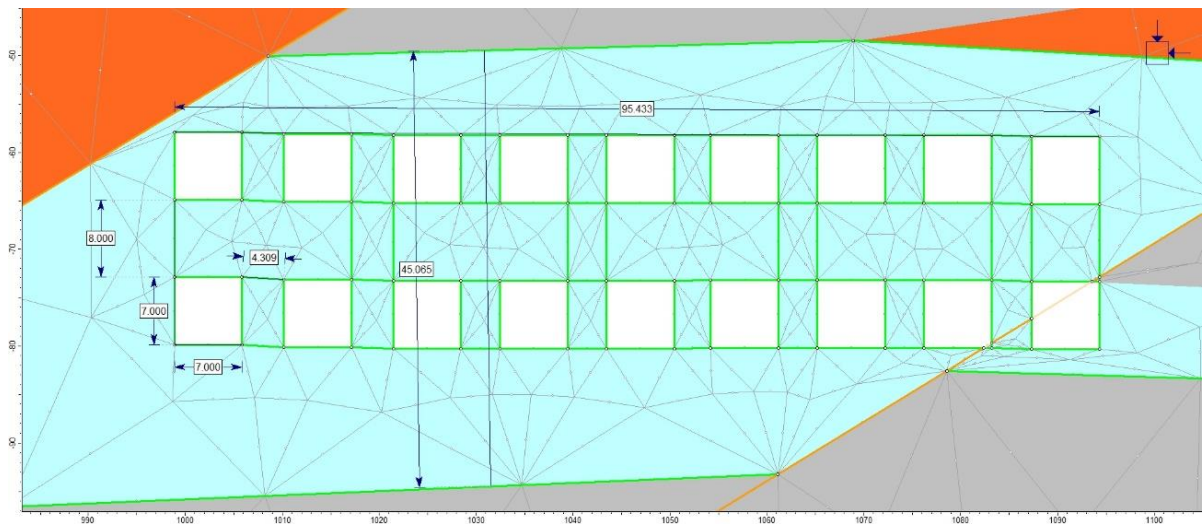


Fig. 31 – Vista ampliada del nivel superior de explotación.



## 8. RESULTADOS

Para ilustrar los resultados obtenidos, se han ido realizando simulaciones mediante el software expuesto para los posibles estados en las que se pueden encontrar en la actualidad las galerías mineras que se encuentran bajo la superficie de la zona afectada por la subsidencia expuesta en este trabajo. Dichos resultados se van a ir exponiendo mediante imágenes que se han ido comentando con el fin de llegar a obtener unas claras conclusiones.

### 8.1. Explotación y vaciado de las cámaras de las galerías mineras

Primeramente, se exponen los resultados obtenidos de la situación en la que las galerías mineras han sido totalmente explotadas y por lo tanto se ha creado un vacío (hueco) del tamaño de dichas galerías. Para ver la evolución de la subsidencia y poder analizarla más fielmente se ha simulado primero la explotación de las galerías del primer nivel (el más superficial), después la explotación del segundo nivel (más el primer nivel) y posteriormente la explotación del tercer nivel (el más profundo) (más los dos niveles superficiales).

En la siguiente imagen (fig. 32) se puede observar como todas las galerías mineras del nivel más superficial han sido explotadas. Las flechas rojas indican el sentido del desplazamiento de los materiales. Puede observarse como el máximo hundimiento se produce más o menos en la parte central de la explotación minera (como era de esperar) pero a pesar de que todas las galerías mineras de este primer nivel han sido explotadas la máxima subsidencia que se observa en la superficie del terreno es de tan solo 11 cm (muy lejos de los 1,6 m que se observaron en el año 2010), por lo que podemos afirmar que han tenido que suceder más acontecimientos que han hecho aumentar muy considerablemente este hundimiento.

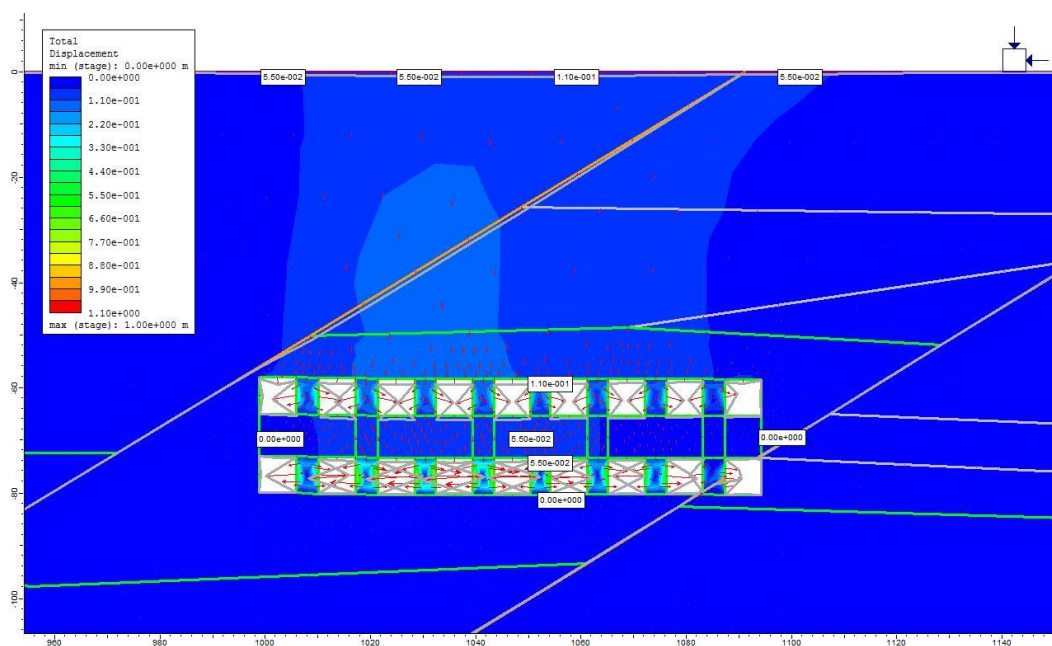


Fig. 32 – Simulación del vaciado de las cámaras del primer nivel de explotación.

En la imagen inferior (fig. 33) tenemos una captura ampliada de las galerías explotadas del nivel superior. Mediante las líneas grises que marcan la posición final de las galerías tras ser deformadas y las flechas rojas que marcan el sentido del desplazamiento podemos llegar a la conclusión de que el máximo desplazamiento (y por tanto la máxima deformación) se produce en la parte intermedia de las cámaras, ya que los muros laterales de dichas cámaras han cedido y se han desplazado al interior de las galerías, mientras que el techo solamente ha sufrido un pequeño desplazamiento vertical similar a la subsidencia producida en la superficie del terreno. También se observa como las cámaras inferiores de este nivel de explotación sufren una mayor deformación lateral, esto es debido a que la tensión a la que están sometidas es mayor que las galerías superiores. Por último, también podemos observar como en los límites laterales de la explotación los muros que están junto al exterior de la explotación (roca intacta) no han sido deformados ni desplazados, probablemente debido a que los esfuerzos y tensiones que soportan se distribuyen por toda la roca intacta lo que hace disipar la energía, esto confirma que la máxima deformación sucede en el punto medio del interior de la explotación minera.

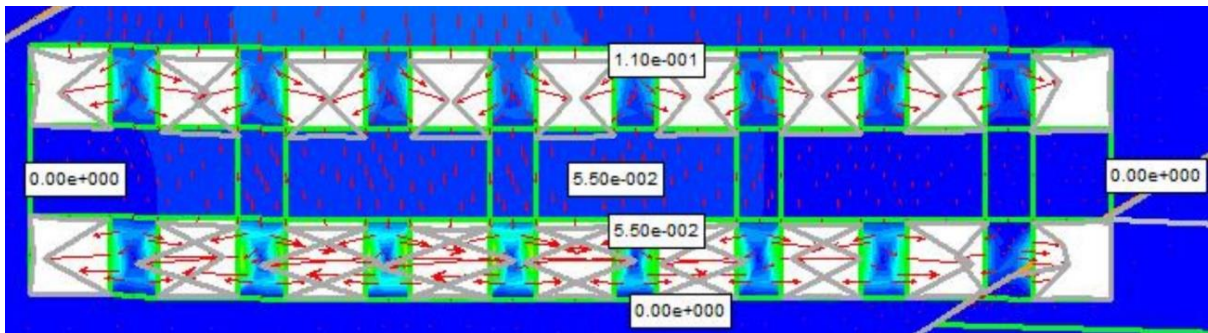


Fig. 33 – Imagen ampliada del vaciado de las galerías del primer nivel de explotación donde observan los valores del desplazamiento en varios puntos.

