



Facultad de Ciencias Geológicas

Universidad Complutense de Madrid

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN EXPLORACIÓN DE
HIDROCARBUROS Y RECURSOS MINERALES**

Curso 2022-2023

**Análisis de la sensibilidad del método gravimétrico
aplicado a almacenes de hidrógeno en la cuenca
Vasco-Cantábrica**

**Sensitivity analysis of the gravimetric method applied
to hydrogen storage in the Basque-Cantabrian basin**

Gonzalo Contreras Guijarro

TUTOR/ES DEL TRABAJO: Alfonso Muñoz Martín

Antonio José Olaiz Campos



Facultad de Ciencias Geológicas

Universidad Complutense de Madrid

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN EXPLORACIÓN DE
HIDROCARBUROS Y RECURSOS MINERALES**

Curso 2022-2023

**Análisis de la sensibilidad del método gravimétrico
aplicado a almacenes de hidrógeno en la cuenca
Vasco-Cantábrica**

**Sensitivity analysis of the gravimetric method applied
to hydrogen storage in the Basque-Cantabrian basin**

Gonzalo Contreras Guijarro

TUTOR/ES DEL TRABAJO: Alfonso Muñoz Martín

Antonio José Olaiz Campos

Fdo.:

Fdo.:



Facultad de Ciencias Geológicas

Universidad Complutense de Madrid

DECLARACIÓN DE NO PLAGIO

NOMBRE APELLIDO APELLIDO (autor/a): Gonzalo Contreras Guijarro

con NIF 51484048F, estudiante de Máster en Exploración de Hidrocarburos y Recursos Minerales, en la Facultad de Ciencias Geológicas de la Universidad Complutense de Madrid en el curso 2022 - 2023, como autor/a del trabajo de fin de máster titulado "Análisis de la sensibilidad del método gravimétrico aplicado a almacenes de hidrógeno en la cuenca Vasco-Cantábrica", y presentado para la obtención del título correspondiente, cuyo/s tutor/es es/son: Alfonso Muñoz Martín y Antonio José Olaiz Campos

DECLARO QUE: El trabajo de fin de máster que presento está elaborado por mí y es original. No copio, ni utilizo ideas, formulaciones, citas integrales e ilustraciones de cualquier obra, artículo, memoria, o documento (en versión impresa o electrónica), sin mencionar de forma clara y estricta su origen, tanto en el cuerpo del texto como en la bibliografía. Así mismo declaro que los datos son veraces y que no he hecho uso de información no autorizada de cualquier fuente escrita de otra persona o de cualquier otra fuente. De igual manera, soy plenamente consciente de que el hecho de no respetar estos extremos es objeto de sanciones universitarias y/o de otro orden.

En Madrid, a 30 de Mayo de 2023

Fdo.:



RESUMEN

El almacenamiento de hidrógeno puede ser clave para la transición ecológica y el abandono de los combustibles fósiles. Para ello, se ha repasado las características de almacenes, así como las características de las cavernas salinas, al ser el método más eficiente para el almacenaje de este gas. Por tanto, para definir y caracterizar dichos almacenes, se ha usado el método gravimétrico, analizando la sensibilidad del mismo ante diferentes estructuras y modelos de diapiro, aplicándolo finalmente a unos posibles almacenes, y el análisis de su resolución y definición con estaciones y modelo teóricos mediante microgravimetría en detalle de la zona.

Así pues, en este trabajo se ha realizado: Un estudio del hidrógeno, su almacenamiento y la elección de cavernas salinas como opción más viable. Una selección de la zona de trabajo, así como un breve análisis de la cuenca Vasco-Cantábrica. Selección de diapiros viables, modelización de los mismos siguiendo varios esquemas y observaciones, haciendo dos perfiles perpendiculares por cada uno. Cálculo de la respuesta y anomalía gravimétrica en todas las situaciones establecidas, con su análisis correspondiente. Modelización de un posible almacén basado en el de Clemens, cálculo de su respuesta y de los gradientes horizontal y vertical, con estudio de la sensibilidad del método.

ÍNDICE

1. Introducción	1
1.1. Marco actual	1
1.2. Propiedades del Hidrógeno	2
1.3. Características del almacenamiento geológico de Hidrógeno	3
1.3.1. Acuíferos	4
1.3.2. Antiguos reservorios de gas y petróleo.....	4
1.3.3. Cavidades salinas	4
2. Objetivos	6
3. Marco teórico	7
3.1. Producción del Hidrógeno.....	7
3.1.1. Hidrógeno de Hidrocarburos.....	7
3.1.2. Hidrógeno del agua	7
3.1.3. Otros procesos	8
3.2. Sensibilidad del método gravimétrico.....	8
3.3. Almacén de Hidrógeno	9
3.4. Formas de almacenamiento de la molécula de H. H ₂ puro e Hidrogeno + Metano.....	11



3.5.	Diapirismo. Características y heterogeneidades	12
4.	Contexto Geológico	15
4.1.	Estratigrafía y Sedimentología	16
4.2.	Evolución de la Cuenca	17
4.3.	Salinas de Araña	18
4.4.	Diapiro de Maeztu.....	21
5.	Metodología y trabajo realizado.....	23
5.1.	Selección de la zona de estudio	23
5.2.	Datos sísmicos usados.....	23
5.3.	Modelización.....	25
5.3.1.	Base de datos	25
5.4.	Valores de densidad	26
5.4.1.	Construcción del modelo base	27
5.4.2.	Obtención de la respuesta gravimétrica.....	28
5.4.3.	Modelización en 2+1/2 D y dimensiones transversales	29
5.4.4.	Variaciones sobre el modelo base.....	29
6.	Resultados y discusión	34
6.1.	Resultados de la modelización de Araña	34
6.2.	Resultados de la modelización de Maeztu	39
6.3.	Anomalías de los Almacenes de Hidrógeno.....	43
7.	Conclusiones	46
8.	Bibliografía	47

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Marco actual

Como marcaba en su momento la antropóloga Leslie White en los años 40: “En igualdad de circunstancias, el grado de desarrollo cultural es una función de la cantidad de energía aprovechada por persona y año”. Y es que los conceptos de aprovechamiento de la energía, y su uso, van acompañados del desarrollo de la sociedad. Desde los primeros momentos en los que se usaba la simple fuerza humana y animal, la sociedad ha ido evolucionando en paralelo a las formas de obtener energía, y de aumentar la eficacia con la que se usa. Los avances tecnológicos han permitido el desarrollo de nuevas formas de producir y emplear la energía, y estas a su vez han permitido el desarrollo de nuevas técnicas (Aguado Molina et al., 2021). Se trata por tanto de un ciclo de retroalimentación que impulsa las sociedades hacia el avance (Smil, 2018).

Hoy día, el aumento de la demanda energética implica un mayor consumo de los combustibles fósiles, pues son las principales fuentes de energía que llevamos usando desde el siglo XIX. Este aumento en las emisiones de CO₂ es por tanto una de las principales preocupaciones de nuestro tiempo, al ser uno de los principales factores del calentamiento global (Díaz Cordero, 2012). Y es que, en la pasada Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, celebrada en Glasgow en 2021, se estableció el abandono, o al menos la reducción gradual del carbón como fuente de energía, así como un objetivo de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, y de conseguir unas tasa de emisiones cero a mediados de siglo (Arora & Mishra, 2021).

Todo esto pone en el centro de la actual crisis en las energías renovables, y en la capacidad de las mismas de servir como la nueva principal fuente de energía para las sociedades modernas. Pero para eso, ha de solventarse uno de los grandes problemas de las actuales renovables, como son la solar y la eólica: las fluctuaciones en la producción (Crotogino, 2016; Blanco & Faaij, 2018; Andersson & Grönkvist, 2019). Para ello, el foco principal se coloca en el almacenamiento de la electricidad generada en periodos de alta producción, para de este modo satisfacer la demanda en periodos donde el rendimiento sea menor (Ozarslan, 2012). Con esto en mente, se necesita un método para almacenar la electricidad y no solo producirla en función de la demanda, es decir, una forma de almacenamiento de la misma, para así no depender de las variabilidades del tiempo meteorológico, hora del día, estación del año, entre muchas otras. También es necesario que permita su extracción y uso en periodos cortos de tiempo (escala de pocas o menos de una hora), con gran capacidad de almacenaje para permanecer grandes periodos de tiempo (escala de meses) usándose sus reservas (Figura 1) (Morante et al., 2020).

Para cumplir estos requisitos, la única solución sería recurrir al almacenamiento denominado *Power to Gas*, en los que la electricidad se utiliza para realizar la conversión de diversas sustancias a estado gaseoso (Figura 1). De este modo pasamos de una energía eléctrica a una química. Uno de los más utilizados es el hidrógeno, porque además que se produce fácilmente, permite el almacenamiento de grandes cantidades y el uso de la red de gaseoductos propia, sin alterar los mismos (Morante et al., 2020). Otra ventaja del H₂ es que es utilizable directamente como combustible; reciclable, pues al oxidarse da agua, que puede volver al proceso de electrolisis o liberarse a la atmósfera; almacenable y limpio. (Rosen & Koohi-Fayegh, 2016). Es por tanto remarcable la función del hidrógeno como un **vector energético**, una forma de almacenar la electricidad mediante una transformación química, para posteriormente revertir el proceso y obtener energía, pudiendo ser almacenado en esos estadios intermedios en forma de gas (González García-Conde, 2010; Crowther, 2015; Rosen & Koohi-Fayegh, 2016; Morante et al., 2020).

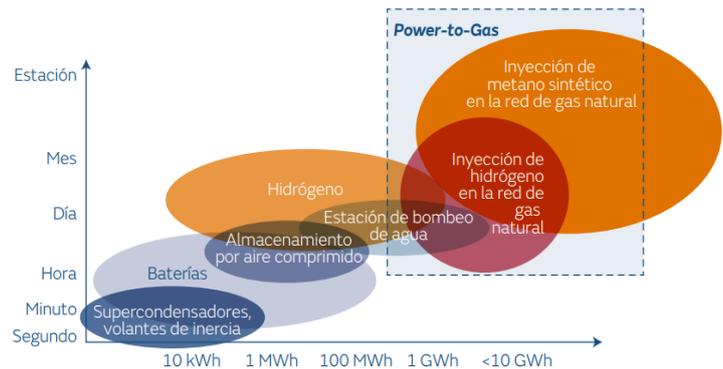


Figura 1 Comparación en la capacidad de almacenamiento entre diferentes formas de almacenamiento de energía. (Morante et al.,

1.2. Propiedades del Hidrógeno

El Hidrogeno es el elemento más común en el universo. Esto se debe a su sencillez pues solo posee un protón y un electrón, no teniendo ningún neutrón en su isótopo más común. Pese a ser tan frecuente, este tiende a aparecer como parte de moléculas y compuestos junto con otros elementos, por lo que es necesario algunos procesos para separarlo y aislarlo en forma de la molécula H₂. Es la simpleza del hidrógeno la causa de algunos de sus principales problemas a la hora de ser almacenado. El peso molecular del hidrógeno es muy pequeño, así como el diámetro de la molécula. El resultado de este bajo peso molecular hace que la masa por volumen sea excesivamente baja comparado con otros combustibles, y, por tanto, aunque la energía por masa sea muy alta, la energía producida en la oxidación por litro es muy baja en mismas condiciones de presión y temperatura.

Para aumentar la eficiencia por unidad de volumen, el hidrógeno puede usarse en forma líquida. Aunque la densidad del mismo sigue siendo baja, la reducción del volumen es muy significativa, siendo esta de una proporción 848 veces menor (Aguado Molina et al., 2021). Para conseguir un estado líquido, es necesario alcanzar temperaturas de 33,2 K, o el

equivalente de los -240 °C, con unas presiones de 13,8 bar. Esta es la temperatura mínima en la que se alcanza el estado líquido, aunque aumente la presión (punto crítico) (Figura 2)

Esta muy baja temperatura implica que albergar el hidrógeno en estado líquido es una forma ineficaz para usarse como vector energético, pues requiere demasiada energía llevarlo a esta fase, así como mantenerlo, pues es muy volátil.

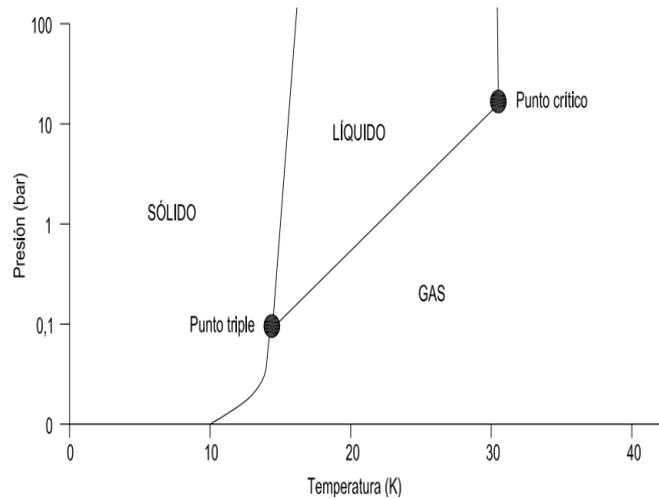
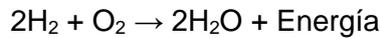


Figura 2 Diagrama de fases del Hidrógeno (Aguado Molina et al., 2021).

En cuanto a la energía que produce y que consume la producción y oxidación del hidrógeno, nos encontramos que el proceso posee un déficit energético. Pese a que existen diversas formas de separar el H del resto de la molécula, estos procesos requieren una energía mayor que la que se libera durante la reacción de oxidación. Esta diferencia es lo suficientemente pequeña como para que pueda usarse como forma de acumular energía.



El resultado de la oxidación del hidrógeno en contacto con el oxígeno es vapor de agua. Esta liberación de energía que se genera es muy alta por unidad de masa, superando con creces la de otros combustibles, siendo más o menos unas dos veces y media mayor que productos derivados de los hidrocarburos. Un kg de hidrógeno produce cerca de 120 MJ, mientras que la gasolina está próxima a los 45 MJ como resultado de su combustión. El producto además no genera CO₂, por lo que es una reacción limpia, y las emisiones dependerán de como se ha producido el hidrógeno principalmente (Aguado Molina et al., 2021).

1.3. Características del almacenamiento geológico de Hidrógeno

El almacenamiento a gran escala de hidrógeno solo es viable en almacenes geológicos (Figura 3), pues estos permiten albergar más cantidad de volumen, varios ordenes de magnitud por encima que los compartimentos y tanques que se puedan fabricar. Existen por tanto ciertas diferencias en la búsqueda de un almacenamiento de hidrógeno, debido a sus propiedades, respecto a otros gases, como CO₂ o gas natural, que limitan en cierta medida las opciones para albergar este combustible a gran escala. Debido a este bajo peso molecular y el tamaño tan reducido de la molécula, es necesario que el almacén tenga un sello lo

suficientemente impermeable, de elevado espesor, y tan poca porosidad como sea posible, para que así el escape de hidrógeno sea mínimo. También será necesario que el almacén sea tanto poroso como permeable, pues al inyectar el hidrogeno se pueden producir fenómenos de digitación del gas (*gas fingering*), así como un escape hacia la superficie si la inyección del combustible es demasiado elevada (Bai et al., 2014).

1.3.1. Acuíferos

El uso de acuíferos para el almacenamiento suele ser común desde mediados del siglo pasado (Kruck et al., 2013). Se usa una roca porosa y permeable, con los poros rellenos de agua (con distintos grados de salinidad), y que están sellados por una roca impermeable que consigue retener en trampas el fluido. Se ha de estudiar bien el sello y la trampa, para de este modo comprobar que no existen fugas

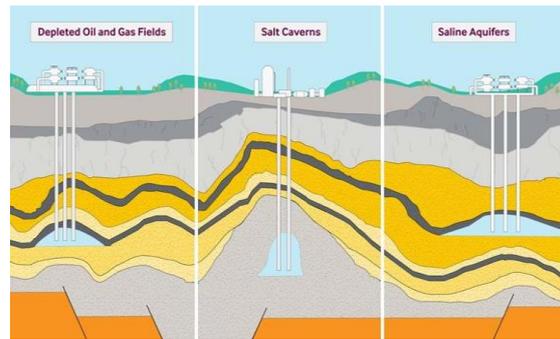


Figura 3 Tipos de almacén de gas, en este caso aplicados al Hidrógeno (RPS, 2023).

importantes. Tras este extenso análisis, se bombea el H₂ a través de sondeos, desplazando el agua o la salmuera hacia abajo, ocupando gran parte de los poros. Debido a este empuje del agua, se ha de monitorear la presión a la que se inyecta, para evitar riesgos asociados como son la sismicidad inducida. Para este almacén, se tendrá que tener en cuenta, además de la búsqueda y estudio de este emplazamiento, la capacidad de reacción del hidrógeno con la roca, así como con bacterias y microorganismos (Kruck et al., 2013; Morante et al., 2020; Crotagino, 2016).

1.3.2. Antiguos reservorios de gas y petróleo

El uso de antiguos reservorios es una medida usualmente empleada en la inyección de gases en el subsuelo. Sus principios básicos son idénticos a los del acuífero, destacando que para estos, el estudio de la trampa y el almacén ya se ha realizado, e incluso pueden mantener parte de la infraestructura. Así por tanto, los costes son menores que los del acuífero, siendo una opción muy viable. Para este caso, se han de tener en cuenta también la capacidad del hidrógeno de reaccionar con la roca, así como la actividad de microorganismos. Cabe destacar que se ha de tener en mente la posibilidad de contaminación del gas con hidrocarburos que no hayan sido extraídos (Kruck et al., 2013; Crotagino, 2016; Morante et al., 2020).

1.3.3. Cavidades salinas

Las cavernas o cavidades salinas son un tipo de almacén, generado artificialmente. Estas permiten el almacenamiento de gas en una galería de grandes dimensiones, normalmente de

forma ovalada, por lo que no se ha de contar con una porosidad de la roca almacén para el cálculo volumétrico de las reservas. Este almacén se genera al introducir agua subsaturada en sales en el diapiro, por lo que se produce una disolución del mismo, quedando una cavidad potencial de ser rellenada por este gas (Duffy et al., 2023). Para este tipo de almacenamiento es necesario utilizar diapiros de grandes dimensiones, con una alta homogeneidad composicional, así como muy baja porosidad, permeabilidad y reactividad con el hidrógeno. De este modo, el diapiro funciona como almacén y sello al mismo tiempo. Se ha de tener en cuenta por tanto, la capacidad del diapiro como sello, así como sus dimensiones. Para asegurar todas estas características es necesario realizar estudios detallados, integrando información geofísica (sísmica, gravimetría y magnetismo) y sondeos, para delimitar las dimensiones y forma de los diapiros, y posteriormente un estudio de ingeniería para el diseño de la caverna (Kruck et al., 2013; Bai, et al., 2014; Crotagino, 2016; Tarkowski & Czpowski, 2018; Tarkowski, 2019; Morante et al., 2020).

Estas características numeradas en la Tabla 1 marcan como almacén con mayores ventajas las cavernas salinas. Pese a que los campos de hidrocarburos facilitan el trabajo de exploración y pueden abaratar los costes, la capacidad de la sal de impedir fugas y no reaccionar la hace la mejor opción. En cuanto al ratio de gas respecto al denominado *gas colchón (cushion gas)*, implica que para mantener unas presiones estables en la caverna, no puede retirarse todo el gas, dejando, en este caso, un tercio del mismo, mejorando la mitad de gas colchón de los otros almacenes. Junto con la necesidad de que la extracción sea rápida y permita satisfacer la demanda en momentos críticos, la experiencia de uso, y el orden de magnitud mayor en la retribución, marcan como principal almacén las cavernas de sal. Son estos los motivos por los que en este trabajo se estudiarán diapiros salinos teniendo en mente posibles almacenes de H₂.

Tabla 1 Comparación de los distintos almacenes para Hidrógeno (modificado de (Crotagino, 2016)).

	Acuífero	Reservorio de hidrocarburos explotado	Caverna de sal
Uso de espacio explotado	No	Sí	No, salvo en producción de salmuera
Exploración a desarrollar	Alto	Bajo	Medio
Frecuencia anual de retribución	Bajo (1-2)	Bajo (1-2)	Alto (10-12)
Tasa de inyección/extracción	Bajo	Bajo	Alto
Ratio de la capacidad uso/gas colchón	1/1	1/1	2/1
Almacén previo de hidrógeno en la industria	No	No	Sí

2. OBJETIVOS

Para la realización de este trabajo, se ha establecido el almacenamiento de hidrogeno como primer y principal tema, siendo una materia actual, con importantes avances y proyectos en los últimos años, al ser una de las alternativas más atractivas de energía limpia y almacenable respecto a la disminución del uso de combustibles fósiles. Por otra parte, el uso de métodos geofísicos para la exploración del subsuelo permite generar un estudio previo para confirmar la viabilidad de proyectos como un posible almacén.