Ahora pasamos a exponer los resultados obtenidos en la simulación de la situación en las que tanto las galerías mineras del nivel superior como del nivel intermedio de explotación han sido totalmente explotadas (ahora por lo tanto el número de huecos es superior al de la situación anterior). Como era de esperar la máxima subsidencia (que se produce nuevamente en el centro de la explotación minera) ha aumentado con respecto a la situación expuesta anteriormente hasta los 18 cm, pero aun así sigue siendo un valor que se encuentra muy lejos del valor observado en la realidad (1,6 m en 2010) por lo que hace que tengamos que descartar esta situación como la que actualmente se está produciendo en el polígono de Lo Tacón.

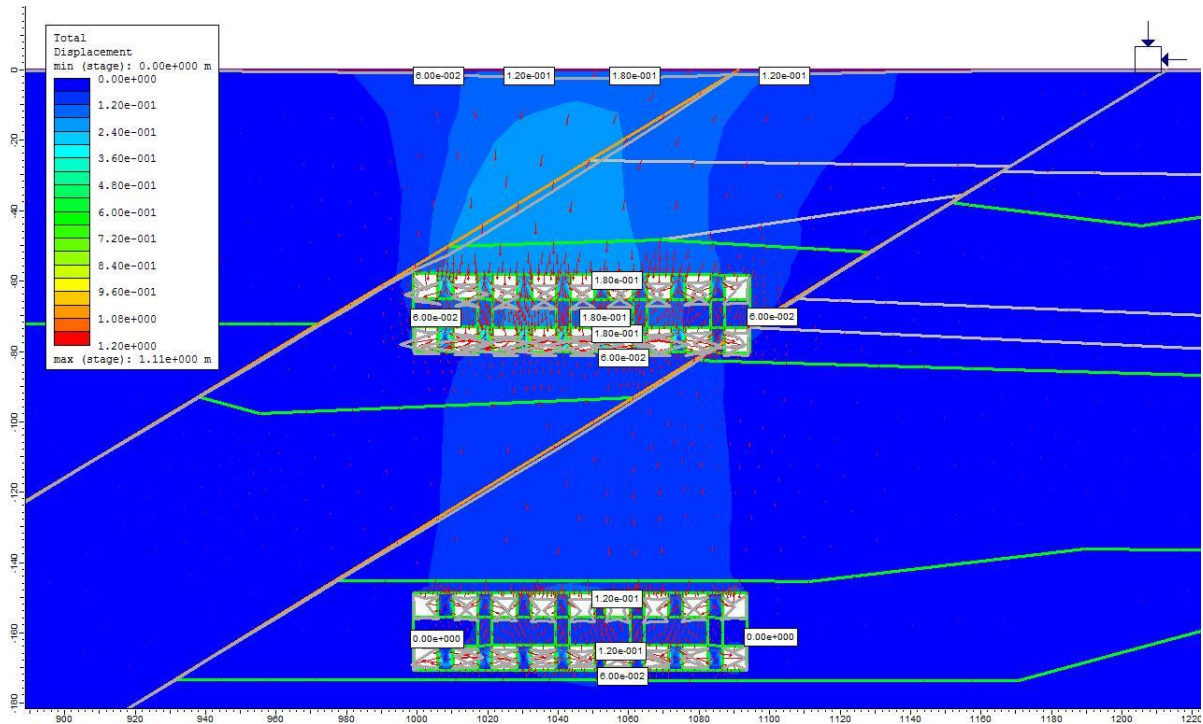


Fig. 34 – Simulación del vaciado de las cámaras del primer y segundo nivel de explotación.

Otro detalle que se puede observar en estas imágenes es la deformación de las cámaras mineras, se puede apreciar como las deformaciones de las cámaras del nivel superior son superiores a las deformaciones de las cámaras del nivel intermedio, este hecho indica que a mayor profundidad de explotación menor es el impacto que se tiene en superficie (esto corrobora lo que la mayoría de autores defiende). En la siguiente imagen (fig. 35) se tiene una vista ampliada de las plantas del nivel intermedio de explotación, donde se aprecia la deformación de las cámaras y se puede comparar con la deformación de las cámaras del nivel más superficial.

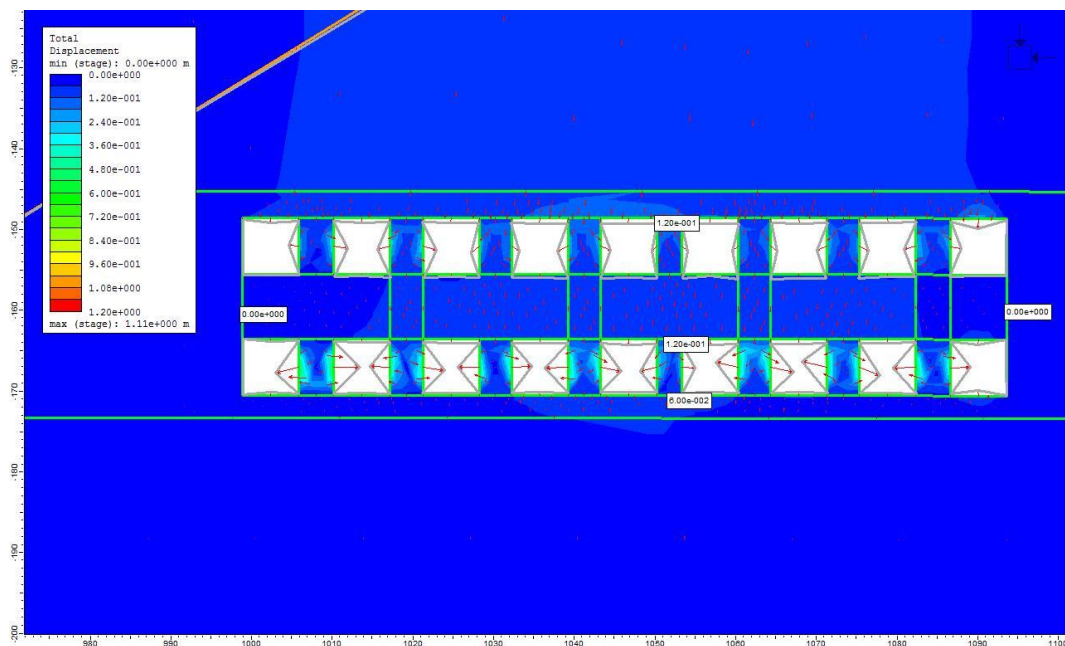


Fig. 35 – Imagen ampliada de las cámaras del nivel de explotación intermedio para la simulación del vaciado de las cámaras de explotación, tanto del nivel superior como del nivel intermedio.



Como último ejemplo de este apartado de explotación y vaciado de las cámaras, tenemos la situación de la explotación de las cámaras del tercer nivel (más la explotación de las cámaras de los dos niveles anteriores, es decir la explotación y vaciado de todas las cámaras de esta explotación minera).

En esta situación hay que destacar que la máxima subsidencia no aumenta con respecto a la situación anterior y se mantiene en 18 cm, aunque lo que si aumenta es el ancho afectado por esta máxima subsidencia (que abarca casi la totalidad del ancho de la explotación minera). Con estos datos, podemos deducir que la profundidad de las cámaras de las galerías mineras del nivel de explotación inferior se encuentran a una profundidad bastante elevada que hace minimizar mucho los efectos de la subsidencia en la superficie.

Otro aspecto a destacar de esta situación es la deformación de las cámaras de las explotaciones mineras, se observa como la deformación tanto de las cámaras del nivel superior como las del nivel intermedio de explotación aumentan bastante con la explotación de las cámaras del nivel inferior. El hundimiento del techo es más notable en las cámaras del nivel intermedio de explotación (alcanzando un máximo de 45 cm, mientras), debido a que este nivel se encuentra entre los otros dos niveles de explotación (el superior y el inferior) y los huecos creados por esas dos explotaciones afectan a la mayor deformación y subsidencia del techo de las cámaras del nivel intermedio de explotación debido a los espacios vacíos creados y a la posterior reorganización que se produzca en esos espacios vacíos.