El objetivo principal de este trabajo es el estudio de la sensibilidad del método gravimétrico en la caracterización de almacenes de H₂ en diapiros salinos. Para ello se han seleccionado los diapiros de Araña y Maeztu en la cuenca Vasco-Cantábrica. Entre los parámetros analizados se han incluido posibles variaciones en la homogeneidad y composición del diapiro, mediante la realización de diferentes modelos en 2 + 1/2D. Adicionalmente se ha incluido la presencia de un almacén de H₂ tipo, para analizar su detectabilidad. Los resultados obtenidos permiten discutir la sensibilidad del método gravimétrico para diferentes posibles almacenes de hidrógeno. Para llegar a estos resultados, en el trabajo se plantean varios los objetivos, que culminan en los resultados finales, siendo estos:

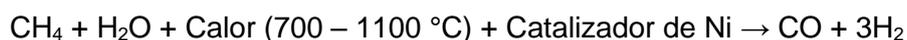
- Estudio general de las propiedades del hidrógeno y su almacenamiento. Búsqueda de características de posibles almacenes homólogos.
- Selección de zona de estudio, así como los posibles diapiros que sirvan de almacenes de hidrógeno.
- Generación de modelos de densidad en profundidad, basados en interpretaciones de sísmica previos, así como un control geológico de la cuenca y sondeos próximos a los posibles almacenes.
- Cálculo de la respuesta gravimétrica con estaciones teóricas sobre dos perfiles perpendiculares del diapiro, con correcciones de topografía.
- Variaciones de los modelos base en función de las heterogeneidades y estructuras dentro de los diapiros.
- Comparación de todas las respuestas gravimétricas generadas, junto con la ubicación de un posible almacén si fuese posible y la señal gravimétrica que lo marca.
- Análisis de los resultados obtenidos, con conclusiones finales de la viabilidad de un proyecto.

3. MARCO TEÓRICO

3.1. Producción del Hidrógeno

3.1.1. Hidrógeno de Hidrocarburos

La producción de H₂ a partir de hidrocarburos como el gas natural genera como subproducto CO₂. Esto implica que no sea una energía totalmente limpia y sostenible si se obtiene de esta forma.



Por tanto, se genera en estos dos ciclos una producción adicional de hidrógeno (González García-Conde, 2010). Esta alternativa tiende a ser interesante, pues ya existen plantas que lo implementan; el metano posee un bajo precio y existen reservas mundiales de este. Para realizar estos ciclos, se necesita producir calor, normalmente de la quema de más gas natural, y posteriormente se necesitan procesos de purificado del metano, requiriendo más energía y por tanto, más emisiones. Las contaminación del aire que producen es demasiado elevada (en torno a 10 toneladas de dióxido de carbono por tonelada de hidrógeno) (Morante et al., 2020). Es necesario por tanto procesos de captura de CO₂. Este método solo tiene sentido si se requiere por tanto de hidrógeno en concreto, pues siempre es más eficaz utilizar el combustible de origen. Pese a esto, es el método más usado (Aguado Molina et al., 2021).

Otra de las opciones en desarrollo es la pirólisis del gas natural, sometiéndolo a muy altas temperaturas, para liberar los átomos de H y que quede como resultado carbón sólido. Al no necesitar oxígeno ni agua, no produce CO₂. El alto coste del calor que requiere, el residuo del carbón sin demasiados usos más allá de la quema, y las sales de metales necesarias en el proceso, lo hace demasiado costoso, siendo aún tecnologías en desarrollo (Andersson & Grönkvist, 2019).

3.1.2. Hidrógeno del agua

Se basan todos estos métodos en la generación del hidrógeno separándola del agua de diferentes formas, la más convencional de ellas es la electrolisis, es decir, haciendo pasar corriente eléctrica a través del agua para separarla en sus dos componentes. Es una forma sostenible y limpia de obtener este combustible, siempre y cuando el origen de la electricidad usada sea también limpio. Sin embargo, los costes son mucho mayores, pues la electricidad usada en la rotura de la molécula de agua es mayor en comparación a otros métodos. Para llegar a no depender de los combustibles fósiles, es preferible que la electricidad usada provenga de energías renovables, quedando así como la alternativa más limpia para producir hidrógeno (Aguado Molina et al., 2021).

3.1.3. Otros procesos

Mediante gasificación de materia orgánica, tanto residuos, como carbón y biomasa. Estos procesos se basan en aplicar altas temperaturas para pasar a fase gas los compuestos orgánicos, mezclando CO_2 , H_2 y CO . Una vez hecho, se separan para obtener el hidrógeno. Es necesario el oxígeno o el agua para que se produzca la oxidación. El gasificado de carbón es el segundo método más usado para la obtención de H_2 , pues es China su principal productor (Morante et al., 2020).

3.2. Sensibilidad del método gravimétrico

Para realizar el estudio de diferentes almacenes en diapiros de la cuenca Vasco-Cantábrica, se utilizará principalmente el método gravimétrico. Con este, se busca la medida de la variación de densidad bajo superficie. Esta variación de la densidad genera una anomalía gravimétrica, un valor de gravedad diferente al valor del medio que debería de tener según los modelos. Esta anomalía puede ser positiva o negativa, siendo en nuestros casos valores negativos, pues las rocas almacén son sales como halita y yeso, con valores de densidad más bajos a la roca de su entorno, así como a los valores de densidad media de la corteza.

En este trabajo no se ha realizado adquisición de datos, sino que se han utilizado valores de densidad para las diferentes litologías basadas en estudios anteriores, y en relaciones empíricas entre valores de velocidad sísmica y densidad. Con estos datos, y utilizando las geometrías de las estructuras propuestas por diferentes autores, se ha calculado la señal gravimétrica a lo largo de diferentes secciones. Se trata, por tanto, de una modelización directa, donde proponemos diferentes hipótesis con justificación geológica y calculamos su respuesta. La generación del modelo sintético usando cuerpos geológicos con geometrías sencillas para dar una señal está basada en los conocimientos geológicos de la zona, así como la bibliografía adjunta al trabajo (Pinto et al., 1998; Pinto et al., 2005).

Para establecer la sensibilidad del método gravimétrico, se realizará un único modelo general para cada sección del diapiro. Una vez reproducidas dichas secciones en el programa de modelización, basadas siempre en geometría y datos reales, se establecerán valores diferentes de densidad dentro del diapiro, separados por estructuras o en el cuerpo en general, teniendo en cuenta siempre valores en un rango factible, acorde con datos medidos en otros trabajos, variando así la densidad en función de las heterogeneidades de la sal, lo cual hará cambiará de uno a otro la señal hipotética de la estructura. Así pues, añadiendo más o menos heterogeneidad, se calculará la anomalía que este cuerpo genera en estos diferentes casos y se comparará en el análisis de los resultados.

De este modo, con el software usado basado en los algoritmos y métodos descritos por Hubbert (1948), Talwani et al. (1959) y Won & Bevis (1987), con modelos basados en datos

de trabajos anteriores, principalmente los modelos de Frankovic (2010), Frankovic et al. (2016) y Cámara (2017), podremos analizar la sensibilidad del método para caracterizar este tipo de almacenes, y por tanto su aplicabilidad.

3.3. Almacén de Hidrógeno

Una vez establecido que los almacenamientos subterráneos de H₂ son los únicos con posibilidades reales de almacenamiento a gran escala, así como las cavernas de sal la mejor alternativa de almacenar este combustible en el subsuelo (Tabla 1 y apartado 1.3.3.), resulta necesario definir las características que deben tener estos almacenes (dimensiones, forma y capacidad), y de si estas se cumplen en los diapiros en estudio.

Las cavernas salinas son la mejor solución, pues al no ser un sistema poroso, no sufre problemas cuando la tasa de inyección y extracción es demasiado alta, permitiendo un uso más flexible del almacén, así como la baja reactividad y buen sello de la sal (Kruck et al., 2013; Bai et al., 2014; Crotochino, 2016; Tarkowski & Czpowski, 2018; Morante et al., 2020; Caglayan et al., 2020). Estos motivos son los principales por los que se ha optado por esta opción, a pesar de que el almacén se ha de diseñar y crear.

Las características que deben cumplir los diapiros para que pueda construirse un almacén de hidrógeno en forma de caverna, son (Crotochino et al., 2010; Ozarlan, 2012; Bai et al., 2014; Tarkowski, 2019; Caglayan et al., 2020):

- Profundidad, pues han de ser lo suficientemente profundos para mantener las condiciones de seguridad y evitar escapes.
- Diámetro y dimensiones, pues es necesario que el almacén quepa, con un margen de una seguridad dado por el grosor de las paredes que lo rodean.
- Suficiente homogeneidad, ya que la presencia de pliegues, diferentes unidades litológicas y núcleos de roca alógena pueden suponer un peligro para la integridad del almacén.
- Composición que asegure mínimas reacciones de la roca caja con el hidrógeno.
- Baja permeabilidad asegurada, evitando zonas de debilidad y elevada conductividad como fallas

Hoy día, los almacenes activos de hidrogeno son todos en cavidades de sal, existiendo en los Estados Unidos (Clemens, Moss Bluff) y Reino unido (Teesside), siendo este último un complejo de tres cavernas que actúan como almacén. Todos estos proyectos están a una profundidad mínima de 350-450 metros (Teesside). Poseen una forma elíptica, siendo esta la más eficaz para el almacenaje y de estabilidad del mismo (Figura 4) (Caglayan et al., 2020;

Tarkowski, 2019). Algunos de estos almacenes llevan funcionando desde los años 70s hasta día de hoy.

Se tomará como ejemplo el almacén de Clemens, que posee la máxima capacidad de almacenaje (580.000 m³). Este se encuentra a algo más de 900 m de profundidad, con el techo a 850 m respecto a la superficie, un diámetro y una altura de 49 y 300 metros respectivamente. Está conectada a la planta de refinería cercana y a los oleoductos que transportan H₂ (Tarkowski, 2019). Estas dimensiones serán las que se usarán de referencia para la simulación de un posible almacén, pues parecen ser óptimas y sirven como almacenamiento a gran escala, pues cumple los requisitos definidos por Caglayan et al. (2020) que consisten en unas profundidades entre 500 y 2000 m con un espesor mínimo de sal alrededor de 200 m.

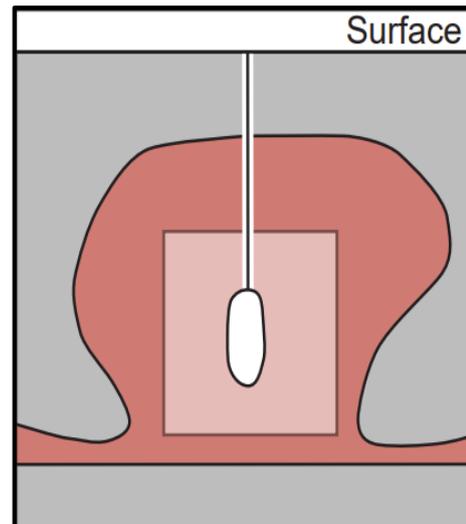


Figura 4 Esquema de la caverna en un domo salino. Modificado de (Duffy et al., 2023)

Para tener en cuenta las características del domo, se ha usado los criterios de Tarkowski & Czapowski (2018), en los que plantean posibles almacenamientos en domos salinos en Polonia, así como características de Crotofino (2016) y Ozarlan (2012) y de los almacenes en funcionamiento descritos en Tarkowski (2019). Los requisitos a cumplir para el principal realizar el primer descarte de estructuras son la profundidad del techo del mismo, no debiendo superar el kilómetro. El espesor del domo tendrá que superar los 1000 metros, siendo esta una característica que suelen cumplir la mayoría, pero es importante para dejar claro el criterio de cuáles pueden ser objeto de este primer estudio. A continuación se ha de tener en cuenta su extensión y espesor, pues los diapiros grandes podrán albergar varios almacenes si es necesario. Para conocer su geometría y características (Tarkowski & Czapowski, 2018) es necesario realizar estudios sísmicos de buena calidad, análisis de heterogeneidades y una buena caracterización geológica y geofísica alrededor de los diapiros.

A la hora del diseño, ya se ha establecido como ejemplo a seguir el caso de Clemens, pero existen otras formas de almacén. Y es que a mayores profundidades, pasado el kilómetro de profundidad, la forma de cápsula respecto a la forma elipsoidal más alargada, es más estable y segura. Por otra parte, las paredes de sal han de ser lo suficientemente gruesas para que no existan filtraciones ni otra clase de problemas de estabilidad. Se toma por tanto un techo mínimo de espesor un 75% del diámetro, y una base de al menos el 25% del diámetro del diapiro (Caglayan et al., 2020).

3.4. Formas de almacenamiento de la molécula de H₂ puro e Hidrogeno + Metano

Cuando uno piensa en el almacenamiento de hidrógeno, se simplifica a las reservas de hidrógeno puro. Y pese a que esta es la opción más viable a futuro, junto con el almacenamiento con gas natural, existen gran cantidad de formas actualmente en desarrollo, de conseguir una mayor eficiencia al almacenar el hidrogeno ligado a otros elementos y moléculas, para así solucionar el problema de la baja masa volumétrica de este combustible (Bai et al., 2014).

El almacenaje de hidrógeno puro es el único método que actualmente se utiliza en la industria. De estos métodos, tenemos principalmente el hidrogeno en forma de gas comprimido y líquido. Ya se ha mencionado las ventajas económicas y simpleza del hidrógeno gas en la introducción, respecto a los altos costes del hidrógeno líquido, y de como este no se puede acumular en las cavernas salinas ni depósitos geológicos, pues requiere de temperaturas extremadamente bajas. En cuanto a los almacenes, para tener cantidades suficientes, es necesario que sea almacenamiento geológico y no en tanques, pues los costes son mucho menores (González García-Conde, 2010; Andersson & Grönkvist, 2019).

En cuanto a compuestos para reducir los costes de almacén, varias alternativas están surgiendo. Muchas de estas implican temperaturas muy bajas o compuestos con elementos demasiado caros, que terminan por encarecer el almacenaje, como es el caso de la adsorción, que requiere Nitrógeno o compuestos de carbono y temperaturas bajo cero. Sin embargo existen algunas posibilidades más complejas. Los hidruros metálicos, pese a que se requiere de energía para separarlos, ya sea calor o hidrólisis, son capaces de aumentar la densidad de las reservas al ser muchísimo más densos (Andersson & Grönkvist, 2019). Entre estos, el hidruro de aluminio AlH₃ y el hidruro de magnesio MgH₂ son los más favorables. El hidruro de aluminio, a pesar que requiere poca temperatura para liberar el hidrogeno, es un proceso irreversible y queda un residuo. Por otra parte, el de magnesio requiere temperaturas muy elevadas para liberar el H₂ (Andersson & Grönkvist, 2019).

Así pues, los hidruros químicos suelen ser la mejor alternativa, siendo metanol y amoniaco los principales, pues son los más eficientes si no se dispone de una estructura geológica que abarate los costes (Andersson & Grönkvist, 2019) . Con todos estos argumentos, se opta por tanto por el estudio geológico de domos salinos, antiguos campos de gas natural o acuíferos, pues será la mejor opción, más barata y que consuma menos recursos y energía (Aguado Molina et al., 2021).

Una posible vía de estudio podría ser la implementación de algunos de estos complejos a los almacenes a gran escala, para así conseguir eficiencias de energía mucho mayores, facilitando y abaratando los costes de la energía.

Así pues, aunque estas complejas nuevas formas de almacenamiento dirijan la mirada a un futuro con menor combustión de hidrocarburos, se ha de echar la vista al pasado para entender como se ha almacenado el hidrógeno estas últimas décadas. Y es que, en un primer momento, los almacenes se rellenaban con un porcentaje de gas natural muy alto, teniendo un 50% de metano. Esta práctica se usaba para que sirviesen como almacén de gas natural. Son el almacén de Teesside en UK y el de Clemens Dome en USA los primeros en conseguir un almacenamiento de hidrógeno al 95% aproximadamente (Bai et al., 2014; Tarkowski, 2019). Pese a que no es el cambio drástico de reducción de emisiones y el paso a una producción de hidrogeno verde que se intenta justificar a lo largo de este trabajo, Martínez del Olmo (2021) propone en varias ocasiones un almacenamiento conjunto de gas natural con H₂, con unas proporciones de 1:4 respectivamente. Así, el techo y la mayoría de la cavidad estaría ocupada de hidrógeno, mientras que la parte inferior mantiene el más denso metano. Por tanto, se podrá utilizar cualquier alternativa dependiendo de lo que se requiera, y con estos porcentajes, puede distribuirse por la red nacional de gaseoductos.

3.5. Diapirismo. Características y heterogeneidades

El diapirismo es un fenómeno reológico fruto de las propiedades de una roca poco densa y dúctil en comparación a su entorno, y que se ve sometida a presiones que terminan por provocar su ascenso atravesando el medio más denso. Este fenómeno se suele dar en rocas evaporíticas poco densas, como es la halita o los yesos (Figura 5). Las características de baja densidad y comportamiento dúctil, las permite fluir con mayor facilidad que otras rocas.

Cuando estas litologías son sometidas a esfuerzos litostáticos y/o tectónicos, como es el caso de la cuenca mesozoica de la zona de estudio (Jackson & Talbot, 1989; Martínez del Olmo et al., 2015), tiendan a fluir y ascender, atravesando las unidades litológicas suprayacentes. El ascenso se suele producir a través de zonas de debilidad si las hay, como son las fallas previas (Frankovic, 2010).

Todas estas rocas evaporíticas que componen gran parte del diapiro son producto de la evaporación de agua marina en ambientes de Sabkha, con mayor o menor influencia también de agua meteórica (Jackson & Lewis, 2012). La sal formada en estos periodos, gracias a sus múltiples características ya descritas anteriormente, hace la función de sello y a la vez de almacén si se crea una cavidad dentro del depósito.

Sin embargo, los diapiros no son una simple masa de rocas evaporíticas, normalmente halita, pues poseen heterogeneidades y estructuras que pueden modificar las propiedades de los diapiros en general (Tabla 2), necesitando por tanto estudios de cada caso particular (Sobolik & Ehgartner, 2012; Duffy, et al., 2023).

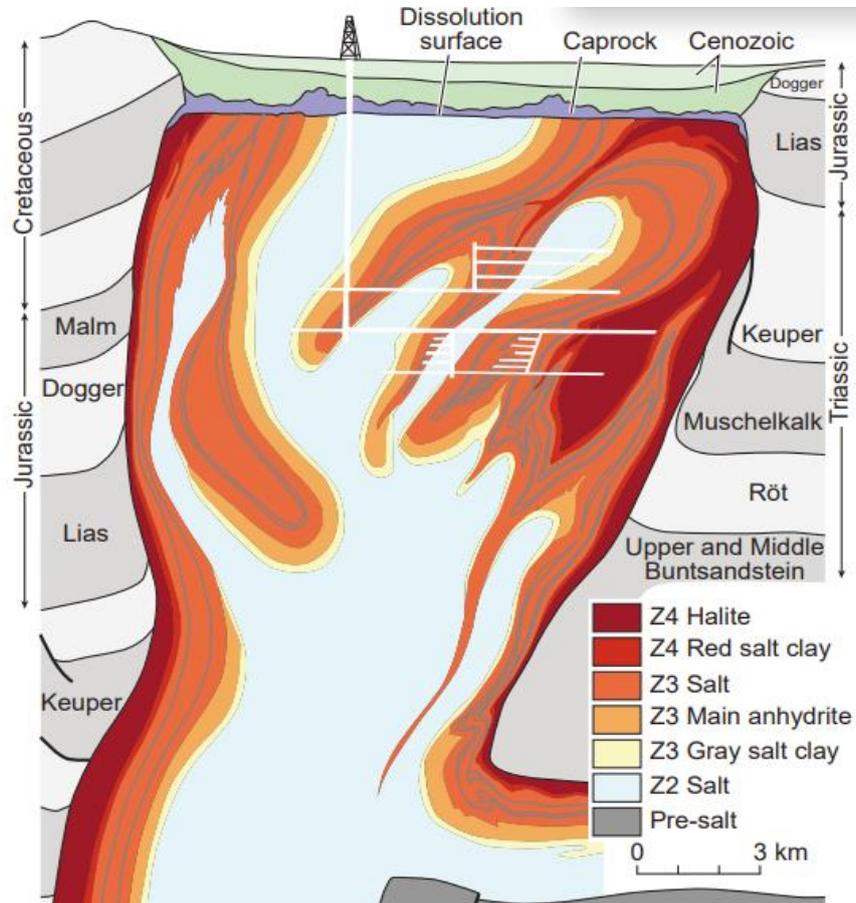


Figura 5 Sección transversal de un diapiro ejemplo, donde diferenciamos las litologías y las capas del mismo. Resulta frecuente la presencia de un halo de halita, así como un núcleo salino de halita, rodeado de arcillas y anhidrita y yesos (Duffy et al., 2023) (Pichat, 2022).

Depositional Heterogeneities	Non-depositional Heterogeneities		
	Post-depositional Compositional Changes	Post-depositional Physical Alteration	Anthropogenic Heterogeneities
Evaporite intervals: • evaporative carbonate • gypsum/anhydrite • halite • bittern salts	Inclusions: • igneous intrusions • entrained country rock (sutures, stoped sub-salt blocks, encased minibasins)	Deformation: • faults • shear zones • fractures • joints	Excavations and mines Boreholes Existing solution caverns
Non-evaporite intervals: • sand • shale • biogenic carbonate	Chemical alteration: • solution residue (e.g., caprocks) • products of other chemical reactions (e.g., sulphate reduction by hydrocarbons)	Recrystallization zones Mylonitization (smaller grains)	In-situ waste and storage: • chemical waste • radioactive waste • munitions • preserved valuable objects
Syn-depositional igneous: • lavas • ashes	Natural fluids: • brines • hydrocarbons		Migrated anthropogenic fluids: • brines • hydrocarbons • dissolved hazardous waste
Fluids and gases trapped during deposition			

Tabla 2 Diferentes tipos de heterogeneidades clasificadas (Duffy et al., 2023).

En cuanto a heterogeneidades debidas su deposición, así como al movimiento de la sal, se ven en gran parte de los diapiros, con características similares y un origen parecido, una estructura en forma de capas, que se repliegan de formas complejas (Figura 6) (Talbot & Jackson, 1987). El resultado es el desarrollo de un sistema de pliegues “en cortina”, que resulta en una estructura compleja, quedando una intercalación de capas más y menos competentes concéntricas a lo largo del diapiro (Jackson & Talbot, 1989; Burliga, 2014; Zulauf et al., 2019). Sin embargo, suele ser característico un halo exterior de halita, así como el núcleo de sal halita rodeado de yesos o anhidrita, y sales potásicas (Pichat, 2022; Duffy et al., 2023) (Figura 5), pudiendo desarrollar en la parte más superior de la estructura una acumulación de anhidrita, que cerca de superficie puede hidratarse y pasar a yesos (Bruthans, et al., 2009; Jackson & Lewis, 2012), como los que se observan en superficie en nuestra área de estudio (Olivé Davó et al., 1977).

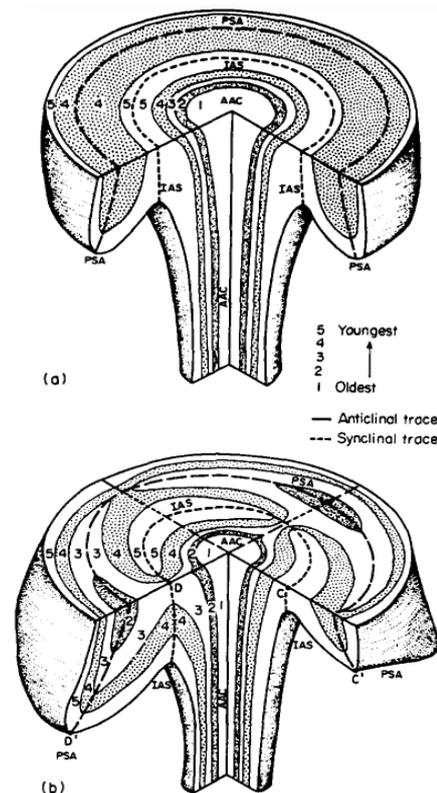


Figura 6 Secciones longitudinales y transversales de un diapiro tipo, con la estructura de pliegues “en cortina” y las capas concéntricas vistas en planta (Jackson & Talbot, 1989).

Como resultado de este ascenso del diapiro, las rocas más densas pueden ser arrastradas, incluyendo niveles de arcillas dentro del diapiro e incluso fragmentos de otras rocas. Entre esas rocas pueden aparecer carbonatos de origen evaporítico o biogénico, rocas volcánicas como las ofitas que se encuentran en el diapiro de Araña (Frankovic, 2010), o rocas detríticas atravesadas por el diapiro (Rowan et al., 2019).

A la hora de realizar la modelización, se tendrá en cuenta esta disposición de núcleo y capas, así como diferentes porcentajes en material detrítico, volcánico o biogénico, para otorgar diferentes densidades modelo e ir variando con esos porcentajes de composición del diapiro. Como en todo proceso de modelización se han generado geometrías conceptuales que son más simples que la realidad. No obstante estos modelos simplificados a una escala determinada incluyen los rasgos geológicos y están apoyados con datos de sondeos y pozos en los diapiros, así como a información sísmica.

4. CONTEXTO GEOLÓGICO

La zona de estudio, así como los diapiros escogidos para funcionar como almacén, se localizan en la cuenca Vasco-Cantábrica. Esta elección viene condicionada a la presencia de diapiros salinos en la península Ibérica, así como al tamaño de los mismos principalmente (Figuras 7 y 8) Estos factores, junto con algunos estudios previos, determinan que una de las zonas óptimas para su estudio es este borde sur central de la cuenca Vasco-Cantábrica. Y es que esta zona se caracteriza por los diapiros bien formados y desarrollados, producto de la etapa extensión mesozoica, así como de un desarrollo compresivo alpino posterior (Pinto, et al., 2005)

La cuenca Vasco-Cantábrica se sitúa en el Norte de la Península Ibérica, localizada en las comunidades autónomas de Cantabria y el País Vasco principalmente, así como en el norte de Burgos y Palencia. Es una cuenca extensional mesozoica, que durante la compresión alpina (desarrollada durante el Oligoceno-Mioceno inferior principalmente), se encuentra hoy parcialmente invertida, con cabalgamientos sobre las cuencas cenozoicas circundantes (Ebro en el SE, Duero en el SO) y en el Golfo de Vizcaya en el Norte (Figura 8).

Se trata de una cuenca extensional originada como consecuencia del rift mesozoico que propició la apertura del Atlántico Norte y del Golfo de Vizcaya. Así pues, encontraremos sedimentos carboníferos y pérmicos propios de la desmantelación de estructuras variscas, como base de la cuenca, seguido de un relleno mesozoico de rift continental y apertura al mar. Ya durante la orogenia Alpina, la cuenca se invertirá y cabalgará sobre las actuales cuencas de la península (Cámara, 2020).

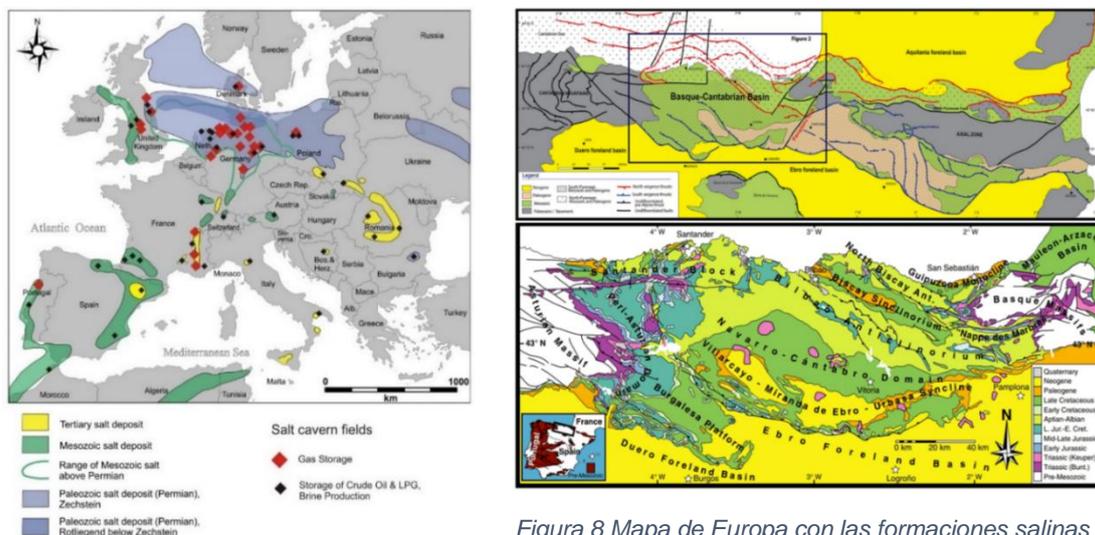


Figura 8 Mapa de Europa con las formaciones salinas y campos de gas Susceptibles de poder usarse como zonas de estudio para almacén en cavernas salinas (Gillhaus, 2010)

Figura 8 Mapa de Europa con las formaciones salinas y campos de gas Susceptibles de poder usarse como zonas de estudio para almacén en cavernas salinas (Gillhaus, 2010).

4.1. Estratigrafía y Sedimentología

La información sobre la petrología y características del relleno de la cuenca servirá para entender los valores de densidad en los modelos gravimétricos de la roca que rodea a los diapiros. El sustrato de la cuenca lo forman rocas marinas cámbricas a carboníferas, casi todas ellas en su totalidad metamorizadas y plegadas durante la orogenia Varisca. Sobre este basamento se depositan las reocas formadas durante el relleno de la cuenca extensional (GESSAL. Geología de Exploración y Síntesis, S.L., 2002). La secuencia estratigráfica comprende las siguientes unidades:

1. Carbonífero – Pérmico – Triásico: Las primeras rocas en depositarse son rocas clásticas, derivadas de la desmantelación de las cadenas Variscas. Así pues, todos los sedimentos caen en la cuenca, generando un espesor considerable. Este periodo lleva desde finales del Carbonífero, existiendo en algunos puntos, pruebas de que siguió durante el Pérmico. Es ya durante el triásico, que comienza un periodo de rifting en la península Ibérica, depositándose las series típicas germánicas del Buntsandstein, Muschelkalk y Keuper. Esta última fase del Triásico genera grandes depósitos salinos, correspondientes a ambientes de sabkha, en las que queda agua salina en las proximidades de la costa. Con baja profundidad y sin una importante conexión al mar, el agua se evapora y precipitan sales. Es por tanto este periodo aquel en el que se forman las capas ricas en sales que posteriormente formarán los diapiros de los posibles almacenes (Ramos et al., 2022).

2. Jurásico Inferior: se produce una transgresión marina, cubriendo de agua gran parte de la cuenca, permitiendo así la precipitación de carbonatos sobre materiales triásicos (GESSAL. Geología de Exploración y Síntesis, S.L., 2002). También destacan anhidritas y dolomías de influencia mareal del Hettangiense, con calizas Sinemurienses cubriéndolo todo, con un total de 230 metros. Es ya durante el Pliensbachiense y el Toarciense que arcillas y margas marinas ricas en materia orgánica cubren la cuenca en el sector Suroccidental, llegando a 150 metros de potencia (Beroiz & Permanyer, 2011; Chivelet et al., 2019).

3. Jurásico medio: no hay eventos importantes durante la mayor parte de su duración. Se depositan arcillas, margas y algún nivel de caliza fino intercalado (Beroiz & Permanyer, 2011; Alcalde et al., 2014). A finales del mismo, en el Calloviense, una regresión importante permite la erosión de las primeras capas, quedando pues entre los 200 y los 350 metros.

4. Jurásico superior: llega un elevado número de material detrítico, anteriormente constituyente de altos en la zona de Asturias. Pese a esto, la tasa de subsidencia tectónica era mucho mayor que la de sedimentación, por lo que predominaban las arcillas sobre las arenas, en contextos marinos poco profundos (Beroiz & Permanyer, 2011). Así pues, debido a la alta tasa de subsidencia de la cuenca y el gran aporte de sedimentos, llegamos a un total

de entre 500 a 1500 metros de arcillas y arenas, denominadas facies Purbeck (Alcalde et al., 2014). En estos periodos comienza la tectónica de la sal, ascendiendo por las altas presiones y bajas densidades, formando diapiros y generando fallas (Figura 9) (Cámara, 2020).

5. Cretácico Inferior: Con un espesor muy variable, entre 400 y 1200 m, encontramos la Formación Utrillas y Wealden, consistiendo de nuevo en sedimentos clásticos, esta vez con una mayor cantidad de arenas respecto a arcillas, pues la subsidencia se ralentiza, permitiendo que la tasa de acumulación se superponga más que antes (Beroiz & Permanyer, 2011).

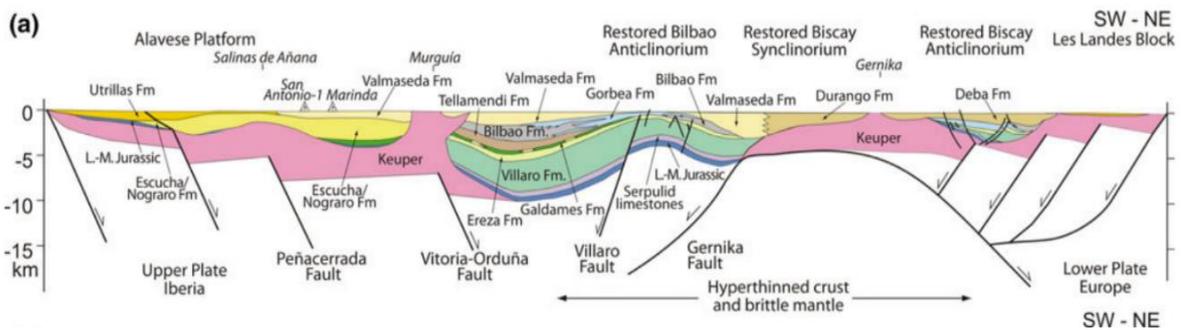


Figura 9 Corte de la cuenca Vasco-Cantábrica SW-NE durante finales del Cretácico Inferior. La tectónica de la sal ya ha comenzado en este periodo (Chivelet, et al., 2019)

6. Cretácico Superior: sucede una transgresión marina a nivel global. Consecuencia de ello, hasta el Maastrichtiense se depositan carbonatos y arcillas marinas de plataforma poco profunda. Es el último piso del Cretácico, donde vemos evidencias de una regresión local, permitiendo el depósito de evaporitas. Todo este intervalo llega a los 500 – 700 metros (Beroiz & Permanyer, 2011).

8. Paleógeno: Depósitos lacustres de entre 200 y 800 metros cubren la cuenca antes de su compresión alpina (Beroiz & Permanyer, 2011)

4.2. Evolución de la Cuenca

La cuenca Vasco-Cantábrica surge como una cuenca extensional durante el rift Pérmico-Triásico, con la apertura del Atlántico Norte y el Golfo de Vizcaya. Se depositan pues materiales triásicos propios de rift continental, con sistemas fluviales y costeros, destacando los ambientes de Sabkhas del Keuper, donde se depositan evaporitas. En el Jurásico Inferior, se produce una transgresión marina, la cuenca comienza a subducir rápidamente de forma mecánica, a través de fallas, para estabilizarse

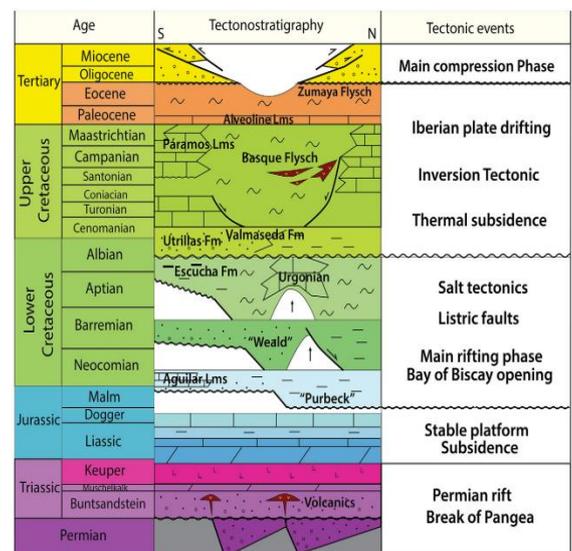


Figura 10 Columna estratigráfica y tecto-sedimentaria de la cuenca Vasco-Cantábrica (Cámara, 2017)

topografía cercana a los 5 km de ancho en su eje más largo (ENE-OSO), y de unos 3 km en su eje corto (NNO-SSE). El diapiro tiene una orientación de alargamiento en superficie de N120°E, paralela a las principales fallas Alpinas que favorecen el ascenso de la sal (Frankovic et al., 2016). La mayor parte de los diapiros presentes en la cuenca siguen esta misma orientación.

Tal y como marca Frankovic (2010) y Chivelet et al. (2019), la actividad intrusiva salina empezó a partir del Aptiense-Albiense (Cretácico Inferior, hace 125 Ma), y alcanza hasta tiempos recientes, llegando a estar en superficie discordante sobre depósitos miocenos.

Durante toda esta etapa, el diapiro ha ido creciendo en función de la tasa de flujo de sal, así como la capacidad del medio para disolver el diapiro cerca de superficie y la capacidad de este último de desplazar los depósitos contemporáneos a estos eventos (Figura 12).

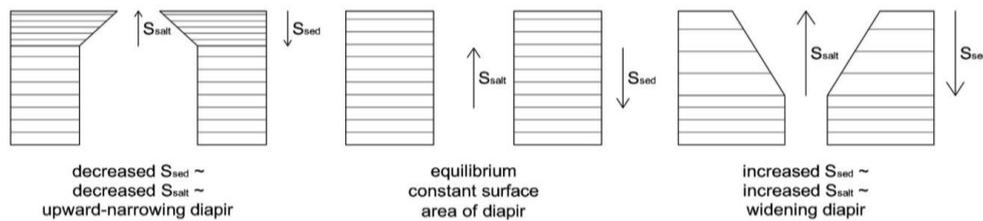


Figura 12 Variación de la anchura del diapiro en función de las tasas de disolución y sedimentación (S_{sed}) y la tasa de ascenso de Sal (S_{salt}) (Frankovic et al., 2016).

Por tanto, en condiciones de sedimentación marina, se tiene en cuenta una tasa de disolución de la sal constante, pues las condiciones nos varían lo suficiente de concentración de sal y temperatura como para que varíe la velocidad a la que se disuelve (Frankovic, 2010). Por el contrario, en condiciones superficiales, la disolución de evaporitas es menor, por lo que pueden llegar a generarse en superficie los llamados glaciares de sal. Estas tasas implican una expansión en la horizontal, empujando y evitando la deposición de material, aumentando o disminuyendo por tanto la anchura del diapiro (Figuras 12 y 13; Frankovic, 2010; Frankovic et al., 2016). Es durante el Aptiense-Albiense cuando el diapiro comienza su ascenso debido a la alta presión de sedimentos y a los movimientos extensionales. Debido a su ductilidad y plasticidad, así como su baja densidad, el diapiro comienza a intruir. La tasa de flujo de sal es elevada, haciendo que se ensanche a techo. Justo después de esto le siguen periodos en los que esta tasa desciende, o la tasa de sedimentación y disolución aumentan, dando como resultado un estrechamiento importante hasta el Turoniense (Cretácico Superior). En este periodo aumenta rápidamente, generando una protuberancia a la que denomina Frankovic (2010) como *cornisa*. Este vuelve a estrecharse al depositarse unas calizas, para posteriormente crecer de gran manera durante la deposición de facies subáreas, implicando que las tasas de disolución son menores (Figura 13) (Frankovic, 2010).

En cuanto a la geología de superficie, se han establecido las litologías más importantes alrededor de las cuales se emplaza el diapiro, y a las cuales afecta o son el mismo diapiro o parte de él.

De base a techo, comenzamos con el nivel del Muschelkalk, pertenecientes al Triásico medio. Son calizas marinas que servirán como base del nivel de sales del Keuper. Este último nivel es la base de la cual ascienden los diapiros. Se compone de evaporitas, principalmente yesos cerca de superficie, siendo estos en núcleos, pero también forman una banda concéntrica con varios metros de potencia (50-150m) y arcillas rojizas, mezcladas con dolomías y carniolas jurásicas, que aparecen de forma caótica (Valdés Pérez, 2014). Un nivel de rocas subvolcánicas ofitas se establece en los modelos como base del diapiro, y como masas en los bordes, sobre todo en el Sur (Frankovic, 2010; Frankovic et al., 2016). En la zona vasco-cantábrica, estos niveles de ofitas se asocian a la base del triásico superior, pues una vez ya iniciada la apertura del Atlántico, debido al adelgazamiento de la corteza en la cuenca, el manto ascendió y, a través de fallas subió el magma mantélico hasta llegar cerca de superficie (Lafuente Martínez, 2021).

Por encima estratigráficamente del Keuper tenemos la formación del Albiense, siendo calizas marinas y a techo pasan a arcillas. Sobre las mismas se depositará la formación Valmesada. Son depósitos detríticos deltaicos, por lo que encontramos conglomerados, arenas, lutitas y arcillas. Seguido, una alternancia de calizas y margas cenomanienses, un paquete de calizas de la unidad Garate que pasa gradualmente a margas turonienses tardías de Zuazo. Finalmente, unas últimas calizas de Subijama, sobre las que se depositarán los materiales santonienses, siendo más margas y calizas lacustres principalmente. Cubriendo todas estas litologías, se deposita la unidad terciaria de Pobes, siendo ya conglomerados continentales (Frankovic, 2010; Alcalde et al., 2014; Frankovic et al., 2016; Moya Corencia, 2018).