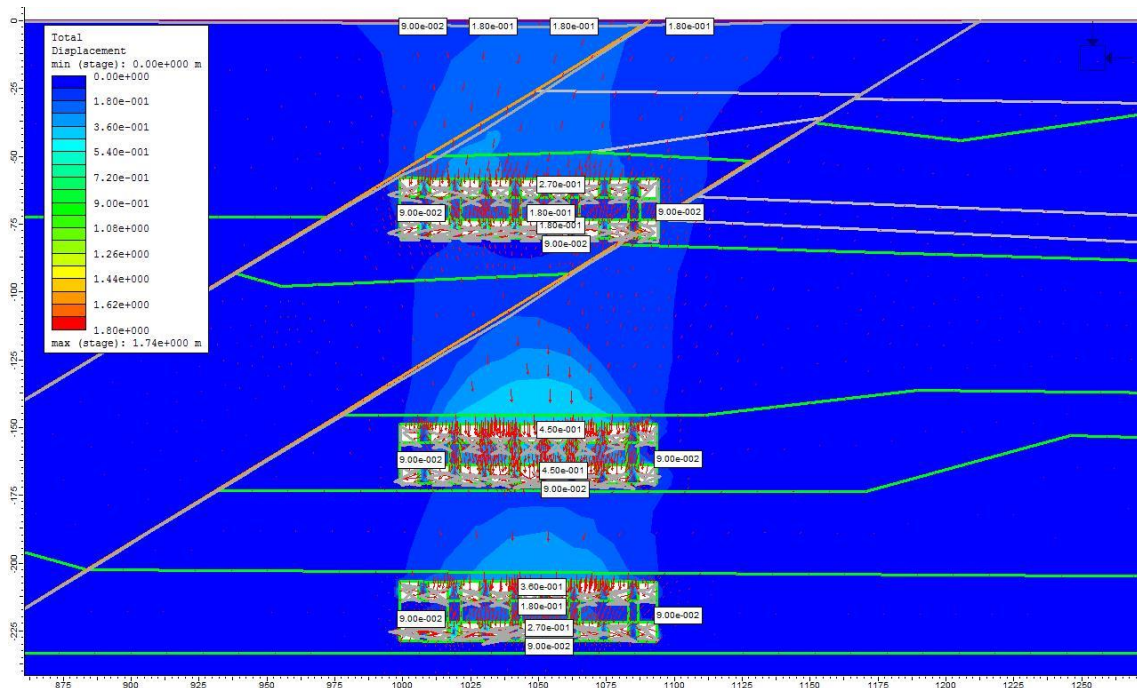


Fig. 36 – Simulación del vaciado de las cámaras de los tres niveles de explotación.

En la siguiente imagen se muestra la explotación de las cámaras del tercer nivel de explotación, puede verse con detalle el desplazamiento y deformación de dichas cámaras.

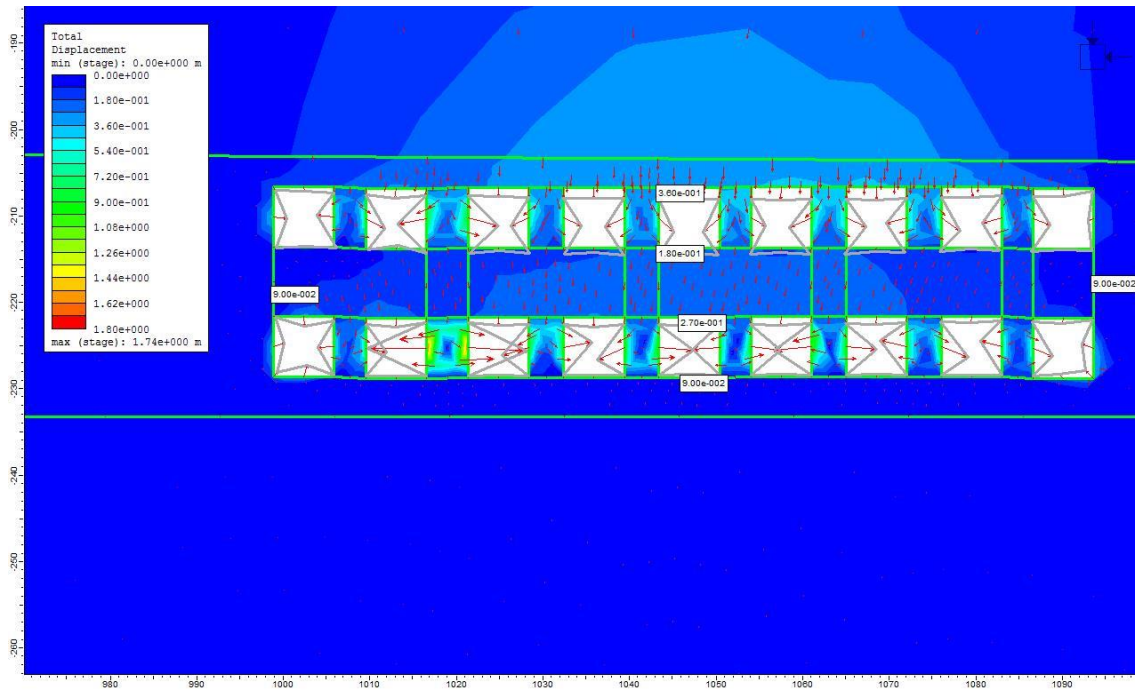


Fig. 37 – Imagen ampliada de las cámaras del nivel de explotación inferior para la simulación del vaciado de las cámaras de los tres niveles de explotación.

Como se ha podido comprobar la subsidencia provocada por la simple explotación y el vaciado de las cámaras de las galerías mineras no provoca una subsidencia tan elevada como la que se ha observado en la realidad (1,6 m en 2010), por lo que se han tenido que producir otros episodios de deformación o de modificación de las galerías mineras que han provocado el aumento de la subsidencia que se ha observado en la realidad.

## 8.2. Colapso de parte de los pilares que separan las cámaras de explotación

Una situación que provocaría el incremento de la subsidencia y que se ha planteado en este trabajo es el colapso de algunos de los pilares que tenían la función de proteger y mantener las cámaras de las galerías mineras para que no colapsaran y se pudieran explotar con seguridad, estos pilares como se ha comentado con anterioridad tenían una anchura de 4,0 m y una altura de 7,0 m aproximadamente.

Como se ha hecho para la simulación de la explotación y vaciado de las cámaras de las galerías mineras, para poder observar mejor la evolución de la subsidencia acontecida por el colapso de dichos pilares, primeramente se ha simulado el colapso de los pilares del primer nivel de explotación (cabe destacar que todas las cámaras de las galerías mineras (de los tres niveles de explotación) están explotadas y vaciadas, es decir es una continuación de la situación que se ha expuesto en el primer apartado), posteriormente se ha analizado la situación de la subsidencia producida para el colapso de los pilares del primer nivel más los pilares del segundo nivel de explotación y finalmente se propondrá también la opción del colapso de parte de los pilares de los tres niveles de explotación, se ha decidido hacer esto para poder

observar y comparar con más detalle y precisión la evolución seguida para las distintas situaciones propuestas.

En la siguiente imagen (fig. 38) se ilustra la situación de que la mitad de los pilares que separan las cámaras de explotación entre sí en el nivel superior han colapsado y por lo tanto dichas cámaras se han “fusionado” en cámaras más grandes e inestables. En esta situación se puede observar como la subsidencia aumenta considerablemente hasta alcanzar un valor máximo de 39 cm (parte central de la explotación), pero a pesar de que la subsidencia ha aumentado más del doble con respecto a la situación más desfavorable del apartado anterior aún se encuentra lejos de lo observado en la realidad.

Un aspecto que resalta al igual que en el apartado analizado anteriormente es poder observar como la máxima deformación se produce en las cámaras centrales de la explotación sobre todo de la segunda planta donde los muros laterales se deforman tanto hacia dentro de las cámaras de explotación que prácticamente acaban chocando y juntándose. Por otra parte, en las cámaras que quedan en los bordes de la explotación se produce una deformación notablemente menor que en las cámaras centrales debido a que hacia el exterior de la explotación no existen huecos y vacíos que se puedan rellenar y por lo tanto los esfuerzos producidos en esas zonas se disipan sin deformar la roca (o muy poco), aunque en los muros laterales de las cámaras que se encuentran a la izquierda y que se sitúan junto al exterior de la explotación (margen izquierda) se produce una deformación mayor que la producida en el muro lateral exterior de las cámaras del otro extremo de la explotación (margen derecha), esto probablemente sea debido al efecto de la orientación y dirección de la falla que discurre por este terreno que hace que en un lado se concentren esfuerzos mayores a los del otro lado.