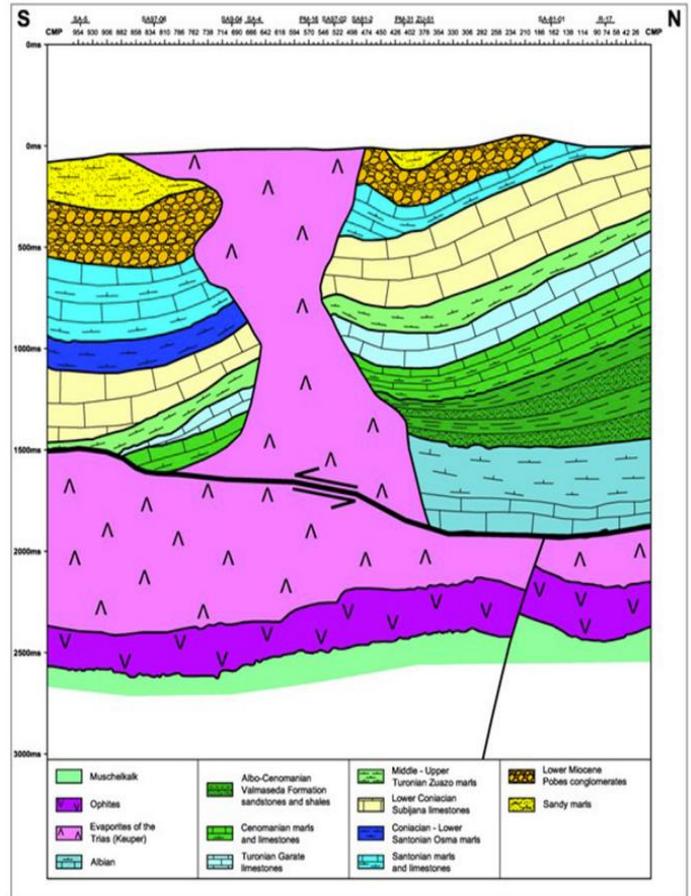


Figura 13 Esquema geológico basado en los reflectores sísmicos, los sondeos y la geología cercana del diapiro de Araña (Frankovic et al., 2016).

Todos estos datos se utilizarán posteriormente en la realización del modelado gravimétrico, aplicando densidades a estas litologías, así como al diapiro.

4.4. Diapiro de Maeztu

El diapiro de Maeztu se encuentra, al igual que el de Araña, en la cuenca Vasco-Cantábrica. Situado más al Este que este, se ubica en la provincia de Álava, cerca de la frontera de Navarra, zona más oriental de la cuenca. La localidad de Arraya-Maeztu le da nombre a este diapiro, pues la población se encuentra en el borde Noreste del mismo (Figura 14).

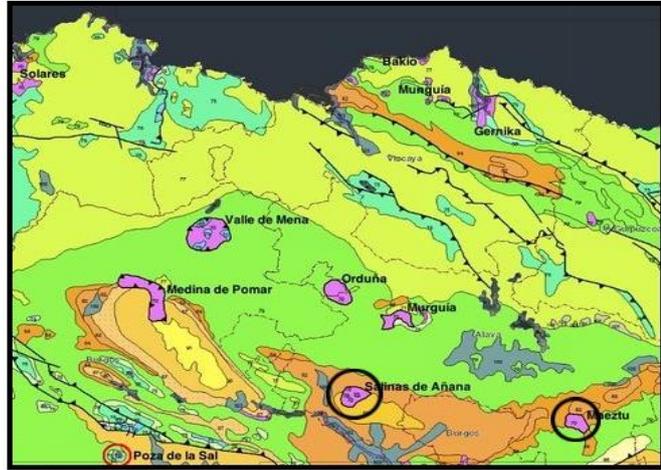


Figura 14 Mapa geológico del extremo oriental de la Cuenca Vasco-Cantábrica. Marcados los diapiros elegidos en el estudio Mapa geológico continuo 1:1.000.000 del IGME. (Instituto Geológico y Minero de España IGME y Laboratorio Nacional de Energía e Geología LNEG, 2015)

Se incluye en la clasificación como parte de los diapiros de la zona central-oriental de la cuenca, y se encuentra en la estructura ENE-OSO del sinclinal de Urbasa, continuación oriental del anticlinal ya comentado de Treviño, y que queda atravesando este, colocándose el diapiro disconforme sobre materiales cretácicos, terciarios y cuaternarios.

En superficie el diapiro no tiene casi presencia, pues solo se pueden observar las lutitas y arcillas rojas, y algunos yesos, siempre con restos de rocas volcánicas según la memoria de (Carreras Suárez et al., 1976). Es ya en profundidad donde se atraviesan unas capas de yesos y arcillas rojas, para ya pasados los primeros centenares de metros, encontrar un núcleo de halita, intercalada con alguna capa fina de yesos, pero estas son no tan comunes a tanta profundidad (Carreras Suárez et al., 1976), según el sondeo de Atauri-1 de CIEPSA (Compañía de Investigación y Explotaciones Petrolífera, Sociedad Anónima).

Estos datos de sondeo son prometedores, pues para generar una cavidad, se intentará buscar un núcleo salino lo más homogéneo posible, para así evitar las posibles contaminaciones de hidrógeno cuando este se almacene, así como asegurar las características aplicadas a la geotecnia que necesite.

El desarrollo en superficie del diapiro marca que posee una longitud en su eje corto ronda los 3,5 kilómetros, mientras que el eje largo está sobre los 5 km, mientras que en profundidad se estrecha ligeramente en los primeros metros desde la base, pero en profundidad permanece con una anchura más o menos constante.

El diapiro alcanza una profundidad considerable, al estar unido al techo de la capa del Keuper, pues, como en toda esta zona, es esta capa salina la que desarrolla halocinesis, superando los 3 km. En su base, los reflectores sísmicos no parecen ser muy marcados, implicando que al contrario que en Araña, en este caso no encontramos niveles de ofitas en su base (Frankovic, 2010).

En este caso, se describe el diapiro como en “forma de chimenea” en Carreras Suárez et al., (1976), implicando que no posee una forma tan característica de champiñón como Araña, si no que la geometría está marcada por unos bordes más planos y verticales, no ensanchándose en el techo ni estrechándose en la base, sino manteniendo un espesor más o menos constante. Esto se complementa con la información y los modelos de (Frankovic, 2010), donde marca un desarrollo continuo, siendo más estrecho en el cretácico inferior, con los primeros momentos del desarrollo del diapiro, aumentando su espesor muy poco durante el cretácico superior. Son ya en sus etapas finales, o más próximas a la actualidad, donde el diapiro se ensancha muy cerca de superficie.

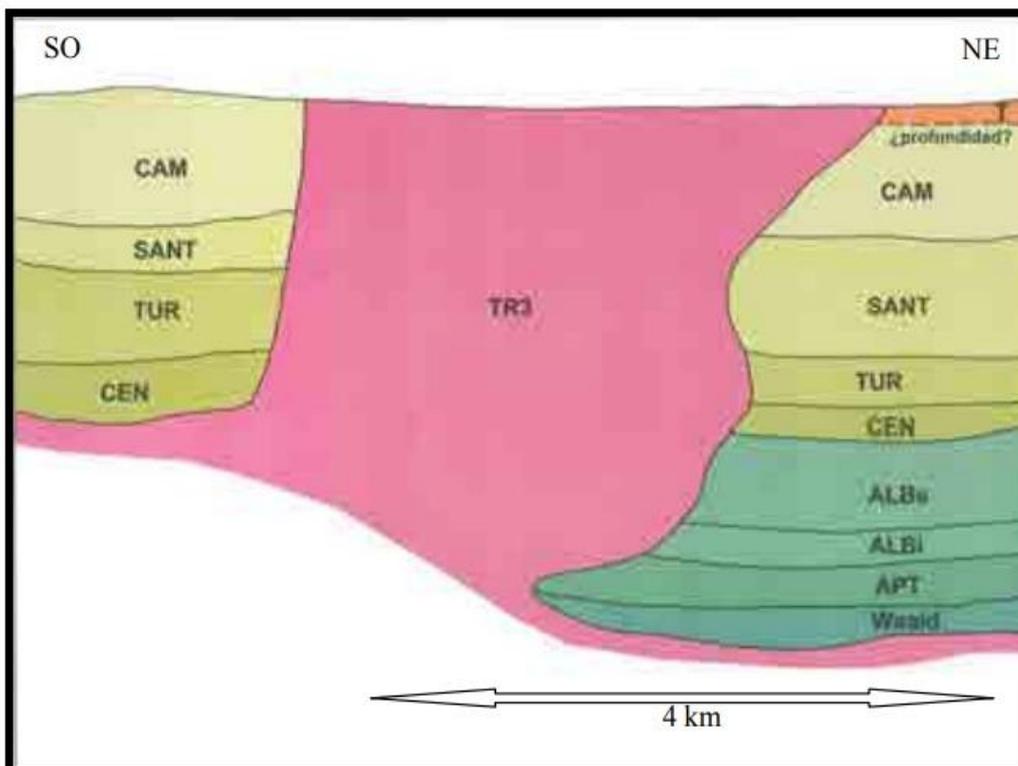


Figura 15 Sección a través del diapiro de Maeztu basado en la línea sísmica de MA97-04 (Frankovic, 2010)

El diapiro, al igual que el de araña, se encuentra cabalgando material del Cenozoico. El cabalgamiento tiene la base en el techo o dentro de Keuper, habiendo por tanto desplazado durante la compresión alpina estas estructuras diapíricas, así como todo lo que tiene por encima. Esto no ha supuesto un cambio relevante en ninguna de las estructuras (Figura 15; Frankovic, 2010; Cámara, 2017).

5. METODOLOGÍA Y TRABAJO REALIZADO

5.1. Selección de la zona de estudio

El primer paso ha sido definir la zona de estudio y las estructuras diapíricas a modelizar. La zona de estudio se ha establecido buscando en un primer momento zonas de cuencas en la Península Ibérica con presencia de domos y diapiros y con información disponible en profundidad (sondeos, geofísica), pues estos, en comparación con simples capas salinas, ofrecen una mayor homogeneidad, así como un volumen más considerable y una geometría más adecuada para la generación de cavernas salinas (Caglayan et al., 2020). Al realizar el trabajo en la Península Ibérica, se tomó en consideración la cuenca Vasco-Cantábrica, Pirineos y el sur de la Cordillera Ibérica, como principales zonas. Debido a los campos de gas natural y a los estudios del subsuelo, así como el acceso a datos geofísicos. Se optó por la

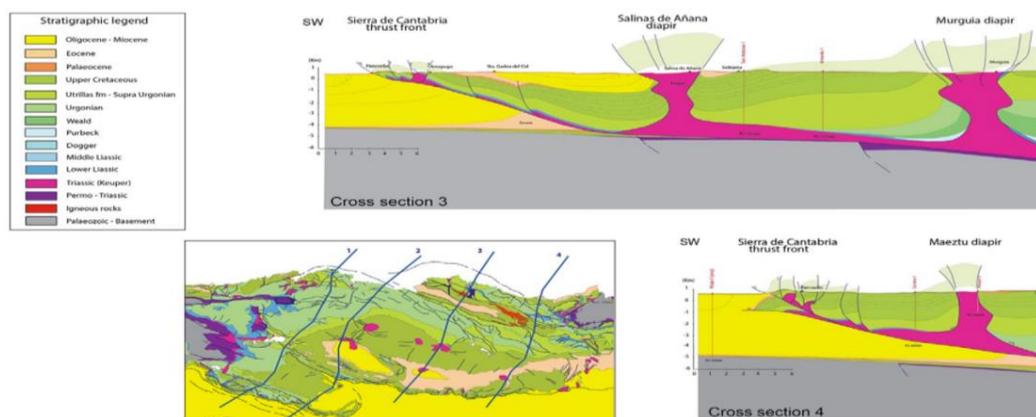


Figura 16 Cortes geológicos de parte de la cuenca Vasco-Cantábrica, basados en secciones sísmica de reflexión (Cámara, 2017).

cuenca Vasco-Cantábrica, pues ofrecía un contexto más conocido sobre el que partir de base.

Para la selección de los diapiros a modelizar, se analizaron las cartografías y bibliografía, destacando las zonas sur y centra, pues las estructuras salinas están más desarrolladas (Pinto et al., 2005). Con una extensión considerable, se buscan aquellos que afloren en superficie, o que al menos no se encuentren a gran profundidad (Figura 16). Se han descartado también los diapiros salinos con alta complejidad tectónica, pues la presencia de tantas estructuras puede resultar perjudiciales para el aislamiento del almacén, así como complejizan en exceso un estudio sin datos tomados en campo. Los diapiros seleccionados serán el de Salinas de Araña, y el diapiro de Maeztu, pues poseen las cualidades necesarias para que se estudien como posibles almacenes.

5.2. Datos sísmicos usados

En la zona, y a lo largo de los años, se han establecido diversas campañas de adquisición de datos sísmicos, pues como ya se ha dicho, ha sido objeto de estudio de exploración de

hidrocarburos. Al ser los diapiros trampas naturales, pues las paredes verticales ofrecen un buen sello, algunas líneas sísmicas se han pasado por estas estructuras.

En la realización de este trabajo, se han usado las interpretaciones de los diapiros de Frankovic (2010) y Cámara (2020), pero se ha consultado previamente información sísmica para cercionarse de que las conclusiones y los datos de partida son los correctos, únicamente como consulta en caso de dudas en medidas o interpretación. Así pues, para el diapiro de Salinas de Araña, se ha agrupado las líneas de las campañas 8C4-SA, 8C4-SA81, y 8C4-ZU. Son un total de siete líneas de las localidades de Miranda del Ebro y Orduña, con dirección NNE y ONO, perpendiculares entre sí, y que describen un mallado simple del diapiro (Figura 17). Así pues, debido a la muy baja calidad de la sísmica, solo se han tenido en cuenta como consulta adicional.

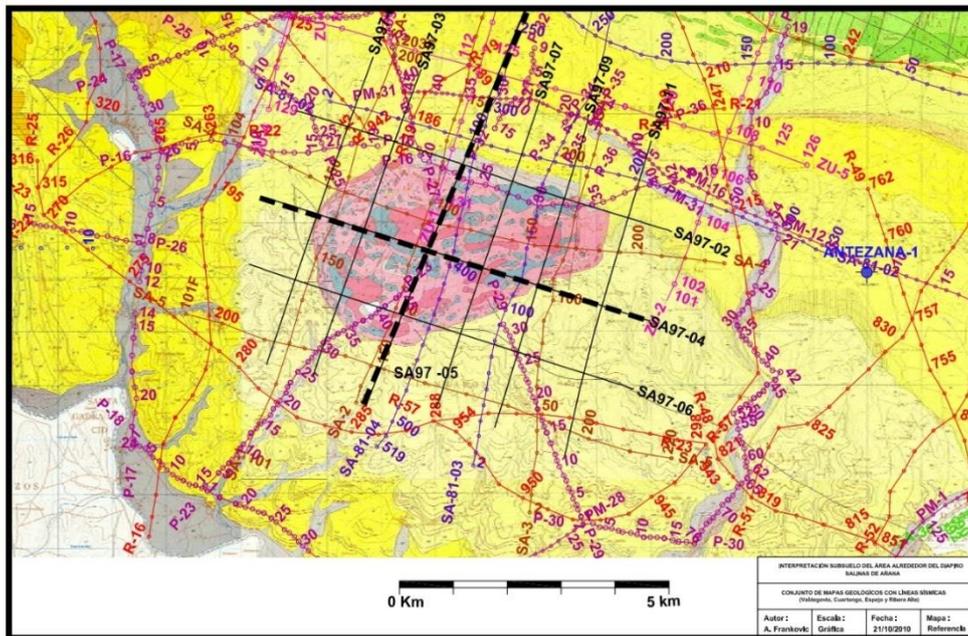


Figura 17 Salinas de Araña. Líneas Sísmicas superpuestas al mapa geológico. Marcadas las líneas sísmicas SA9 -04 y SA97-05 con las que se ha modelizado. Modificado de (Frankovic, 2010).

Por otra parte, Frankovic (2010) y Frankovic et al. (2016) utiliza las líneas de la campaña SA97, siendo esta más reciente y con mejor calidad. Con este estos recursos y las interpretaciones ya mencionadas, se pueden establecer dos secciones a través del diapiro: una longitudinal ONO-ESE, siguiendo el eje largo del diapiro, y una sección perpendicular SSO-NNE, transversal a la estructura. Las secciones construidas para modelizar este diapiro se apoyan en las líneas sísmicas SA97-04 y SA97-05 por ser las de mayor calidad y que atraviesan por el centro de la estructura (Figura 17).

En el caso del diapiro de Maeztu, se estableció en su momento una campaña de líneas sísmicas perpendiculares entre sí, formando una rejilla en torno a la sal. Esta campaña fue denominada DMA97S, poseyendo las líneas MA97, desde la 1 a la 7, siendo las impares

dirección SSO-NNO, mientras que las pares son ONO-ESE, de nuevo con la dirección de alargamiento del diapiro, coincidiendo con la de Araña. Para la modelización, las líneas sísmicas centrales son las escogidas, en este caso MA97-04 y MA97-05 (Figura 18).

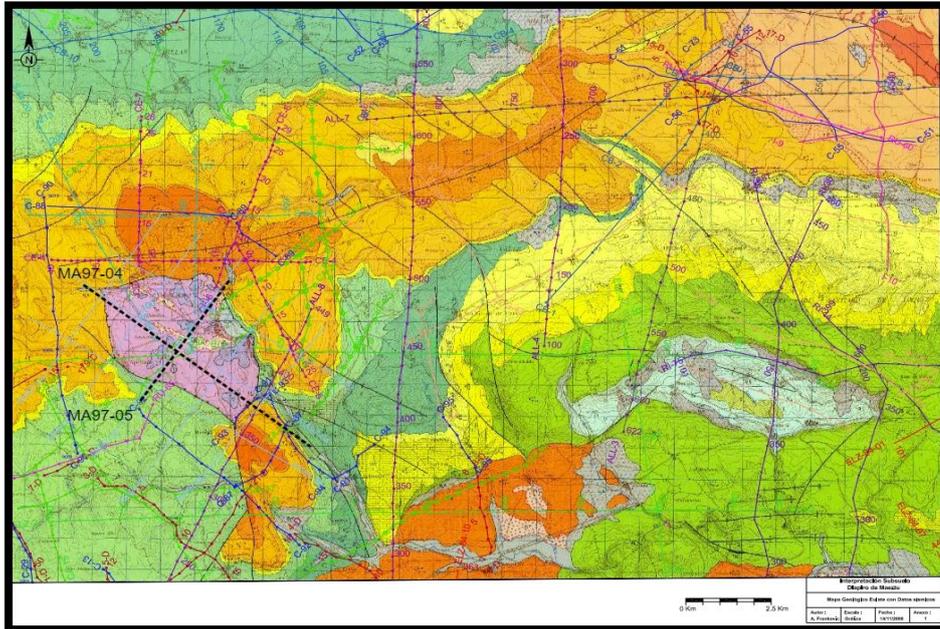


Figura 18 Diapiro de Maeztu. Se proyectan las líneas sísmicas superpuestas al mapa geológico del magna hoja 139 (Eluate). En negro se identifican las líneas sísmicas MA97-04 y MA97-05 sobre las que se han modelizado las secciones modelizado (modificado de Frankovic, 2010)

5.3. Modelización

5.3.1. Base de datos

Se ha usado el PNOA como modelo digital del terreno. Derivado de este, una capa de sombreado y curvas de nivel, así como la implementación de una imagen georreferenciada del MAGNA. Debido a ciertas incompatibilidades, se ha generado una capa vector de nube de puntos, espaciados 25 metros sobre la zona de estudio. De esta capa, complementaria al ráster del PNOA, se han obtenido una base de datos XYZ mediante el cálculo de atributos, con un mallado regular en su extensión sobre el plano XY. Una vez transferida la *database* al software Oasis Montaj, se ha realizado una interpolación con mínima curvatura. El sistema de coordenadas establecido en todos los casos ha sido ETRS89/ UTM Zona 30N, proyectado de WGS84.

Ya establecidas las secciones longitudinal y transversal a las estructuras (Figuras 17 y 18) que se usarán en el proyecto, apoyándonos en las imágenes y diagramas de Frankovic (2010), Frankovic, et al. (2016) y Cámara (2017) del diapiro, digitalizamos y referenciamos al sistema de coordenadas en uso estas figuras en Oasis Montaj, software con el que se trabajará en adelante.

Para el diapiro de Araña se han usado los cortes de sismica SA97-05, con el esquema de la figura 13, simplificando parte de la geología del entorno, así como la interpretación de la línea sísmica SA97-04, que corta perpendicularmente la anterior (Figura 17). Mientras que para Maeztu se ha usado MA97-05 y MA97-04, con el esquema de la figura 15. Mientras, para la interpretación de la sismica 04, se ha hecho una interpolación de los horizontes en el punto de corte de ambas secciones, siendo el punto central del diapiro. La interpretación de los bordes del diapiro y los contactos se ha establecido utilizando la información de Frankovic, (2010).

5.4. Valores de densidad

Para la asignación de los valores de densidad a las diferentes unidades litológicas, se ha realizado una simplificación de las unidades, pues resulta ineficaz separar diferentes unidades si los contrastes de densidad son mínimos (Tabla 3). Por ello, se ha decidido juntar todo el eratema Cenozoico, teniendo características litológicas y densidades similares, y se han diferenciado las unidades del Cretácico Superior y del Cretácico Inferior. Para el Keuper se ha separado el diapiro de la capa salina, para aplicar así las morfologías en capas replegadas, así como los niveles de ofitas donde se hayan marcado según los estudios de Frankovic, (2010) y Frankovic et al. (2016), pues poseen una densidad y litología muy diferenciada.

Los modelos de densidades en 2D consisten en delimitar geometrías mediante poligonales, asignando un valor de densidad a cada polígono. La Tabla 3 muestra los valores de densidad utilizados en los modelos, que han tenido en cuenta la bibliografía descrita previamente:

Tabla 3 Litologías y edades con sus respectivas densidades usadas en los modelos. Basado en los datos de sondeos de Hotomín y Araña (Ramos et al., 2022).

	Edad Simplificada	Litología	ρ (g/cm ³)
Paleógeno	Cenozoico	Conglomerados Arenas, limos y arcillas	2.4
Turonense Cenomaniense Fm. Utrillas	Cretácico Superior	Calizas y margas Arenas y gravas	2.55
Gp. Weald Gp. Purbeck	Cretácico Inferior	Arenas Arcillas	2.4
Diapiro	Triásico Superior	Halita	2.19
		Arcillas	2.8
		Anhidrita	2.3
		Yeso	2.1
Keuper	Triásico Superior	Sales y Arcillas	2.3
Muschelkalk	Triásico Medio	Dolomías	2.84

Además de los datos bibliográficos y las secciones de Frankovic (2010) y Frankovic et al. (2016), también se han utilizado los datos de los pozos existentes con datos accesibles: Atauri 1, Alda 1 y Alda 1P, Corres 1, Zuñiga 1 y Gastiain 1. Otra fuente de información utilizada han sido los datos de la zona de Hotomín, muy próxima y muy estudiada al ser un posible almacén de CO₂ (Ramos et al., 2022). Este trabajo ha utilizado los sondeos de Hotomín 1, Hotomín 2 y Hotomín 3 y Sal 2, cortando este último, al igual que el sondeo Atauri 1 un diapiro del Keuper. Estos datos se han usado para la elaboración de la Tabla 4.

5.4.1. Construcción del modelo base

Los modelos se realizarán con GM-SYS integrado en Oasis Montaj, pudiendo obtener los datos de anomalía gravimétrica a partir de un modelo estructural establecido, aportando manualmente los datos de densidad y extensión y profundidad, con su base en algoritmos de Hubbert (1948), Talwani et al. (1959) y Won & Bevis (1987), siguiendo el manual de Ayala & Rey (2009).

- Modelización base de las secciones de Araña:

Los modelos de Araña comienzan con una base denominada en el trabajo como corteza, sobre los que se depositan las ofitas. Son rocas ígneas formadas a escasa profundidad, por lo que se corresponden a condiciones de bajas presiones y temperaturas intermedias. Se considera una roca subvolcánica, pues a pesar de haberse enfriado de forma rápida, no lo ha hecho en superficie. Esta característica implica que la roca posea una baja densidad. Son las ofitas las que en las Salinas de forman la base del Keuper, así como debido a la tectónica de la sal, algunos fragmentos llegan a superficie arrastrados por el ascenso salino. El núcleo salino por otra parte, se establece como un nivel de sal halita homogéneo.

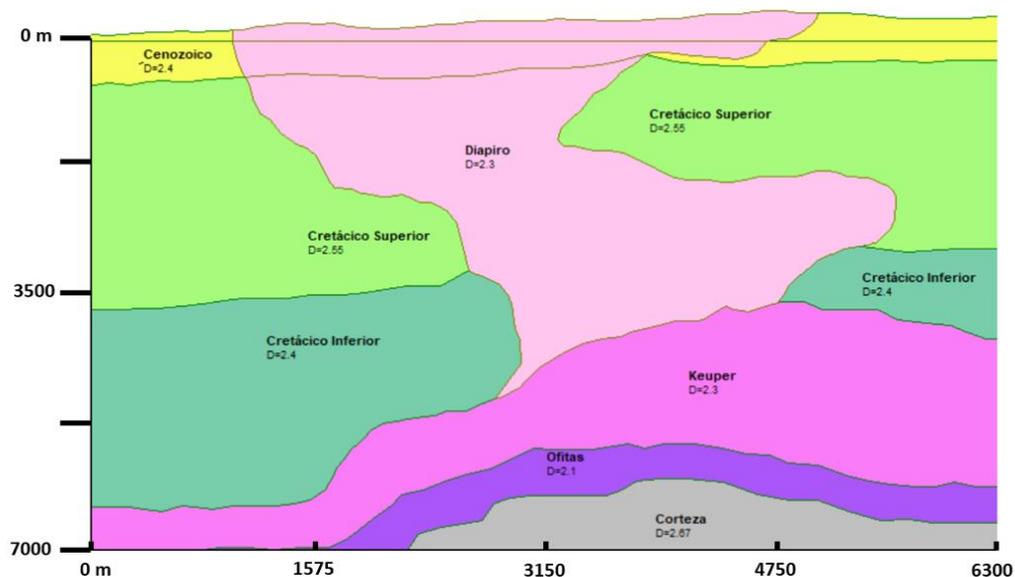


Figura 19 Modelo base de Araña sobre la sección SA97-04

La serie del mesozoico será una alternancia de calizas y margas, la mayoría como estratos a los lados del diapiro, pero algunos núcleos de carbonato se encuentran arrastrados por el movimiento de la sal. Debido a su distinta densidad, se diferencia entre mesozoico superior e inferior. Finalmente, el cenozoico se corresponde a material detrítico, arenas arcillas y conglomerados producto del desmonte de los cabalgamientos alpinos. Esta capa que recubriendo los flancos de los diapiros (Figura 19).

- Modelización base de las secciones de Maeztu:

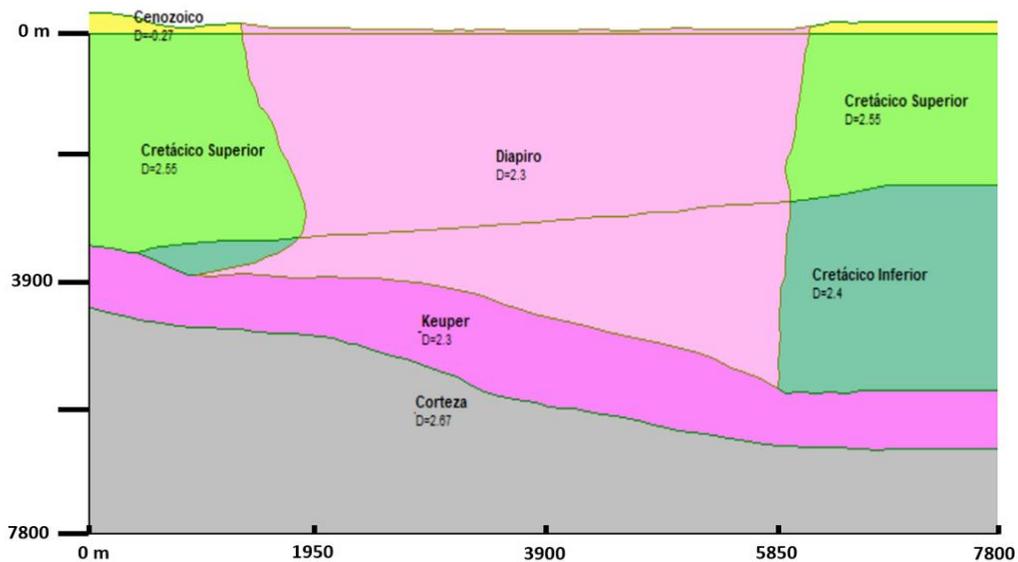


Figura 20 Modelo base de Maeztu sobre la línea MA97-04

Por otra parte, pese a seguir un criterio muy similar en Maeztu, este posee algunas características diferenciadas. Para empezar, no se establece un nivel de ofitas, como si sucede en Araña. Pese a encontrar restos de rocas subvolcánicas en superficie según Carreras Suárez et al., (1976), los reflectores sísmicos estudiados en Frankovic, (2010), indican que no hay un nivel base de estas rocas. Es por esto que se sigue un modelo en el que el Keuper aparece sobre la corteza de fondo de modelo. El diapiro posee paredes muy verticales y rectas, sobre todo en los flancos meridionales, mientras que los orientales, destaca el espesor del mesozoico inferior, no siendo simétrico en la zona Oeste del diapiro, donde no aparece apenas. Por último, el Cenozoico tiene muy poco espesor, estando relegado principalmente a la topografía, con casi nulo desarrollo en profundidad (Figuras 20).

5.4.2. Obtención de la respuesta gravimétrica

Las densidades de la (TABLA 3) se establecen como los valores de los principales bloques. Las estaciones teóricas se colocan sobre la topografía regularmente a lo largo de la sección. En el primer caso de la línea SA97-05 de Araña, son un total de 61 estaciones, establecidas a una distancia de 100 metros una de otra, comenzando desde el SO, y finalizando en el NE. Sobre la línea perpendicular a esa, es decir, SA97-04 son 64 estaciones recorren la sección,

espaciadas de nuevo cada 100 metros. Por otra parte, en Maeztu son 53 para la línea MA97-05, y 79 para MA97-04, usando el mismo espaciado.

El resultado de la anomalía de Bouguer calculada se ha exportado para su análisis cualitativo y cuantitativo que se muestra en el apartado de resultados.

5.4.3. Modelización en 2+1/2 D y dimensiones transversales

Por otra parte, se ha de establecer unas dimensiones mínimas del diapiro, pues lateralmente varía, no extendiéndose hasta el infinito de forma transversal a los cortes. Para ello, se establece la opción 2-3/4D. Con las medidas de los diapiros tomadas de forma virtual con imágenes georreferenciadas, podemos establecer estos límites laterales, afectando estas también a la señal final.

- Para el modelo de Araña sobre la línea SA97-05, SSO-NNE, se establece una medida transversal de 3970 metros.
- Para el modelo de Araña sobre la línea SA97-04, ONO-ESE, se establece una medida transversal de 3730 metros
- Para el modelo de Maeztu sobre la línea MA97-05, SO-NE, se establece una medida transversal de 5500 metros
- Para el modelo de Maeztu sobre la línea MA97-04, NO-SE, se establece una medida transversal de 3250 metros

5.4.4. Variaciones sobre el modelo base

Este primer modelo base se irá complicando, recalculando la respuesta a diferentes modificaciones. Se han hecho un total de tres modificaciones sobre todos los modelos base. La primera se usará un diapiro como el establecido en la figura 5 (Apartado de heterogeneidades de los diapiros), estableciendo capas paralelas a las paredes del diapiro. La segunda modificación sobre el modelo base es una variación en profundidad de la densidad. La tercera corresponde en un cambio de la densidad de todo el cuerpo, asumiendo una composición más compleja de la sal. La última modificación atiende a la modelización de un almacén de hidrógeno sobre el modelo homogéneo del diapiro.

Los resultados de la modelización se representan en un diagrama de anomalía de Bouguer calculada (mGal) en función de la distancia. Estos perfiles de anomalía se compararán y analizarán en el apartado de resultados.



Figura 21 Leyenda en detalle de los modelos y sus variaciones (Figuras 22, 23, 24 y 25), con las densidades de la Tabla 4 en uso.

- Variación de densidad en profundidad por capas horizontales

La segunda modificación atenderá a cambios de densidad en función de la profundidad. Así pues, el diapiro en superficie se le ha supuesto una densidad de halita pura, teniendo el primer límite a 500 metros de profundidad, aumentando por compactación a 2.2 g/cm³. Después de esto, cada 1000 metros en profundidad aumenta a 2.24 a los 1500 metros, 2.26 a los 2500 metros, y termina con una densidad más cercana a la del Keuper, de 2.28 g/cm³, con el límite a 3500 metros. Estos límites se han establecido por comparación de datos industriales en otros lugares, donde se ha observado un aumento de densidad en profundidad.

Responden a la necesidad de saber como varía la señal gravimétrica si la densidad del cuerpo varía de forma directa con la profundidad, atendiendo a cambios en la proporción de sal respecto a otras litologías, así como un aumento de la densidad de la sal al estar sometida al peso de la columna de roca (Leyenda Figura 21); (Figuras 22 a), 23 a), 24 a) y 25 a)).

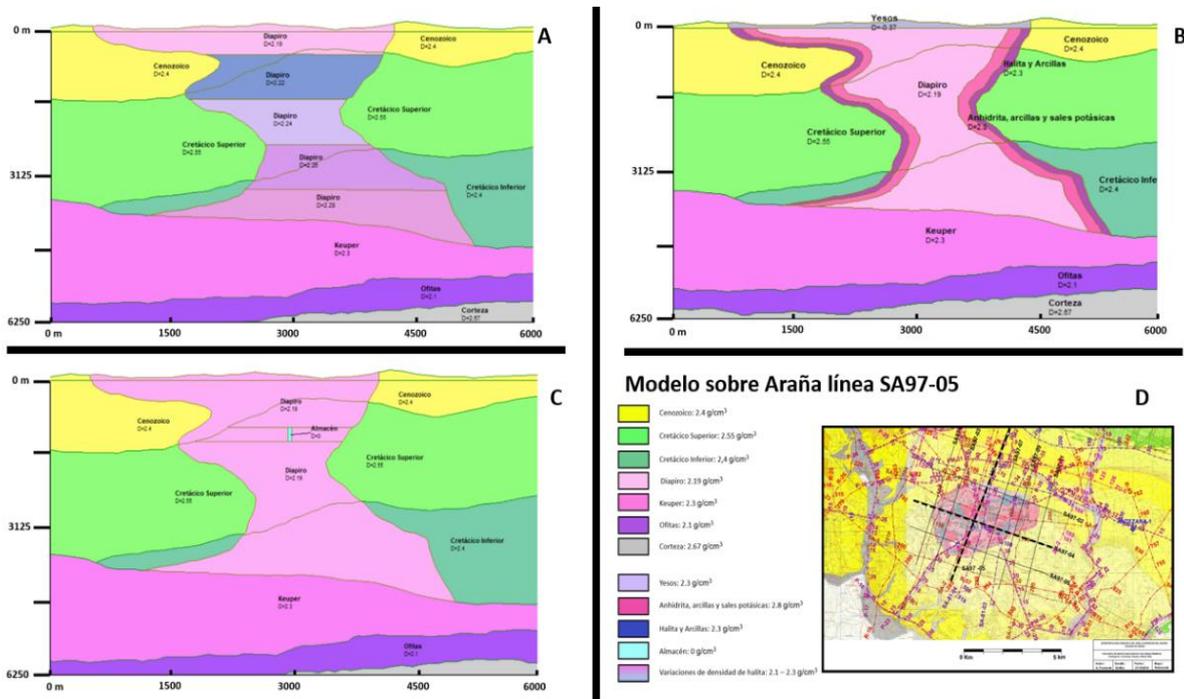


Figura 22 Modelos de densidades del diapiro de Araña sobre la línea 05 (SSO-NNE). a) Diapiro con variación de densidad en profundidad; b) diapiro con capas paralelas a las paredes del mismo; c) diapiro con almacén de hidrógeno; d) Mapa geológico de Araña con la posición de las secciones y leyenda. Los valores de densidad para las diferentes litologías son los de la Tabla 3.

- Variación de capas paralelas a las paredes del diapiro

Para el primer modelo modificado del original, tanto en Maeztu como Araña, se han separado los dos diapiros en tres capas principales, basandonos en (Pinto et al., 2002; Pichat, 2022; Duffy et al., 2023), todas ellas se asumen concéntricas, y, puesto que el modelo es sencillo y sin haber hecho un estudio de la estructura interna de Araña, no tendrán pliegues complejos.

Se establece una primera capa paralela a las paredes de entre 50 y 100 metros, compuesta por halita principalmente, junto con una cantidad considerable de arcillas, por lo que se le da una densidad de 2.3 g/cm^3 , similar a la capa del Keuper. Paralela a esta, una capa conjunta de Anhidrita, con densidades altas de 2.9 , junto con sales potásicas y arcillas. La presencia de arcillas hace bajar la densidad a 2.8 g/cm^3 , pese a que el cuerpo es anhidrita en mayor parte. Esta capa posee entre los 100 y los 150 metros de espesor, y se describe como presente en las antiguas labores de minería (Eguiluz & Llanos, 1988; Frankovic et al., 2016). El núcleo se establece como de halita, mientras que en superficie, en la extensión del diapiro, se supone todo lo que se eleve del datum de referencia para la profundidad, hasta el nivel de la topografía, como yesos, ajustandonos de este modo a la cartografía geológica de referencia (Olivé Davó et al., 1977); (Figuras 22 b), 23 b), 24 b) y 25 b)).

- Variación de densidad sobre todo el cuerpo homogéneo del diapiro

La tercera modificación sobre el modelo base atiende a una variación de la densidad en todo en cuerpo. Se ha asumido que el diapiro posee una densidad de halita, sin embargo, la cantidad de heterogeneidades pueden hacer variar este valor. Por tanto, se ha aumentado la densidad de todo el cuerpo, yendo del punto extremo de un cuerpo homogéneo de halita de baja densidad, como casos en los que la sal ocupa más del 95% del volumen en el Golfo de Mexico (Duffy et al., 2023), hasta una densidad igual a la establecida como Keuper, al ser esta la capa evaporítica en la que se da origen a los domos salinos. Las densidades establecidas han sido 2.1 g/cm^3 , 2.15 g/cm^3 , 2.2 g/cm^3 , 2.25 g/cm^3 y 2.3 g/cm^3 .

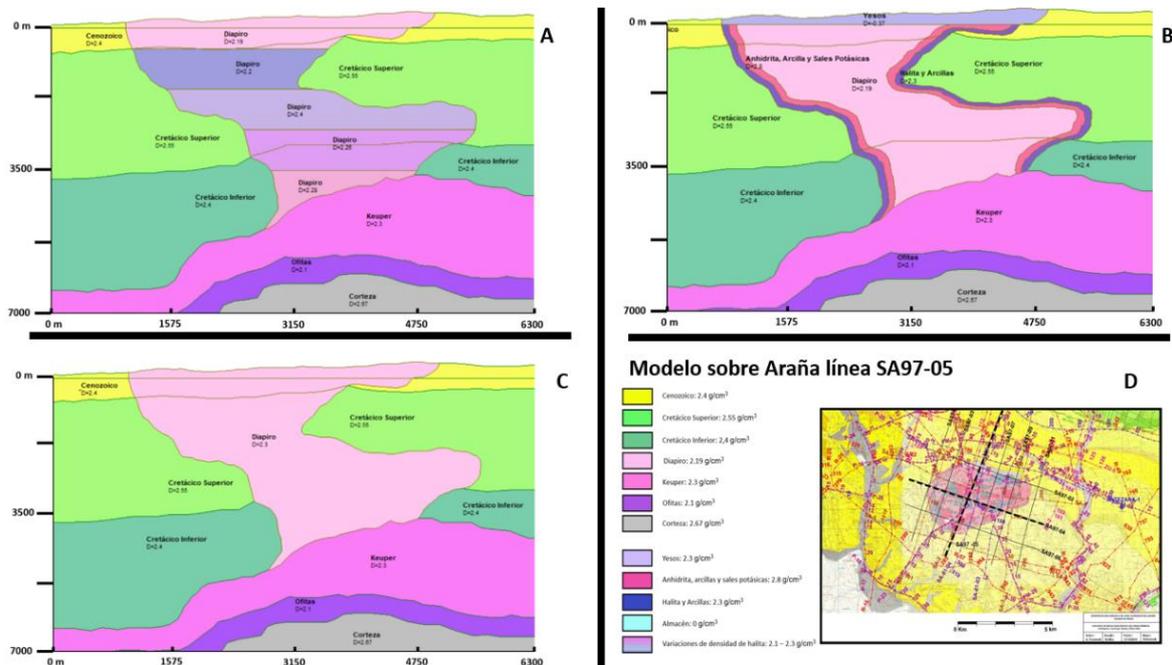


Figura 23 Modelos de densidades del diapiro de Araña sobre la línea 04 (ONO-ESE). a) Diapiro con variación de densidad en profundidad; b) diapiro con capas paralelas a las paredes del mismo; c) diapiro con almacén de hidrógeno; d) Mapa geológico de Araña con la posición de las secciones y leyenda. Los valores de densidad para las diferentes litologías son los de la Tabla 3.

Finalmente, se ha generado un bloque sencillo en el núcleo del diapiro para simular la existencia de un almacén de hidrógeno. Para esto, se han establecido unas medidas de 300 metros de altura, 50 metros de largo y 50 de ancho. De este modo, da un total de 750.000 m³ de almacén. Las dimensiones son producto de tomar como referencia el almacén de Clemens (Tarkowski, 2019) Se ha simplificado a un prisma rectangular y no a una elipse de revolución, con un volumen final que supera con creces los 580.000 m³ de Clemens (Crotofino, 2016).