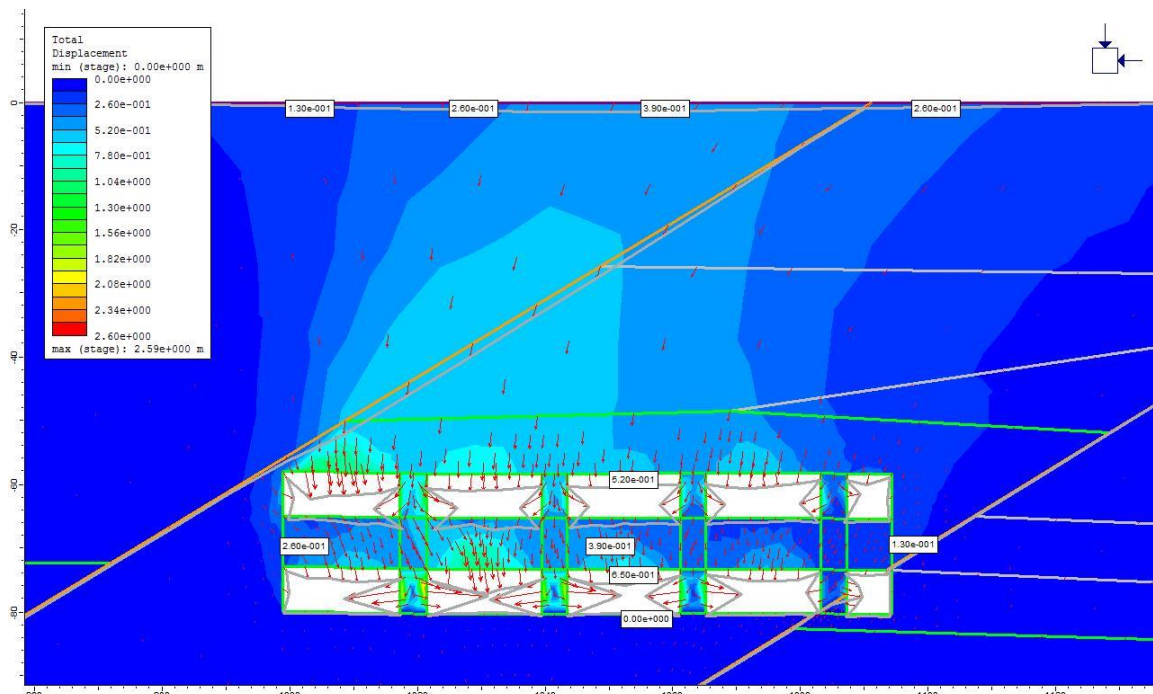


Fig. 38 – Colapso de parte de los pilares del nivel de explotación superior.

Ahora pasamos a analizar los resultados obtenidos en la simulación de la situación donde parte de los pilares (la mitad más o menos) tanto del primer nivel como del segundo nivel de explotación han colapsado.

El análisis llevado a cabo se ilustra en la siguiente imagen (fig. 39) y se puede observar como en esta situación la subsidencia desarrollada en la superficie del terreno a aumentado hasta alcanzar un valor máximo de 55 cm, pero como en los casos anteriores este aumento es insuficiente para explicar la subsidencia observada en la realidad. De otro modo, otro aspecto que queda reflejado en esta situación es lo observado en los límites de la explotación, ya que los muros laterales que se sitúan sobre los límites de la explotación minera, tanto del margen derecha como del margen izquierda reflejan un desplazamiento similar de 18,5 cm y por lo tanto una deformación similar. Esto es así, debido a que este nivel de explotación queda fuera del alcance de la perturbación producida por las fallas que se sitúan sobre dicho nivel de explotación, y por lo tanto los esfuerzos se distribuyen de manera simétrica a lo largo de todo el ancho del nivel de explotación y no como sucede con el nivel de explotación superior, el cual se encaja entre las dos fallas antes mencionadas, donde se puede percibir como el margen izquierdo se ve afectado por unos esfuerzos y tensiones mayores a los del margen derecho ya que el desplazamiento sufrido en el margen izquierdo es superior al del margen derecho.

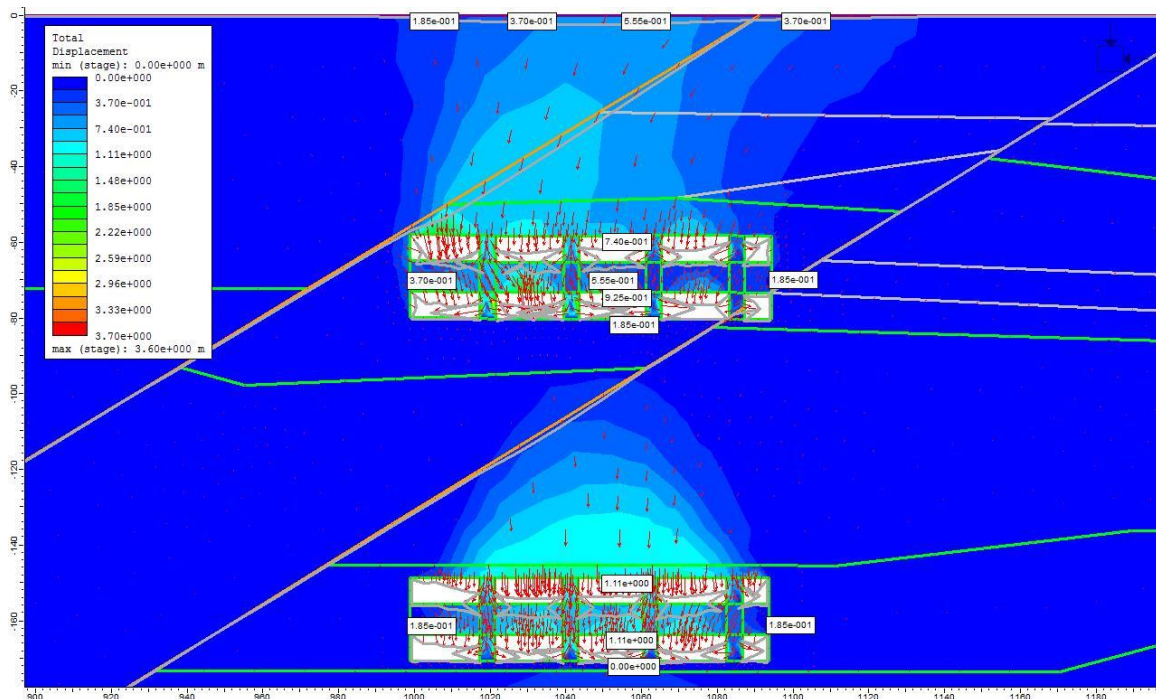


Fig. 39 – Colapso de parte de los pilares de los niveles superior e intermedio.

Para poder observar con más detalle las deformaciones observadas en las cámaras del segundo nivel de explotación se adjunta la siguiente imagen (fig. 40).



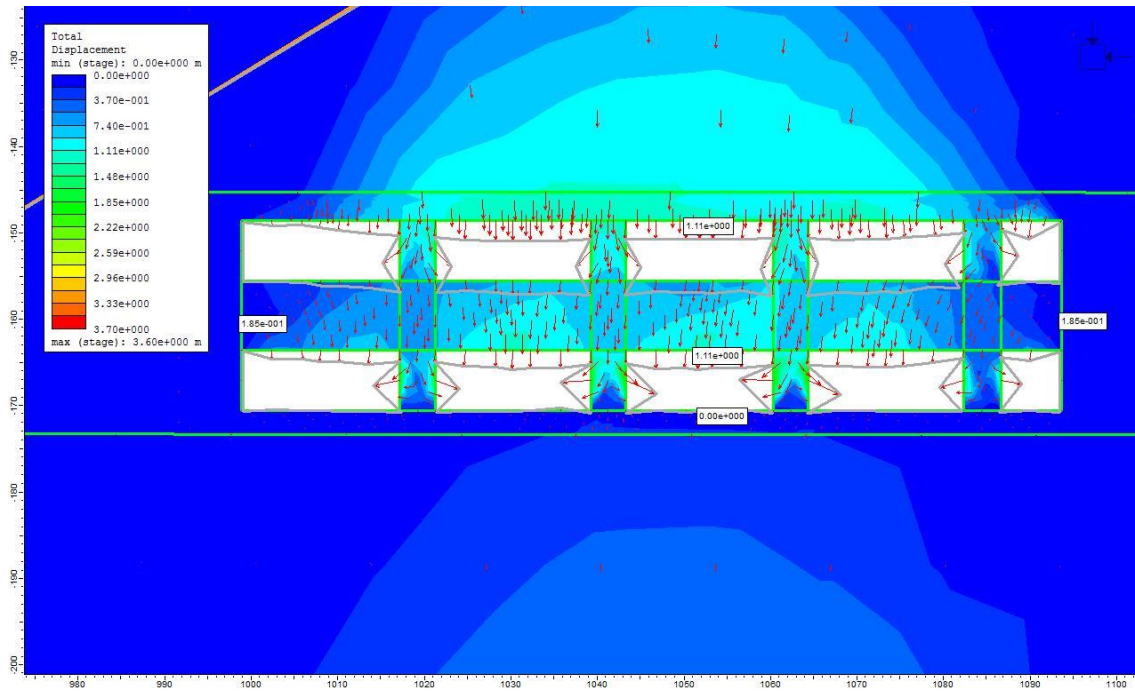


Fig. 40 – Cámaras de explotación del nivel intermedio después del colapso de parte de los pilares de los niveles superior e intermedio.