- Variación con almacén de Hidrógeno

Para la modelización del depósito de hidrógeno, se han establecido una profundidad del techo del almacén de 1 km en ambos diapiros, siendo proxima a la profundidad de Clemens, mientras que su posición está determinada por la geometría de los mismos.

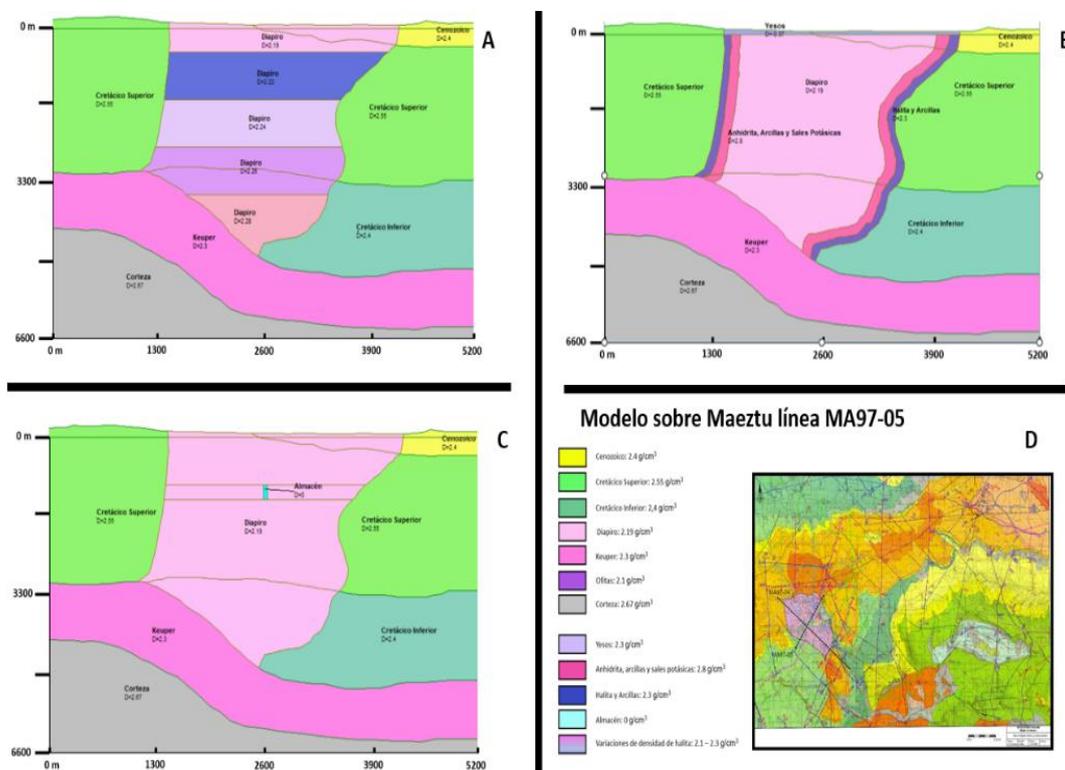


Figura 24 Modelos gravimétricos del diapiro de Maeztu sobre la línea 05 (SSO-NNE). A) Diapiro con variación de densidad en profundidad; B) diapiro con capas paralelas a las paredes del mismo; C) diapiro con almacén de hidrógeno; D) Mapa geológico de Araña con la posición de las secciones y líneas sísmicas y leyenda.

Se ha tomado como densidad de la cavidad, la densidad del hidrógeno en condiciones de presión de 100 bar, al ser operativas entre los 60 y los 180 bar estas instalaciones, y temperatura a un km de profundidad, que utilizando gradientes geotérmicos en las proximidades (MyA Ingeniería, 2018) de 3°C cada 100 metros, establecemos como unos 45°C en el almacén. Por tanto, el hidrógeno a esas temperaturas y presiones tiene una densidad muy parecida a la de condiciones atmosféricas, aproximando a 0.09 kg/m³, que pasado a

g/cm^3 es casi cero. Así pues, en el modelo se utilizará la densidad de 0 g/cm^3 (Figuras 22 c), 23 c), 24 c) y 25 c)).

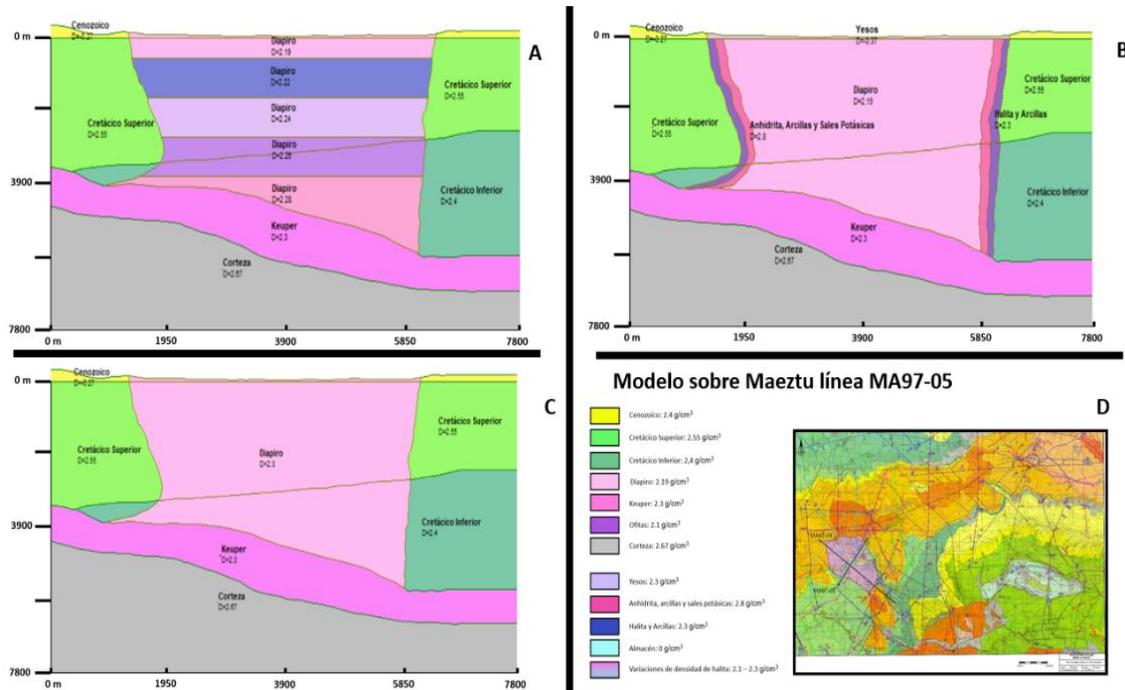


Figura 25 Modelos gravimétricos del diapiro de Maeztu sobre la línea 04 (ONO-ESE). A) Diapiro con variación de densidad en profundidad; B) diapiro con capas paralelas a las paredes del mismo; C) diapiro con almacén de hidrógeno; D) Mapa geológico de Araña con la posición de las secciones y líneas sísmicas y leyenda.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. Resultados de la modelización de Araña

Los resultados de las anomalías gravimétricas de Bouguer calculadas para los diferentes modelos del diapiro de Araña, se muestran en las figuras 26, 27, 28 y 29. En todos los casos el diapiro genera un mínimo de anomalía de diferente amplitud y con variaciones menores de longitud de onda.

Comparación del modelo homogéneo con diferentes densidades. Sección SSO-NNE (sobre línea SA97-05)

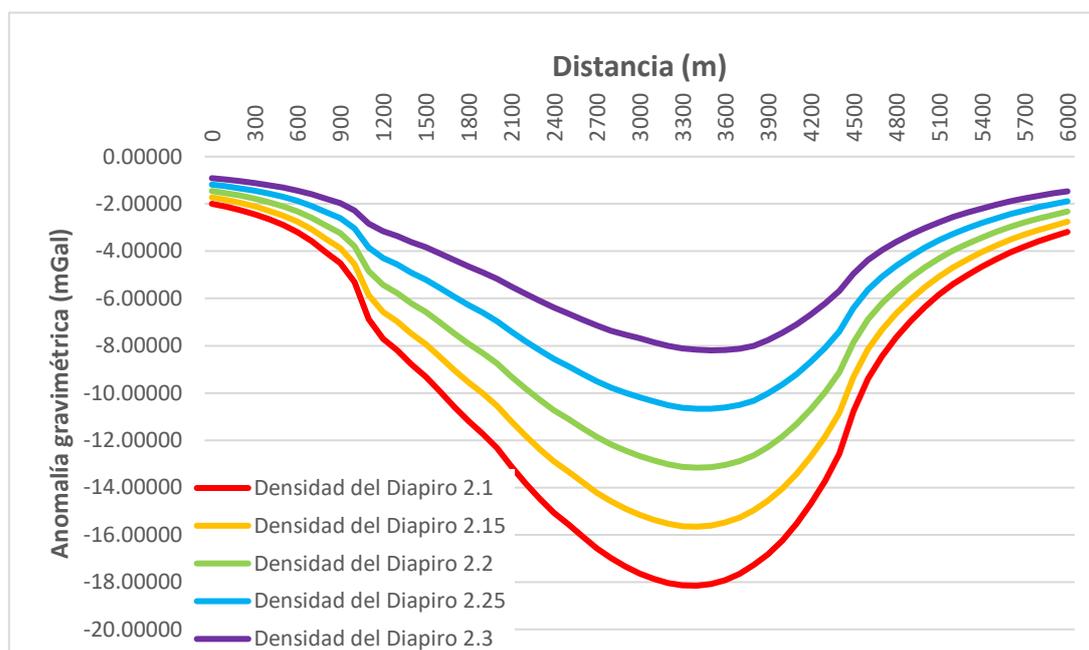


Figura 26 Valores de anomalía de Bouguer calculada sobre el modelo del Diapiro de Araña (Sección SA97-05) para un diapiro homogéneo con diferentes densidades.

En esta primera imagen (Figura 26), se comparan los valores de densidad sobre todo el cuerpo, variando el valor total desde los 2.1 g/cm³ hasta los 2.3 g/cm³, usando intervalos de aumento de 0.05 g/cm³.

Los resultados indican que los valores con densidades más bajas son los que dan una anomalía gravimétrica negativa más marcada. En los bordes, donde el diapiro no se encuentra directamente por debajo, la diferencia entre curvas es mínima, mientras que en el centro del mismo, donde el cuerpo llega a mucha profundidad hasta juntarse con el Keuper, la diferencia es máxima. El rango de amplitud varía entre los -8 y los -18 mGal, mientras que la longitud de onda en este caso no varía, manteniéndose cerca de los 6000 m. La forma de las curvas es asimétrica, y marca que el flanco NNE, más alejado del origen del perfil posee una estructura algo más verticalizada y con menos salientes, pues es más abrupta la forma en la que las curvas se juntan, mientras que el flanco SSO posee un borde abrupto indicando justo el comienzo del saliente del diapiro en superficie, cerca del primer kilómetro de perfil. Cuanto

menor densidad, más brusco es el descenso de la curva de anomalía. En este mismo flanco, las curvas se separan más gradualmente, producto de la geometría compleja y los cambios de volumen del diapiro en profundidad.

- Comparación de modelos con aumento de densidad en profundidad y con capas concéntricas y paralelas a las paredes del diapiro. Sección SSO-NNE (sobre línea SA97-05)

Por otra parte, en la figura 27 se establece la anomalía del diapiro base, siendo la curva azul, donde se ha supuesto una densidad homogénea del diapiro de 2.19 g/cm³, y sobre esta se comparan cambios de densidad y heterogeneidades en profundidad, mediante capas horizontales, y también las heterogeneidades del diapiro en capas paralelos entre sí y concéntricas al mismo, producto de pliegues entre capas más y menos competentes.

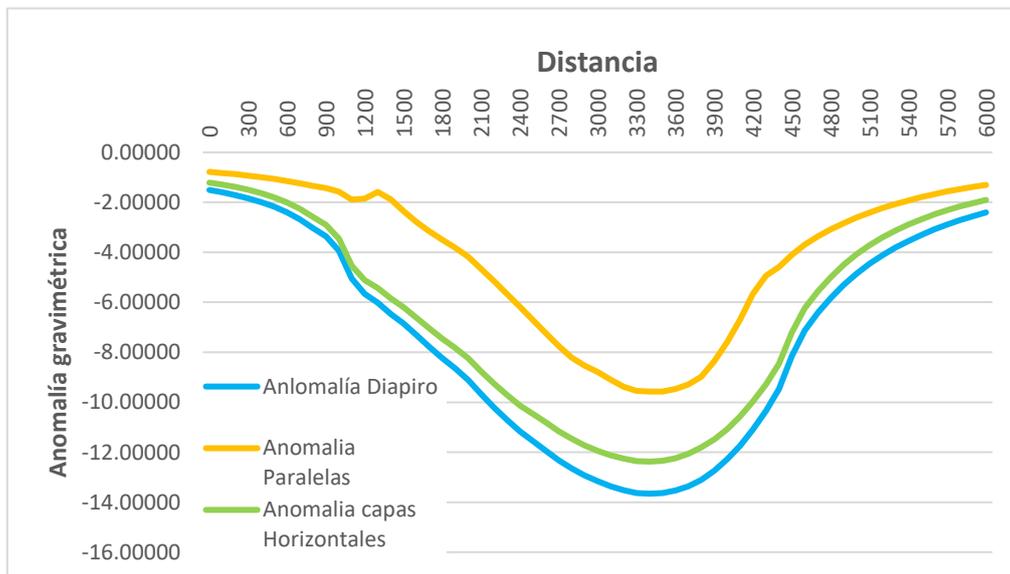


Figura 27 Valores de anomalía de Bouguer calculada sobre el modelo del Diapiro de Araña (Sección SA97-05) para un diapiro con diferentes densidades en función de la profundidad (Anomalia capas Horizontales) y un diapiro con capas concéntricas y paralelas a las paredes del diapiro (Anomalia paralelas).

En este último caso, estas capas se acercan a superficie, siendo la de anhidrita bastante densa, generando un pico más positivo en el flanco SSO, pasados los 1200 metros, así como el descenso previo de la capa de halita y arcillas, con densidades bajas. Esto implica que en caso de un diapiro con capas de este tipo, la longitud de onda se verá reducida como ocurre en este caso. La forma compleja del diapiro de Araña da como resultado que la capa más densa de anhidrita se repliegue siguiendo las paredes y salientes del diapiro, implicando que a geometrías más complejas, la superficie de esta capa será mayor, y por tanto, la anomalía gravimétrica registrada se aleje en gran medida de los resultados de los otros modelos, acercándose la respuesta a la señal de Araña con densidad de 2.3 g/cm³. Por otra parte, las capas horizontales apenas se dispersan de la señal del diapiro base, pues las máximas superficies están en la zona más superficial principalmente, mientras que las densidades más

altas están demasiado profundas. La mayor diferencia vuelve a estar en la zona central, donde la continuidad del diapiro en profundidad es más alta, dando un rango de variación próximo entre -9 y -11 mGal, alejado de casos en los que el cuerpo es homogéneo y posee densidades muy bajas.

- Comparación de modelos con aumento de densidad en profundidad y con capas concéntricas y paralelas a las paredes del diapiro. Sección ONO-ESE (sobre línea SA97-04)

Algo similar ocurre en la figura 28, siendo el perfil longitudinal (ONO-ESE) de Araña, perpendicular al expuesto previamente. En este caso, es sobre el flanco ESE, el más alejado del perfil, donde pasados los 4800 metros, distancia en la que el diapiro deja de verse en superficie, donde las curvas se juntan. Mientras que inmediatamente antes del punto, la curva de anomalía de las capas paralelas a las paredes del diapiro se aleja rápidamente de las dos anteriores. Esto se debe a que, debido a la geometría en este punto del diapiro, la capa de anhidrita, que mantiene un espesor constante, se coloca casi horizontal, quedando muy cerca de superficie, aumentando de este modo la superficie de la misma sobre las estaciones, y ocupando gran parte de esta cornisa. Resultado de esto, la longitud de onda para la curva de anomalía de capas paralelas a las paredes es bastante inferior que las otras dos a comparar. De modo contrario al anterior perfil, la zona del comienzo del corte es más regular, y por tanto, las curvas se siguen sin haber muchas variaciones, y descendiendo a valores de anomalía cada vez más bajos de forma algo abrupta, indicando que este flanco del diapiro es algo más recto y vertical. La amplitud varía poco, entre -12 y -13 mGal.

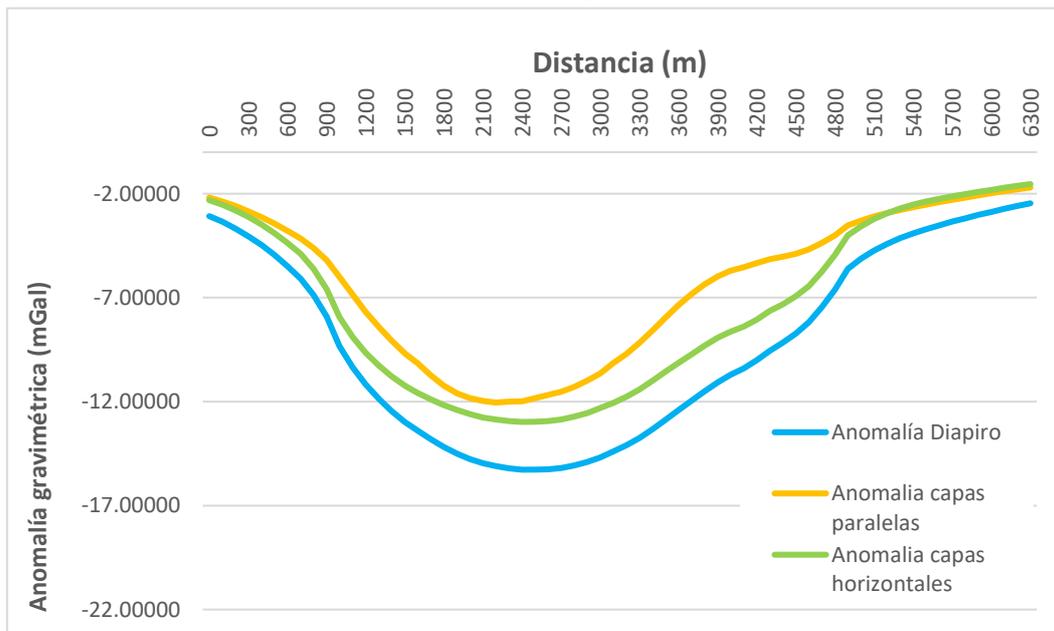


Figura 28 Valores de anomalía de Bouguer calculada sobre el modelo del Diapiro de Araña (Sección SA97-05) para un diapiro con diferentes densidades en función de la profundidad (Anomalía capas Horizontales) y un diapiro con capas concéntricas y paralelas a las paredes del diapiro (Anomalía paralelas)

- Comparación del modelo homogéneo con diferentes densidades. Sección ONO-ESE (sobre línea SA97-04)

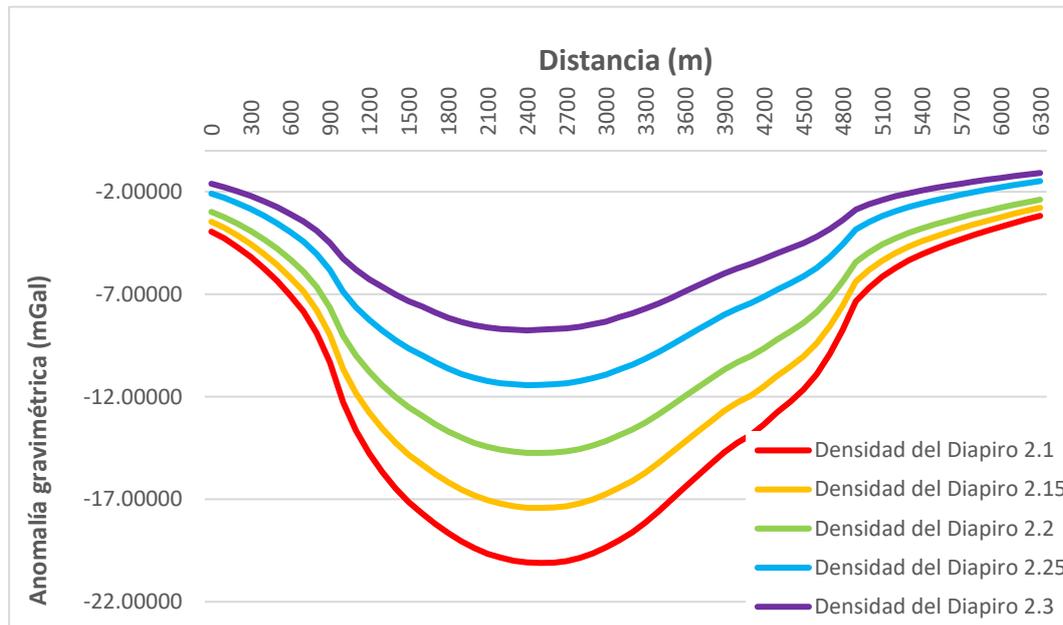


Figura 29 Valores de anomalía de Bouguer calculada sobre el modelo del Diapiro de Araña (Sección SA97-05) para un diapiro homogéneo con diferentes densidades.

Con la figura 29 pueden sacarse conclusiones similares. Una vez más, la anomalía máxima la genera el cuerpo al que se le ha atribuido una menor densidad, en este caso 2.1. La diferencia máxima entre las curvas ocurre en el centro, donde el diapiro llega a conectarse con el Keuper. Este rango de amplitud máxima varía entre los -9 mGal y los -20 mGal. En esta sección, las amplitudes máximas están en los modelos homogéneos con densidades de 2.1, mientras que los modelos con densidad homogénea de 2.2 g/cm³ se asemejan a los valores de los modelos por capas de la figura 28. Los cambios abruptos en la curvatura en los 4800 metros de distancia marcan la aparición del diapiro, siendo claro en todas las densidades. La aproximación de las curvas en el flanco ENE, más próximo este punto al origen del corte, marcan unas paredes de la estructura más verticalizadas y con menor complejidad geométrica, estando próximo a los 900 metros del perfil. La longitud de onda en este caso no varía entre las curvas, estando cerca de los 5000 metros de forma constante.

- Comparación de amplitudes máximas de los modelos de ambas secciones.

Finalmente, en la figura 30 se representan los valores máximos de anomalía respecto a todos los modelos generados, diferenciando entre los dos perfiles de Araña. Con esta gráfica se pueden sacar diferentes conclusiones. En un primer momento, que los valores de anomalía negativa siempre son mayores en el perfil de longitudinal SA97-04, ONO-ESE. También destaca la potencia del cenozoico, variando entre los dos modelos. Al estar midiendo anomalía gravimétrica, siendo esta el contraste de densidades entre el diapiro y la geología

que lo rodea, las densidades algo bajas de los materiales cenozoicos implican que el contraste entre estas rocas y el diapiro sea menor

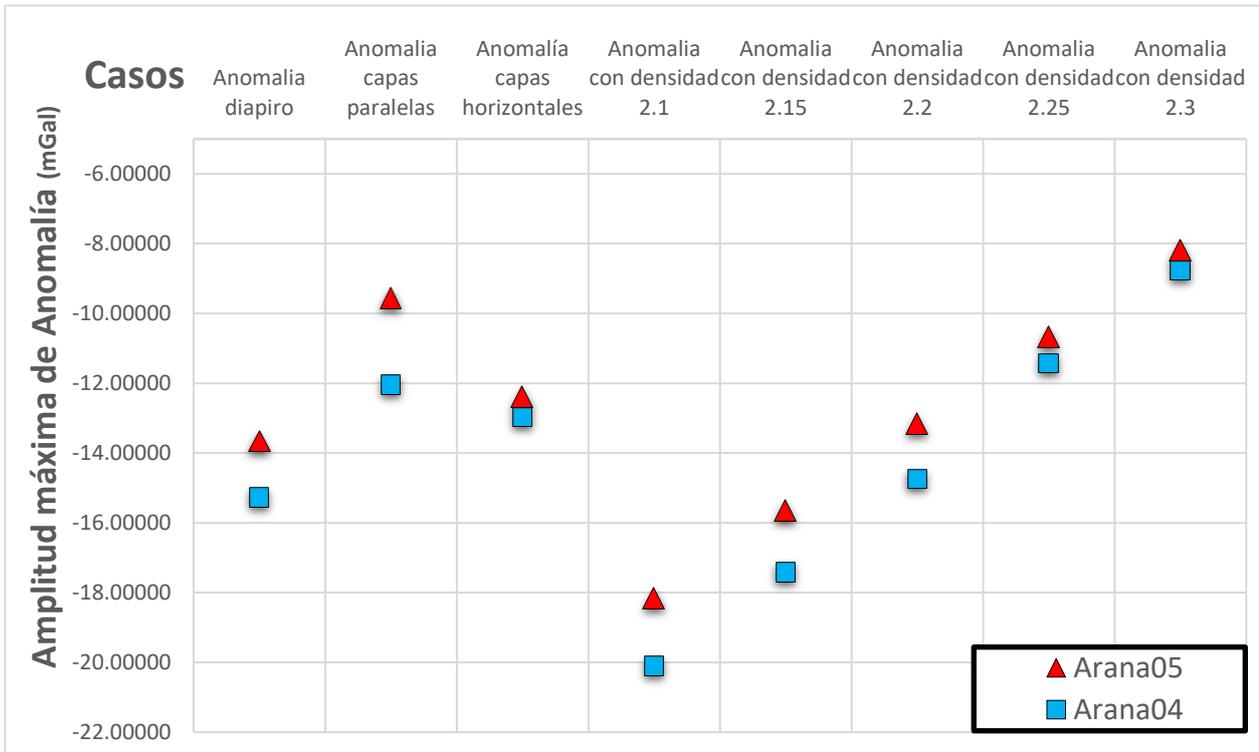


Figura 30 Representación de los valores de amplitud máxima de las anomalías de Bouguer para los modelos generados sobre el diapiro de Araña, diferenciando entre perfil transversal y longitudinal (Arana05 y Arana04 respectivamente)

En el caso contrario de Araña04, el contraste es más marcado al poseer mayor superficie de contacto con litologías del cretácico, con densidades de 2.55 g/cm³ respecto al diapiro de 2.19 g/cm³. De igual modo ocurre con la superficie del diapiro sobre el Keuper. Al tener una menor área de contacto con las arcillas y evaporitas del Keuper, y sí con los materiales del Cretácico Inferior, el contraste de densidad es mayor en Araña04. Esta diferencia se reduce al aumentar los valores de densidad de todo el diapiro, implicando que muy posiblemente sea esta diferencia de contraste entre las litologías en profundidad, pues el hecho de que no varíen linealmente implica que no está relacionado con las dimensiones de ambos perfiles.

Por otra parte, las variaciones entre los modelos de capas dejan ver que la diferencia de amplitud de las anomalías es mayor entre los perfiles con el modelo de capas paralelas a las paredes del diapiro. Como ya se ha recalcado, la geometría compleja y los salientes permiten aumentar la superficie de capas de mayor densidad. La diferencia entre geometrías de los dos perfiles da tal diferencia. El modelo de capas horizontales por otra parte posee un comportamiento similar al modelo con densidad general de 2.2 a 2.25, siendo próximo este valor a la media de las densidades usadas.

6.2. Resultados de la modelización de Maeztu

- Comparación de modelos con aumento de densidad en profundidad y con capas concéntricas y paralelas a las paredes del diapiro. Sección SSO-NNE (sobre línea MA97-05)

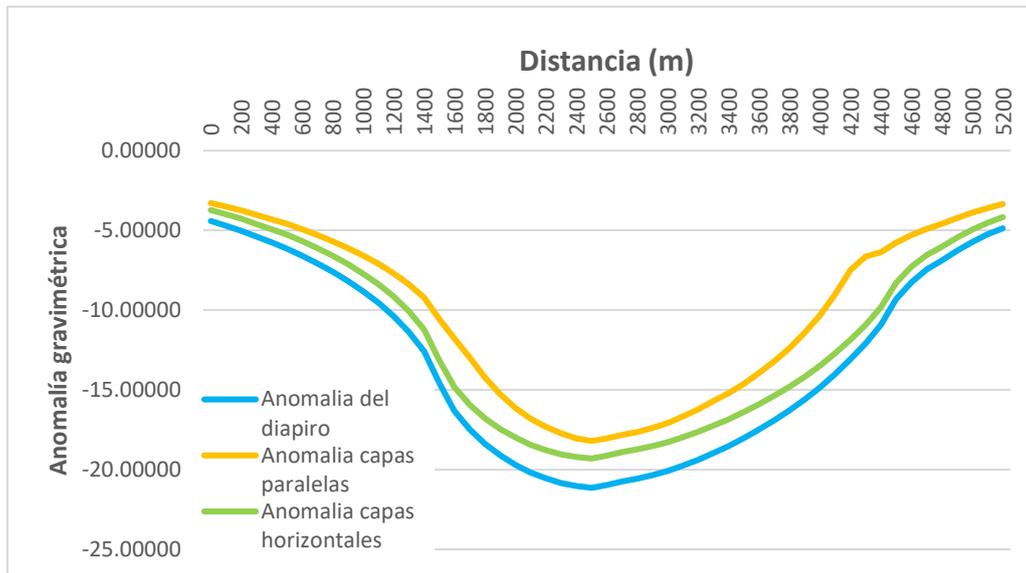


Figura 31 Valores de anomalía de Bouguer calculada sobre el modelo del Diapiro de Maeztu (Sección MA97-05) para un diapiro con diferentes densidades en función de la profundidad (Anomalia capas Horizontales) y un diapiro con capas concéntricas y paralelas a las paredes del diapiro (Anomalia paralelas)

En cuanto a Maeztu, el perfil MA97-05 con los modelos de capas graficados en la figura 31, dan un asimetría de las curvas que señala otra vez la geometría del cuerpo, siendo el flanco donde comienza en perfil, es decir, el lado SO, mucho más vertical que el borde NE del diapiro de Maeztu. Las capas de anhidrita que llegan a superficie marcan la máxima diferencia de anomalías entre los modelos. De nuevo, el modelo de capas horizontales con aumento de espesor en profundidad se aproxima más a la respuesta del modelo de diapiro base, teniendo un rango de amplitudes máximas desde -18 mGal hasta los -19 mGal. La longitud de onda marca que el modelo de capas concéntricas al núcleo del diapiro, es más reducida que las demás curvas, con unos 4100 metros respecto a los 5200 de las otras. En este caso, los dos modelos se aproximan a la respuesta que da un modelo homogéneo con densidad de entre 2.2 y 2.25 g/cm³.

- Comparación del modelo homogéneo con diferentes densidades. Sección SSO-NNE (sobre línea MA97-05)

Las variaciones de densidad sobre todo el cuerpo, dan una asimetría, y marcan la forma de nuevo la geometría del cuerpo, sobre todo con los valores de densidad del diapiro más bajos (Figura 32). Una vez más, las trazas de anomalía se ordenan según la densidad en el orden esperado.

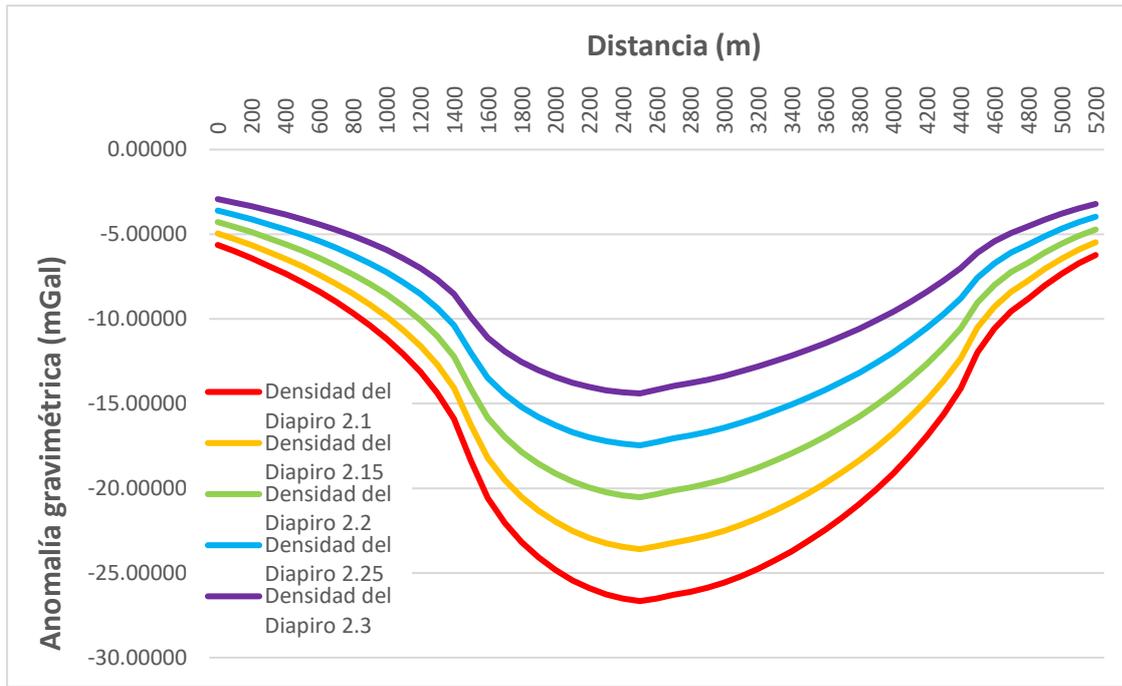


Figura 32 Valores de anomalía de Bouguer calculada sobre el modelo del Diapiro de Maeztu (Sección MA97-05) para un diapiro homogéneo con diferentes densidades.

Destaca, eso sí, el ligero pico en el centro de las líneas de anomalía, siendo esta una disminución de la anomalía máxima negativa que se registra, coincidiendo exactamente, cerca de los 2600 metros del origen del perfil, el entrante que tiene el diapiro. En esta zona se coloca inmediatamente por debajo de la sal, el cretácico inferior. La longitud de onda en todos los casos se mantiene constante en torno a los 5200, mientras que el rango de amplitud máxima varía entre -14 mGal y -26 mGal. Si comparamos con el diapiro de Araña, los máximos han aumentado considerablemente.

- Comparación de modelos con aumento de densidad en profundidad y con capas concéntricas y paralelas a las paredes del diapiro. Sección SSO-NNE (sobre línea MA97-04)

En cuanto al modelo sobre la línea MA97-04, llama la atención que es la primera vez que las líneas de los modelos se cortan (Figura 33). En este caso, el modelo de capas paralelas a las paredes genera una mayor anomalía en el centro del diapiro que el modelo de capas horizontales. Y es que, a diferencia de los otros modelos, y de Araña, este corte posee un aumento de extensión considerable respecto a su corte perpendicular expuesto antes. La geometría sencilla hace que las paredes y las capas paralelas a esta sean muy verticales, sin apenas cambios. Es la sección que genera la curva más simétrica, no resaltando ninguno de los flancos. El rango de amplitud máxima se aproxima, estando entre -21 y -22 mGal. Esta morfología lo clasifica en la bibliografía Carreras Suárez et al. (1976) como forma de chimenea.

Por tanto, con tal extensión del núcleo salino con densidad de la halita, es normal que la anomalía en el centro sea más próxima al modelo base que el modelo de capas horizontales. A su vez, la longitud de onda se estrecha levemente por la capa de anhidrita y la de halita y arcillas, pero sin suponer un cambio demasiado importante.

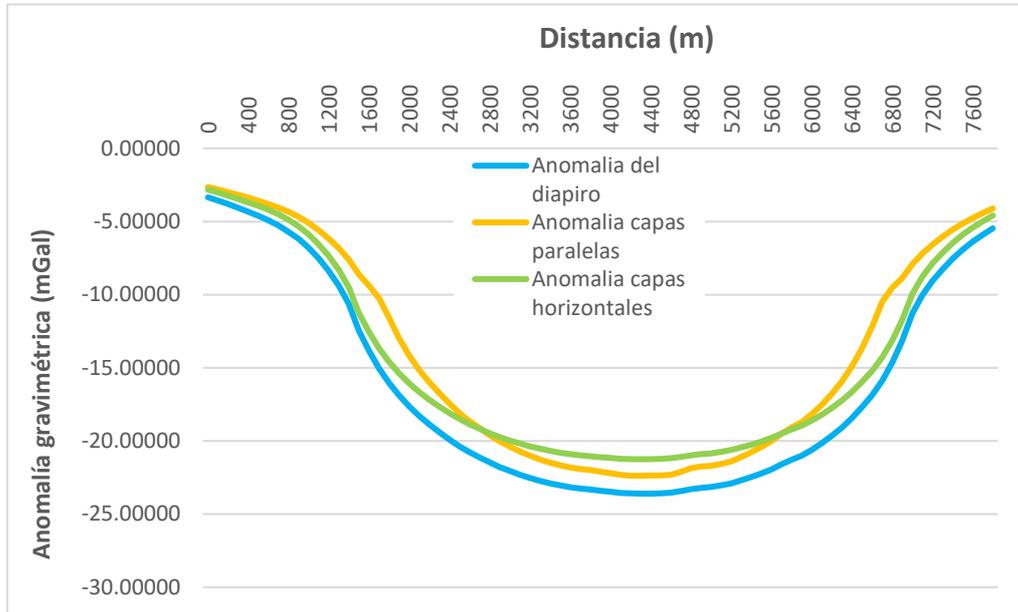


Figura 33 Valores de anomalía de Bouguer calculada sobre el modelo del Diapiro de Maeztu (Sección MA97-04) para un diapiro con diferentes densidades en función de la profundidad (Anomalía capas Horizontales) y un diapiro con capas concéntricas y paralelas a las paredes del diapiro (Anomalía paralelas)

- Comparación del modelo homogéneo con diferentes densidades. Sección ONO-ESE (sobre línea MA97-04)

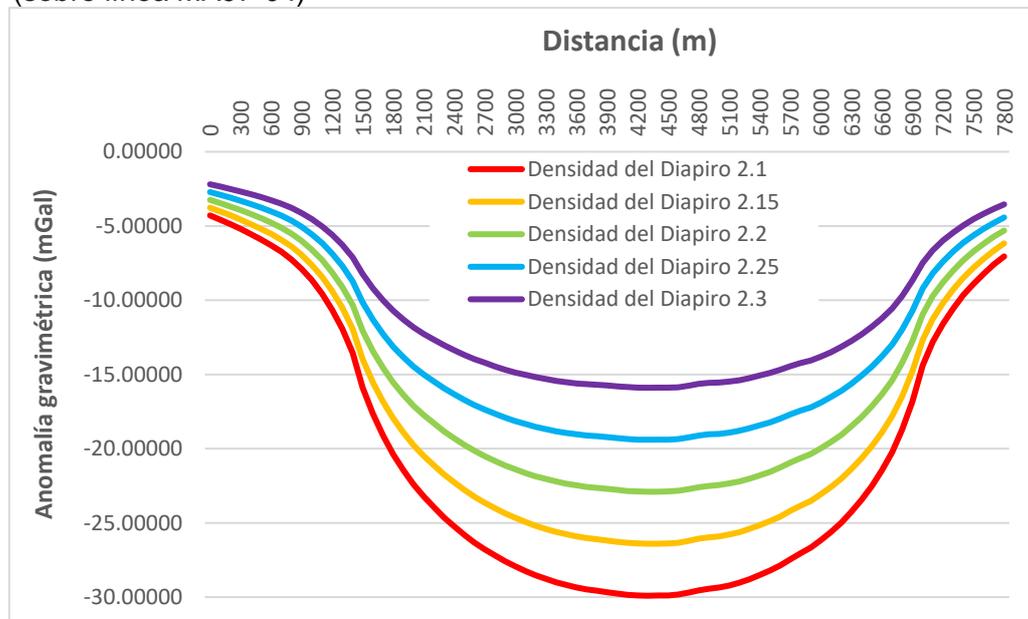


Figura 34 Valores de anomalía de Bouguer calculada sobre el modelo del Diapiro de Maeztu (Sección MA97-04) para un diapiro homogéneo con diferentes densidades.

Las diferencias de respuesta de la anomalía en este perfil (Figura 34) siguen lo esperado y ya comentado en los anteriores gráficos. En este caso, no hay nada reseñable ni a destacar que

se aleje de lo común. Las curvas son bastante simétricas, así como la sección del modelo. El tango de amplitudes máximo va desde -16 mGal a -30mGal, siendo el máximo de anomalía registrado. Esto se debe a la gran masa que supone el diapiro, llegando hasta profundidades que superan las de araña. Este valor es el resultado de aplicar al modelo homogéneo una densidad de 2.1 g/cm³. La longitud de onda es de 6500 metros, y no varía entre las curvas graficadas.

- Comparación de amplitudes máximas de los modelos de ambas secciones.