En dicha imagen lo más notable que se observa es el hundimiento máximo que se produce en las cámaras centrales que es de 1,11 m bastante superior a los 74 cm de hundimiento que se observan en las cámaras del primer nivel de explotación.

Finalmente, como último ejemplo del apartado del colapso de parte de los pilares que separan las cámaras de explotación, se expone la situación donde aparte de los pilares colapsados en el nivel de explotación superior e intermedio también han colapsado ciertos pilares del nivel inferior.

En esta situación que se ilustra en la siguiente imagen (fig. 41) obtenida en la simulación realizada, se puede apreciar como la máxima subsidencia aumenta hasta alcanzar un valor de hundimiento máximo de 72 cm, aunque como en los casos anteriores y a pesar de que este hundimiento ya es de importancia, queda lejos del observado en la realidad.

En este caso en los límites laterales de la explotación minera sucede algo similar a lo observado en el nivel de explotación intermedio, es decir se observa un desplazamiento similar de los muros laterales que se sitúan en los límites de la explotación minera (margen derecha y margen izquierda) debido a que también se encuentra fuera del alcance de las fallas y los esfuerzos se reparten de manera simétrica, pero en este nivel de explotación el desplazamiento (y deformación) aumenta un poco hasta alcanzar los 24 cm.

Otro aspecto a destacar, al igual que sucedía en la situación analizada en el apartado anterior (explotación y vaciado de las cámaras de las galerías mineras), es la deformación y desplazamiento de las cámaras de las explotaciones mineras, donde se observa un considerable aumento en el desplazamiento tanto de las cámaras del primer como del segundo nivel de explotación con el vaciado de las cámaras del nivel de explotación inferior. Igualmente, el hundimiento del techo es de mayor magnitud en las cámaras del segundo nivel de explotación donde se alcanza un desplazamiento



máximo de 1,68 m, debido a los espacios vacíos creados en los niveles superior e inferior, ya que se tendrá que producir una reorganización de dichos espacios vacíos.

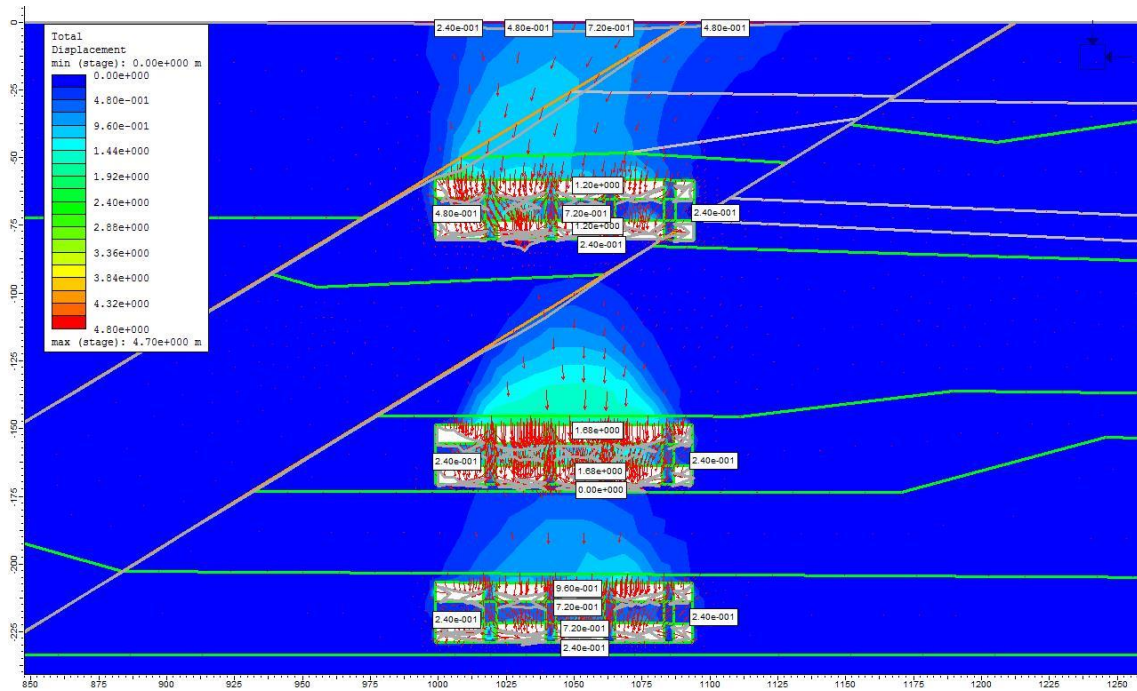


Fig. 41 – Colapso de parte de los pilares en los tres niveles de explotación (superior, intermedio e inferior).

En la siguiente imagen (fig. 42) se muestra el colapso de parte de los pilares de las cámaras del nivel de explotación inferior, puede observarse con detalle el desplazamiento y deformación en dichas cámaras.

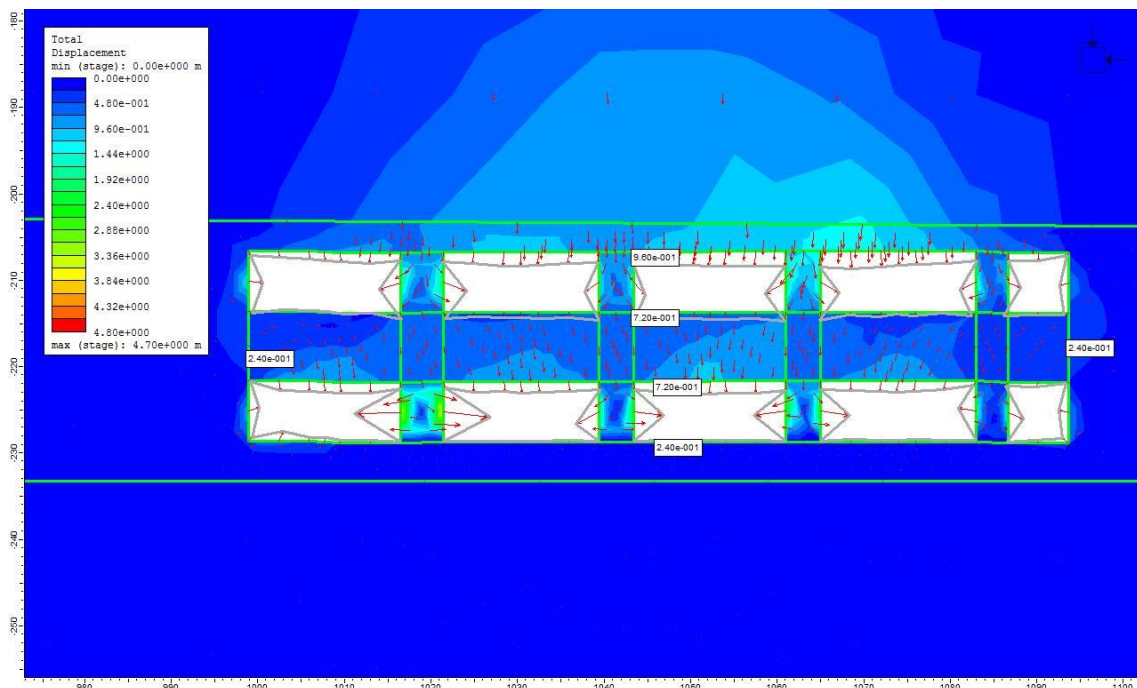


Fig. 42 – Cámaras de explotación del nivel inferior después del colapso de parte de los pilares en los tres niveles de explotación (superior, intermedio e inferior).

Al igual que en el apartado anterior, en la simulación analizada para el supuesto colapso de parte de los pilares que separan las cámaras de explotación, los resultados obtenidos en relación con la subsidencia provocada son de una menor magnitud que lo observado en la realidad, por lo que se han tenido que producir nuevos episodios de deformación o de modificación de las galerías mineras, hasta llegar a obtener un valor similar al observado en la realidad (1,6 m en 2010) en relación a la subsidencia.

### 8.3. Colapso de parte de las galerías mineras en los niveles de explotación

Se ha propuesto el colapso de parte de las cámaras mineras en los distintos niveles de explotación (posteriormente al colapso de los pilares) como posibles situaciones que incrementarían la subsidencia desarrollada en la superficie del terreno. Este colapso se produciría entre parte de las dos plantas que hay en los distintos niveles de explotación debido a posibles inestabilidades y perturbaciones que hayan sucedido a lo largo del tiempo y que hayan ocasionado el colapso de parte de las galerías mineras.

Como primer ejemplo de este apartado se ha propuesto el colapso completo de las galerías de las plantas del nivel superior de explotación, en la siguiente imagen (fig. 43) se muestra la simulación realizada.

Como se puede observar el hundimiento provocado por este colapso es de 3,30 m es decir, muy superior al observado en la realidad en el año 2010 por lo que esta situación hay que descartarla, aunque nos esta indicando la posible subsidencia que se podría llegar a producir en el futuro si esta situación sucediera.

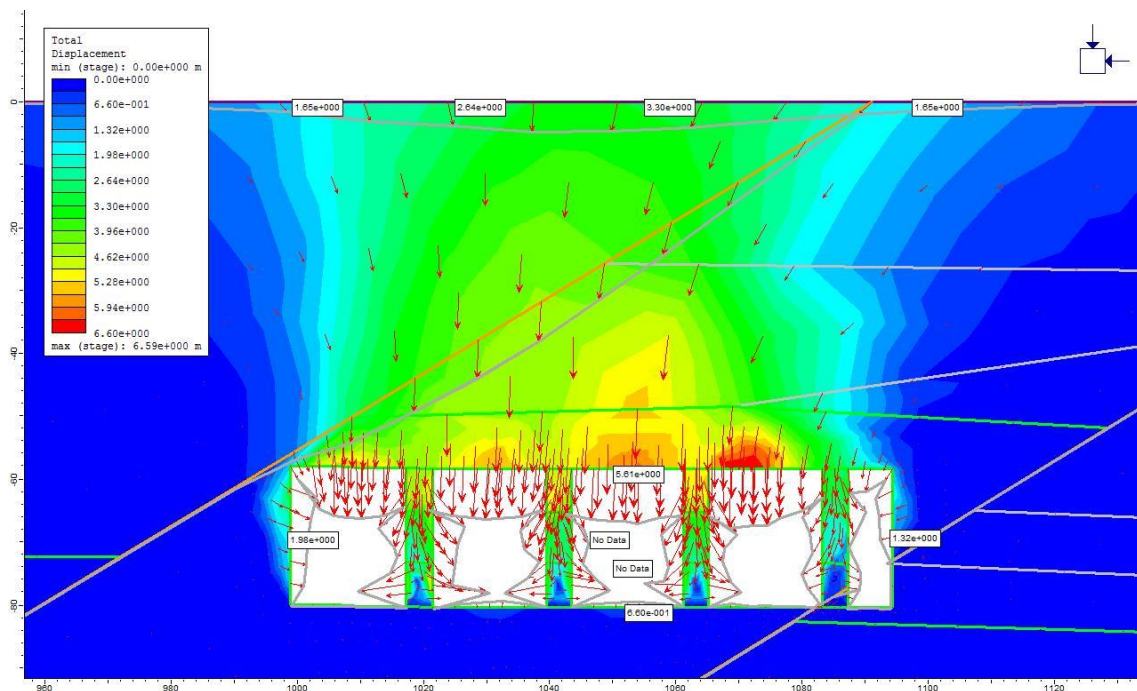


Fig. 43 – Colapso completo de las cámaras en las plantas del nivel de explotación superior.

Pasamos entonces a proponer y analizar otras situaciones que se ajusten de una forma más precisa a la realidad observada.

En la siguiente simulación representada en la imagen inferior (fig. 44) se ha optado por analizar la situación en la que en el nivel de explotación superior, se ha producido en las galerías centrales el colapso tanto de las cámaras de la primera planta como de la segunda planta de explotación, por otra parte, en el resto de cámaras se ha mantenido el colapso de los pilares.

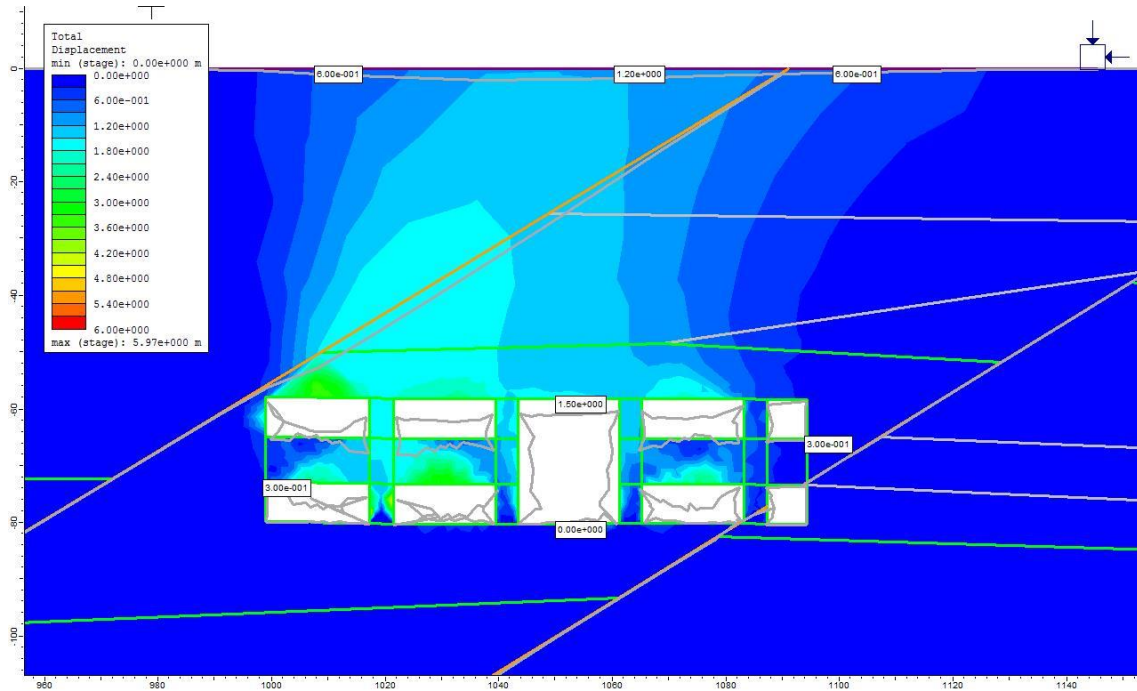


Fig. 44 – Colapso de las cámaras centrales en las plantas del nivel de explotación superior.

En este caso se puede observar como la subsidencia producida en la superficie del terreno se incrementa de manera notable hasta 1,20 m y se acerca a lo observado en la realidad. Otros aspectos a destacar de esta situación que se pueden observar en esta simulación es el hundimiento del techo de la galería colapsada que aumenta a hasta los 1,50 m y como los mayores desplazamientos se producen en la parte izquierda de la explotación debido a las perturbaciones producidas por las fallas.

A continuación, se proponen otros ejemplos con el fin de acercarse aún más a la subsidencia observada en la realidad.

El siguiente ejemplo expuesto para su análisis y que puede observarse en la siguiente imagen (fig. 45), es el del colapso de las dos galerías centrales de ambas plantas de explotación del nivel superior en lugar de solo la galería central expuesta en el ejemplo anterior.

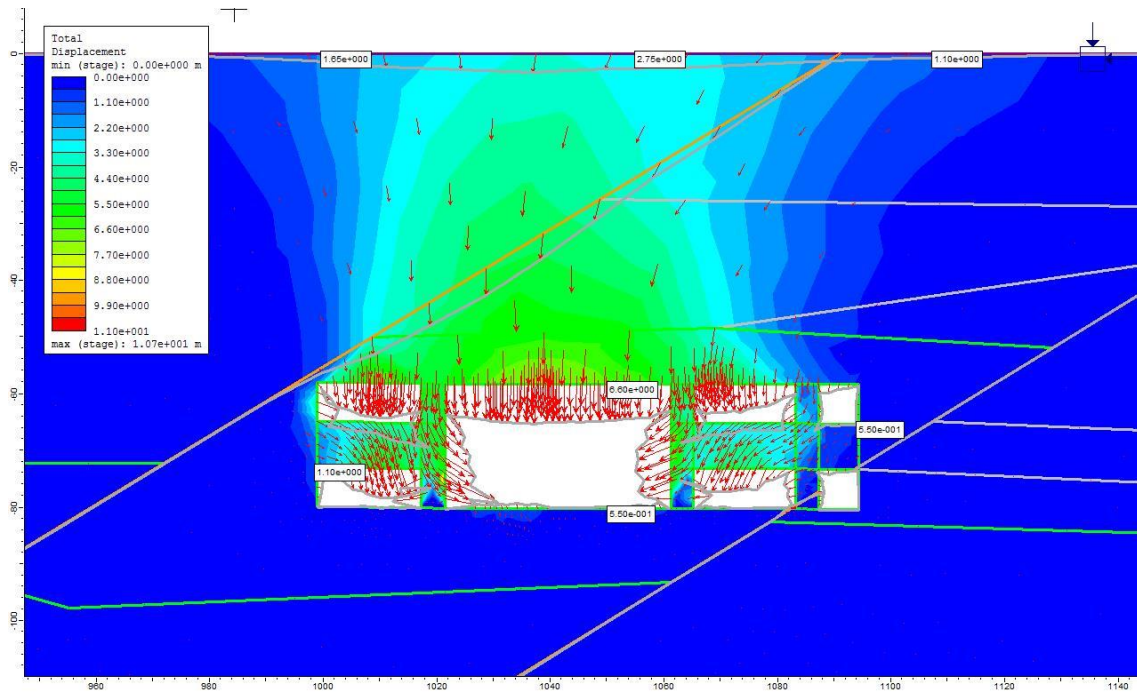


Fig. 45 – Colapso de las dos cámaras centrales en las plantas de explotación del nivel superior.

Como puede observarse, la subsidencia desarrollada en la superficie del terreno y que se ilustra en esta simulación, se ha incrementado de manera excesiva hasta los 2,75 m. Este valor nos indica que en el caso de que se haya producido un colapso de las galerías centrales de las dos plantas de explotación del nivel superior solo se habría producido en la galería central tanto de la primera como de la segunda planta de explotación, como se expuso en el anterior ejemplo.

Después de analizar este ejemplo, ya tenemos una idea de la situación en la que se debe de encontrar el nivel superior de explotación en la actualidad, ahora pasamos a ilustrar ejemplos en los que el nivel superior se mantiene como el analizado anteriormente, por lo que en el nivel donde se producen cambios y perturbaciones es en el nivel de explotación intermedio.

El siguiente ejemplo ilustrado en la siguiente imagen (fig. 46) refleja la situación en las que tanto las galerías centrales (incluyendo tanto la planta superior como la planta inferior) del primer nivel como del segundo nivel de explotación han colapsado (los pilares del resto de cámaras de explotación de los tres niveles, colapsaron con anterioridad).



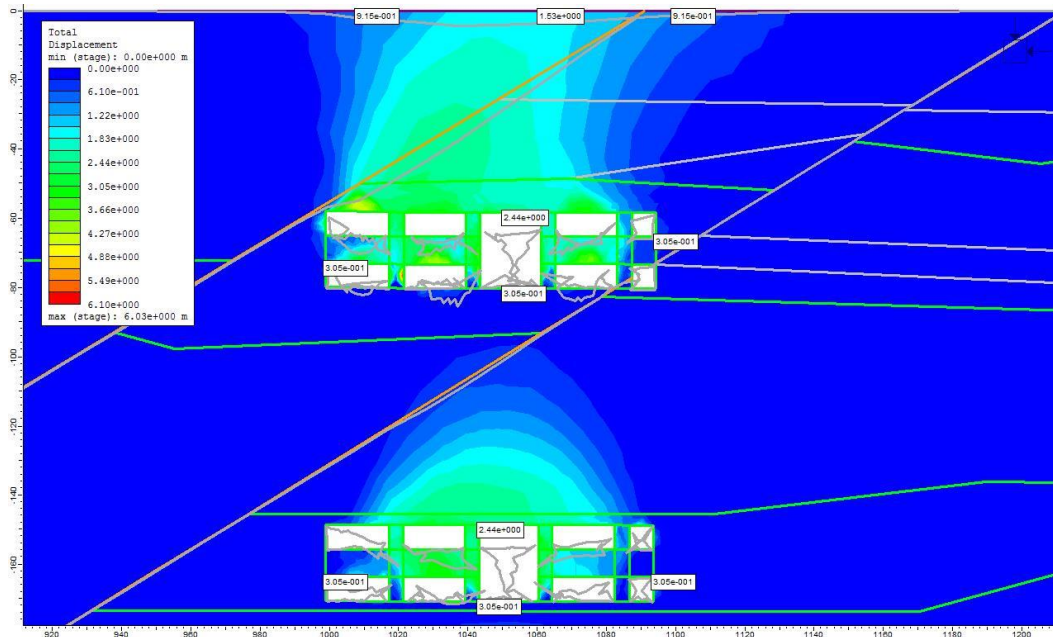


Fig. 46 – Colapso de las cámaras centrales en las plantas del primer y segundo nivel de explotación.

En este caso la subsidencia acontecida en la superficie del terreno se ha incrementado hasta el valor de 1,53 m por lo que se ha aproximado muy notablemente a lo observado en la realidad, en el año 2010 (1,60 m). Cabe destacar, que tanto en las cámaras del nivel superior como del nivel intermedio se ha producido un desplazamiento similar con un hundimiento del techo de las galerías centrales de 2,44 m, por lo que la deformación deberá de ser similar en ambos niveles de explotación.

Pasamos ahora a analizar en la siguiente imagen (fig. 47) la situación en la que aparte del colapso de las cavidades anteriores también ha colapsado una segunda galería (adyacente a la que colapso anteriormente) en el nivel intermedio (incluido el pilar que se sitúa entre ambas cámaras o cavidades).

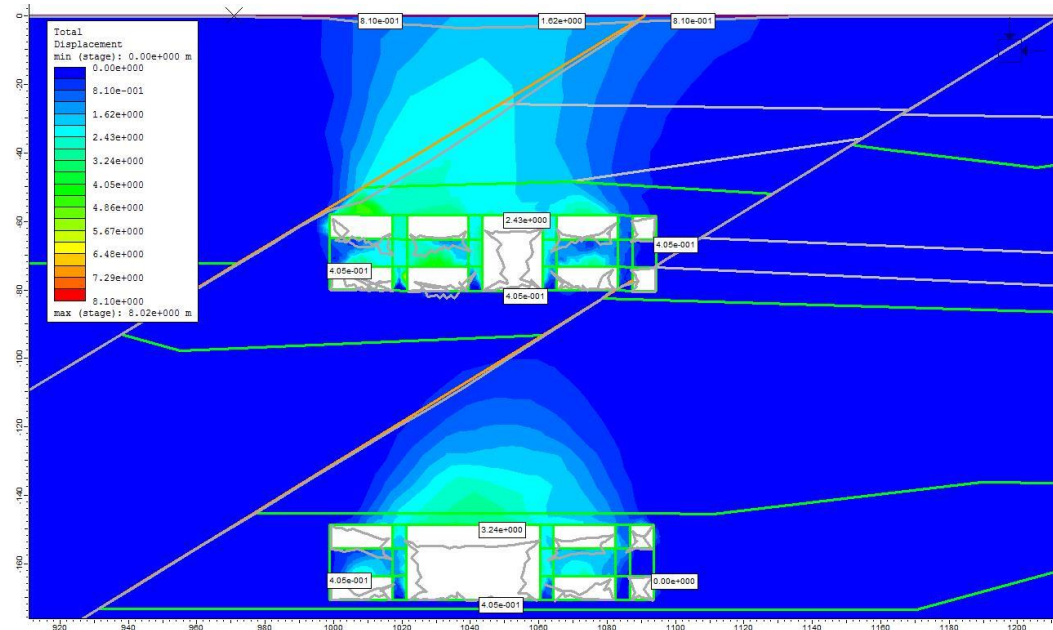


Fig. 47 – Colapso de la cámara central en las plantas del nivel de explotación superior y las dos cámaras centrales en las plantas del nivel intermedio.



Como se puede observar, esta situación es la que más se ajusta a la realidad observada en año 2010, ya que en este modelo se refleja una subsidencia máxima de 1,62 m (ligeramente superior al valor de 1,60 m medido en el año 2010) en la parte central de la explotación, de esta situación se puede obtener una idea aproximada del estado en el que se encuentran las galerías mineras del subsuelo del polígono de Lo Tacón.

Finalmente, Veamos ahora lo que sucede si aparte del colapso de las cámaras citadas en el ejemplo anterior, también colapsa la galería central del nivel inferior de explotación (los pilares ya colapsaron con anterioridad). Esta situación se ilustra en la siguiente imagen (fig. 48):

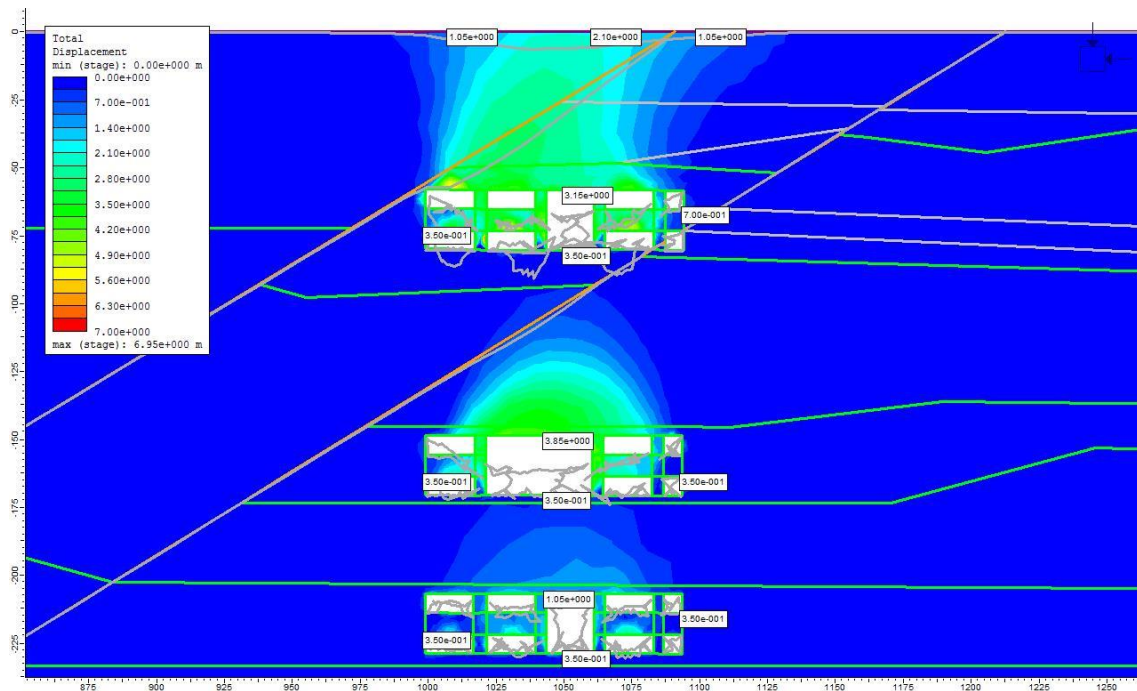


Fig. 48 – Colapso de la cámara central en las plantas del nivel de explotación superior, las dos cámaras centrales del nivel intermedio y la cámara central del nivel inferior.

Como se puede comprobar la subsidencia en la superficie del terreno se ha incrementado 0,48 m aproximadamente, hasta alcanzar un valor de 2,10 m. Estos valores nos están informando de la subsidencia que se puede llegar a producir en un futuro si no se toman medidas para prevenirla, otro aspecto a destacar y no menos importante, es que viendo estos modelos se puede afirmar que la subsidencia aún no ha finalizado, por lo que aún no se ha llegado a alcanzar el valor máximo que se puede llegar a obtener en situaciones en las que continúen los colapsos en las cámaras y galerías de los distintos niveles de explotación.

## 9. CONCLUSIONES

Después del análisis realizado con las distintas simulaciones expuestas, se pueden llegar a obtener varias conclusiones, la más importante (como se ha ilustrado a lo largo de este trabajo) puede ser el hecho de que la subsidencia aún no haya alcanzado el valor máximo y que por lo tanto en el presente y futuro pueda seguir aumentando (si no se toman medidas para paliar sus efectos) y con ello incrementándose la magnitud del problema aquí acontecido debido a los efectos causados por la subsidencia minera.

En la gráfica que se adjunta (fig. 49) se puede observar con claridad como el colapso de una cámara del nivel superior junto con el colapso de dos cámaras del nivel de explotación intermedio da un valor de subsidencia máxima de 1,62 m y por lo tanto es la situación que más se acerca a la situación que había en el año 2010 (1,60 m). Actualmente en el año 2019 es más que probable que la situación se haya ido agravando, por lo que es bastante posible que las galerías mineras de esta explotación se hayan ido deteriorando hasta alcanzar una situación como la simulada para el colapso de una cámara del nivel superior junto con dos cámaras del nivel intermedio más una cámara del nivel inferior (recordar que alrededor del 50% de los pilares que separan las cámaras de explotación entre sí, ya han colapsado con anterioridad en todas las plantas), esta situación refleja una subsidencia máxima de 2,10 m.

Esta situación podría estar empeorando por lo que nuevos colapsos podrían llegar a producirse en las galerías mineras causando el incremento de la subsidencia de la superficie del terreno (como queda reflejado en las situaciones simuladas para este trabajo) y provocando nuevos daños a las infraestructuras que en esta zona se encuentran, tales daños podrían ser por ejemplo la apertura de nuevas grietas y el colapso de algunas partes en las edificaciones o el aumento de la deformación en la calzada.

Viendo la gráfica adjunta también se puede llegar a la conclusión de que para que suceda una subsidencia de una magnitud tan elevada (como la observada en este polígono) es necesario que se haya producido el colapso de alguna o varias cámaras de explotación (es la situación que hace disparar la subsidencia hasta valores tan elevados), este hecho está advirtiéndolo de que la situación es muy delicada, ya que como se ha podido observar a lo largo de los ejemplos expuestos en este trabajo, el colapso de varias cámaras provocaría un hundimiento muy notable de la superficie del terreno.

Realizar una profunda investigación sobre como paralizar la subsidencia en esta zona es de vital importancia para tomar las decisiones correctas a la hora de actuar sobre este terreno. Las posibles soluciones que se podrían adoptar serían: rellenar con mortero (que se adhiera lo mejor posible al material aún no desprendido) los huecos creados, realizar inyecciones de lechada de cemento, etc.



Fig. 49 – Gráfica donde se ilustra el comparativo entre las distintas simulaciones realizadas con el programa phases2 para las diferentes situaciones expuestas y analizadas en este trabajo.

## 10. BIBLIOGRAFÍA

- F.T. Lee and J.F. Abel, Jr. – Geological Survey Circular 876. Subsidence From Underground Mining: Environmental Analysis and Planning Considerations. 1983.
- González de Vallejo, Luis Ignacio. Ingeniería Geológica. Luis Ortuño Abad, Mercedes Ferrer Gijón y Carlos Oteo Mazo. Pearson Educación, Madrid, 2002. ISBN: 84-205-3104-9.
- Manteca, J. I. y Ovejero, G. (1992): Los yacimientos Zn, Pb, Ag – Fe del distrito minero de la Unión – Cartagena. Bética Oriental. Recursos Minerales en España, ed. CSIC, 5: 1085-1102.
- Mapa geológico de España a escala 1:50.000, Hoja 977 Cartagena I.G.M.E.
- Roberto Tomás, Gerardo Herrera, José Delgado y Fernando Peña - Enseñanzas de las Ciencias de la Tierra, 2009. (17.3) 295-302.
- P. Ramírez, A. Ramírez Ortega y E. Chacón Oreja – Fundación Gómez-Pardo. Repercusiones en superficies de las explotaciones mineras subterráneas y medidas de deformaciones y tensiones en las minas subterráneas. Madrid 1980.
- Prokopovich, N.P. (1979), Genetic classification on land subsidence. En: Saxena, S.K. (ed.). Evaluation and prediction of subsidence. Proc. Of the Int. Cof., Civil Eng., New York, 389-399.
- T. Rodríguez Estrella, J.I. Manteca Martínez y C. García García, “Subsidencia minera y su posible relación con una falla sismotectónica en La Unión (Murcia-España)”, Información Tecnológica, 13(2): 53-60. Año 2002.
- Universidad de Oviedo – Estudio de la subsidencia en el polígono industrial Lo Tacón (La Unión – Murcia): Primer semestre de 2010.