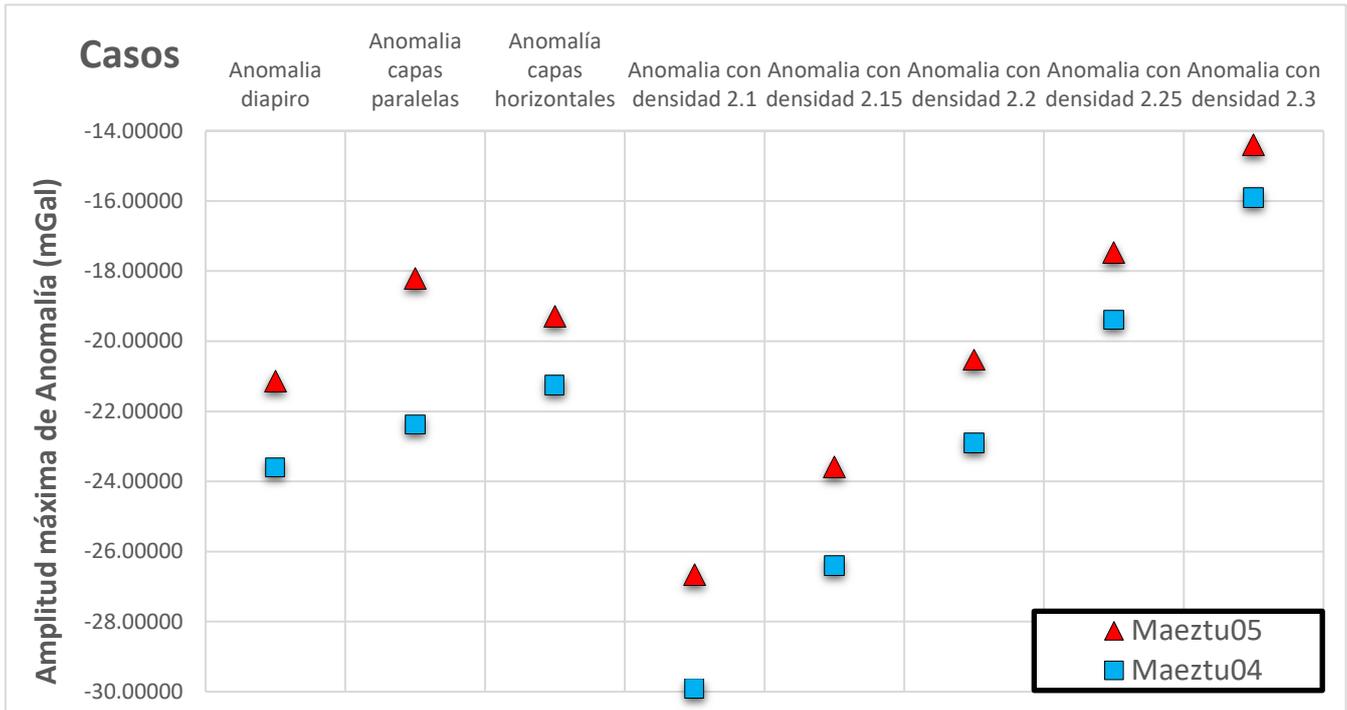


Figura 35 Representación de los valores de amplitud máxima de las anomalías de Bouguer para los modelos generados sobre el diapiro de Araña, diferenciando entre perfil transversal y longitudinal (Araña05 y Araña04 respectivamente).

En este caso, cuando se comparan las amplitudes máximas de la anomalía de ambos perfiles (Figura 35), fijándonos en las variaciones de densidad de todo el cuerpo, la diferencia entre los dos perfiles es algo más constante.

Esto implica que esta vez sí se trata de una variación producto de la mayor extensión del diapiro en la línea 04. La pequeña reducción de diferencia de los perfiles cuando aumentamos la densidad puede deberse a las áreas de contacto con las litologías más densas, pero no queda tan claro como con los modelos de Araña.

El modelo de capas paralelas da de nuevo una mayor diferencia entre los perfiles, destacando que en este caso, el modelo de Maeztu 04 posee una amplitud máxima negativa menor que el modelo de capas horizontales. Con estos datos podemos afirmar que si la extensión es lo suficientemente grande, y con diapiros sencillos, las capas concéntricas se acercan más al modelo base con densidad de la halita. En este diapiro, las capas horizontales poseen una

amplitud máxima entre un cuerpo homogéneo con densidad de 2.2 y 2.25 g/cm³, pero al contrario que Araña, la diferencia entre los dos perfiles es considerable, siendo debido a la geometría más elíptica del diapiro de Maeztu.

Así pues, los resultados de ambos diapiros se complementan, pues las diferencias de geometría y extensión de los modelos aportan la información necesaria para conocer qué efectos causan diversas propiedades sobre las respuestas calculadas.

6.3. Anomalías de los Almacenes de Hidrógeno

El almacén de Araña se ha ubicado en el centro del diapiro, a una distancia del perfil SA97-05 de 3400 metros, llegando hasta los 3450. Se encuentra a una profundidad de 1000 metros el techo, y su base está a 1300 metros, mientras que por delante y por detrás tiene 25 metros de extensión, completando el prisma propuesto de 300 x 50 x 50 metros semejante al almacén elipse de Clemens. El almacén de Maeztu posee las mismas dimensiones y profundidad. Al poseer una estructura en profundidad más simple, la ubicación se centra de manera más fácil. Así pues, abarca desde los 2700 a los 2750 metros del perfil MA97-05. Una vez generados los modelos con el almacén establecido, se han tratado los datos para su análisis. En un primer momento, se han generado las curvas con la diferencia de los modelos con y sin almacén, para así ver la anomalía resultante respecto al estado actual sin el almacén.

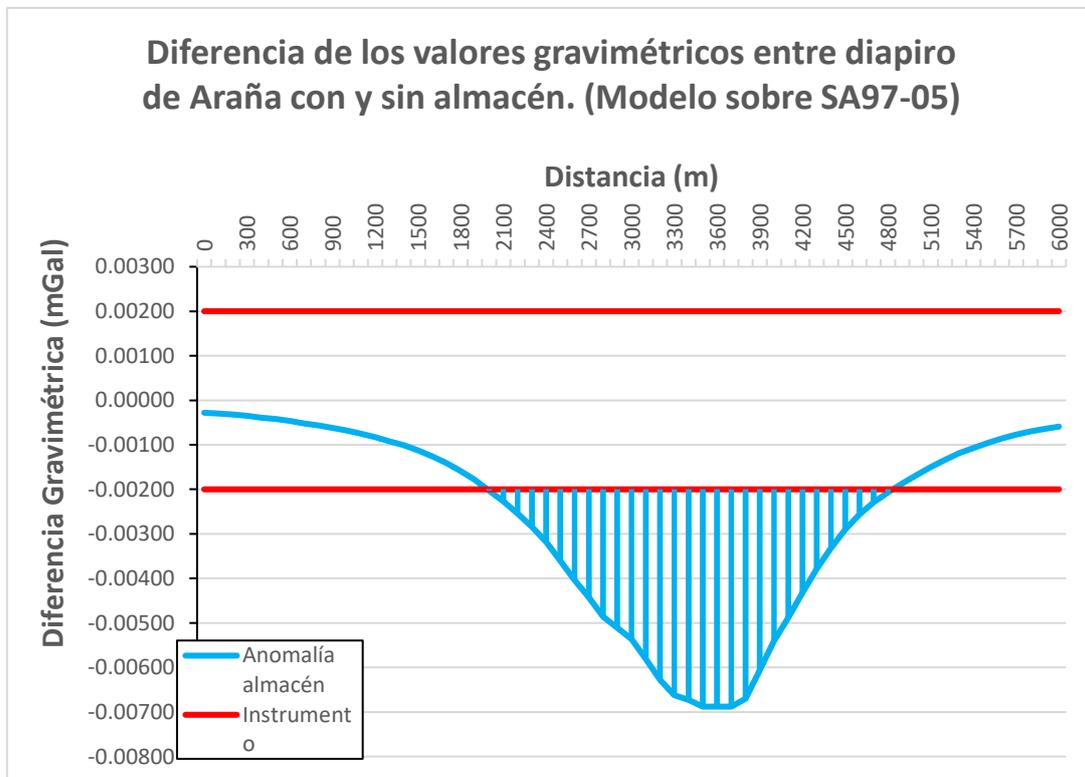


Figura 36 Gráfico de Araña con las anomalías generadas producto de la diferencia del diapiro sin y con almacén de hidrógeno.

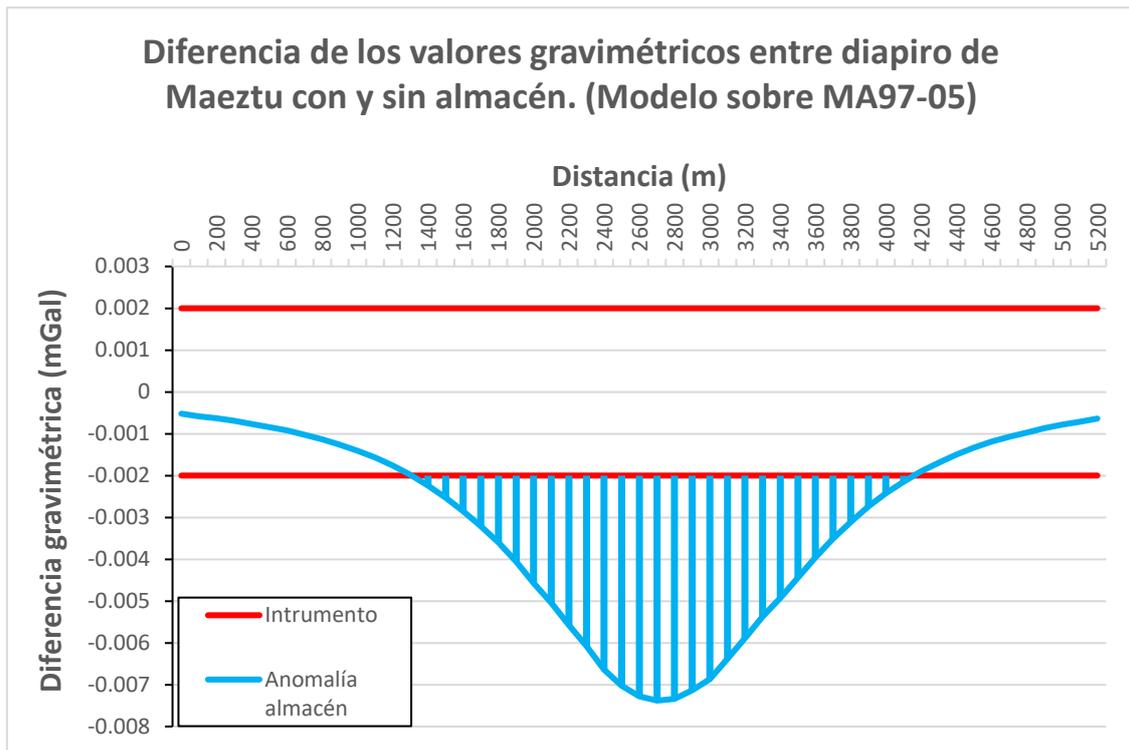


Figura 37 Gráfico de Maeztu con las anomalías generadas producto de la diferencia del diapiro sin y con almacén de hidrógeno.

Para ello, se ha usado el modelo de diapiro sencillo, donde se aplica una densidad a todo el cuerpo de 2.19 g/cm^3 , simulando que el cuerpo es todo halita. Aplicado sobre esta curva, se colocan los límites de 0.002 mGal establecidos, basados en los diferentes registros de equipos CG-5 y CG-3 que tienen esta sensibilidad (Scintrex Autograv System, 2012). Quedando de forma gráfica, la medida en la que el almacén produce una señal gravimétrica detectable en estos casos favorables (Figuras 36 y 37), se observa que en ambos casos, la anomalía ronda los -7 microgales , superando por cinco microgales la sensibilidad de los equipos. En Araña, la sensibilidad de las medidas es de 3800 m de anchura, mientras que en Maeztu es de 3000 m . Sin embargo, esta sensibilidad es en los casos más favorables, pudiendo aumentar este rango hasta los 0.005 mGal , por lo que la variación generada por el almacén se registraría solo en las más centrales y próximas medidas.

Posteriormente se ha tratado los datos realizando un mallado mediante interpolación por mínima curvatura a través del perfil, y se han realizado las derivadas horizontal y vertical en estos dos perfiles. En el caso del gradiente vertical, se aplica para establecer de forma más precisa el centro de la estructura del almacén, siendo este el valor mínimo. Por otra parte, el gradiente horizontal permite observar los bordes del almacén, definiendo la estructura lateralmente. Estas nuevas curvas han sufrido un proceso posterior de filtrado, usando una convolución simétrica de 5×5 del mallado de derivadas inicial, mediante mínimos cuadrados. Tal y como se observa en las figuras 38 y 39, los gradientes tanto vertical como horizontal marcan la ubicación del almacén de hidrógeno.

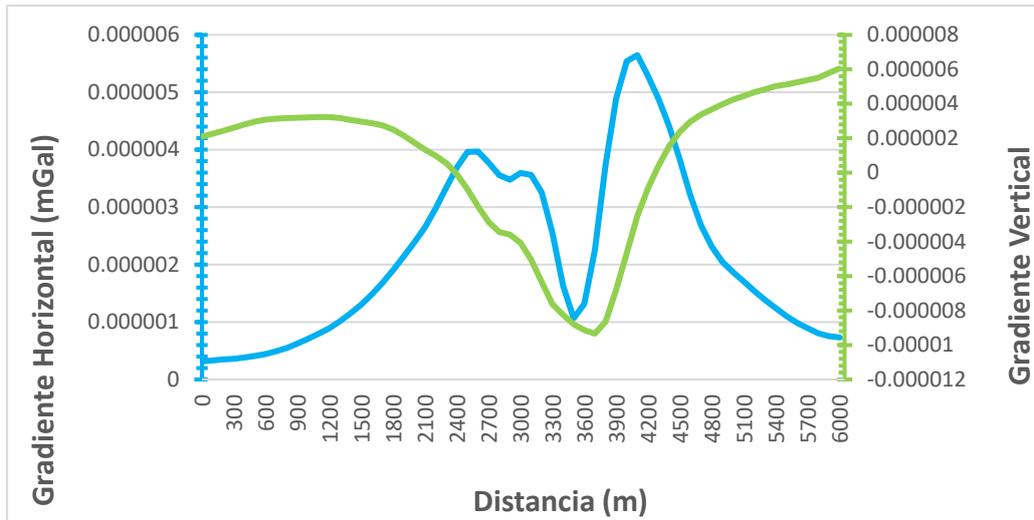


Figura 39 Gradiente horizontal (azul) y gradiente vertical (verde) sobre el modelo de Araña, línea SA97-05

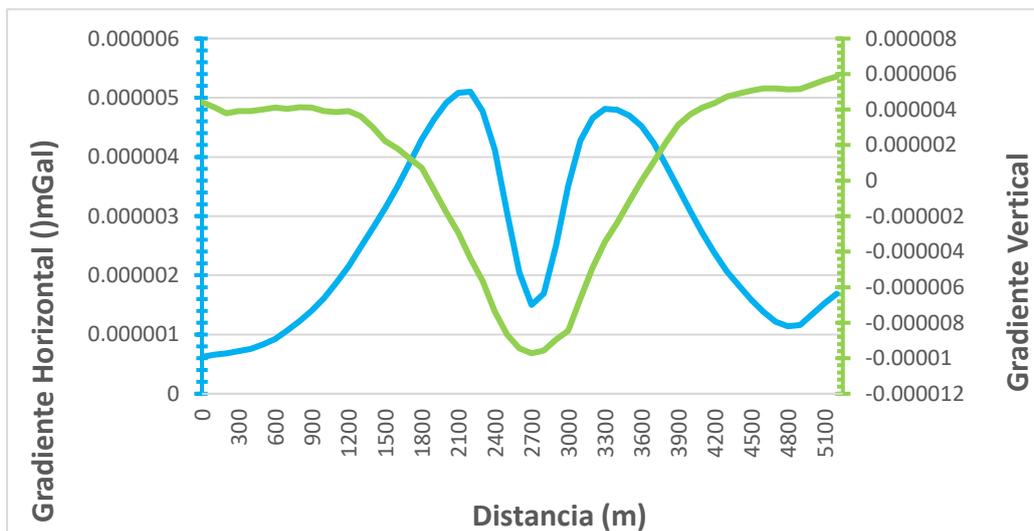


Figura 38 Gradiente horizontal (azul) y gradiente vertical (verde) sobre el modelo de Maeztu, línea MA97-05

En el caso de Araña, la complejidad de la estructura hace que las curvas no sean todo lo claras como si es el caso de Maeztu. En ambos casos, la derivada horizontal aproxima los límites y la verticalidad del almacén, pero no consigue marcar los laterales, teniendo entre ambos máximos una distancia de 900-1000 metros, mientras que la cavidad está en 30 metros. Sin embargo, la derivada vertical en Maeztu tiene el máximo entre 2700 y 2800 metros, por lo que marca a la perfección la ubicación de la anomalía. Por otro lado, la anomalía vertical en Araña se desvía, marcando un mínimo a los 3700 metros, cuando debería de estar en 3400-3500 metros, como sí está el mínimo que dan la derivada horizontal. Este error es producto del procesado, pues al interpolar los datos, se pueden producir leves desplazamientos en los mínimos de las curvas. Estos resultados de gradientes dejan claro que es posible detectar y definir en parte un almacén con el uso de métodos de microgravimetría. Los resultados de los gradientes gravimétricos indican que estos valores permiten detectar y caracterizar un almacén de hidrógeno de manera más fiable que el uso exclusivo del valor de anomalía de Bouguer residual.

7. CONCLUSIONES

A lo largo del trabajo, se han realizado modelos gravimétricos longitudinales y transversales de dos diapiros en la zona centro-sur de la cuenca Vasco-Cantábrica. Los domos salinos escogidos son el Diapiro de Salinas de Araña y el Diapiro de Maeztu, ambos en la provincia de Álava. Para estos, se han supuesto diferentes complejidades basados en datos e información geológica y geofísica:

- Diapiro como un cuerpo homogéneo: Variaciones de densidad aplicadas sobre todo el cuerpo.
- Diapiro como un cuerpo heterogéneo: Variación lateral por capas, o variación de densidad en profundidad

La modelización 2+1/2 D llevada a cabo ha permitido definir las características de la respuesta gravimétrica en cada caso, detectando variaciones en la simetría, amplitud y longitud de onda. En todos los casos, el método gravimétrico es adecuado para la caracterización de la estructura en profundidad. La diferencia de complejidades y geometrías en ambos modelos de los diapiros aporta un rango de casos amplio, en los que se ha aplicado el método gravimétrico con resultados satisfactorios.

Por otra parte, se ha calculado la señal gravimétrica producida por un almacén de hidrógeno en ambos diapiros. Se trata de una caverna de sal con dimensiones similares al almacén de hidrógeno en funcionamiento de Clemens. (Tarkowski 2019).

Los resultados de esta última modelización sobre los modelos base de Araña y Maeztu sugieren una señal gravimétrica residual muy débil (-7 microgales), pero por encima de los 2 microgales mínimos de sensibilidad de los equipos. La longitud de onda es por encima del error de los equipos es suficiente y considerable.

Para la definición y caracterización de los almacenes, resulta mucho más adecuado el uso de gradientes gravimétricos:

- Los gradientes gravimétricos horizontales marcan la verticalidad o inclinación, así como los límites de almacén.
- Los gradientes gravimétricos verticales señalan la posición del centro de déficit de masa del almacén.

Como resultado final, un análisis gravimétrico de los diapiros puede brindarnos información, tanto de su morfología, como un ápice de conocimiento de su estructura y composición interna, pudiendo comparar datos reales con los sintéticos calculados. El uso de estos datos sintéticos puede ser muy útil a la hora de diseñar futuras campañas de exploración para un depósito de hidrógeno, así como para el monitoreo de un almacén en funcionamiento.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Ábalos, B., 2016. Geologic map of the Basque-Cantabrian Basin and a new tectonic interpretation of the Basque Arc. *International Journal of Earth Sciences*, 105(8), pp. 2327-2354.
- Aguado Molina, R. y otros, 2021. *Hidrógeno y su almacenamiento*. A Coruña: Servizo de Publicacións Universidade da Coruña.
- Alcalde, J. y otros, 2014. 3D geologicak characterization of the Hontomín CO2 storage site, Spain: Multidisciplinary approach from seismic, well-log and regional data. *Tectonophysics*, Volumen 627, pp. 6-25.
- Andersson, J. & Grönkvist, S., 2019. Large-scale storage of hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 44, Issue 23, pp. 11901-11919.
- Arora, N. K. & Mishra, I., 2021. COP26: more challenges than achievements. *Enviromental Sustainability* 4, pp. 585-588.
- Ayala, C. & Rey, C., 2009. Capítulo 6. Modelización 2D y 3D. En: *Establecimiento de bases metodológicas para la obtención de cartografía gravimétrica 1:50.000. Aplicación a la modelización 2D y 3D en varias Zonas de la Península Ibérica*. s.l.:s.n.
- Bai, M. y otros, 2014. An overview of hydrogen underground storage technology and prospects in China. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Volumen 124, pp. 132-136.
- Beroiz, C. & Permanyer, A., 2011. Hydrocarbon habitat of the Sedano trough, Basque-Cantabrian Basin, Spain. *Journal of Petroleum Geology*, 34(4), pp. 387-410.
- Blanco, H. & Faaij, A. P., 2018. A reviw at the role of storage in energy systems with a focus on Power to Gas and long-term storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 81, Part 1, pp. 1049-1086.
- Bruthans, J. y otros, 2009. Surficial deposits on salt diapirs (Zagros Mountains and Persian Gulf Platform, Iran): Characterizatio, evolution, erosion and the influence on landscape morphology. *Geomorphology*, Volumen 107, pp. 195-209.
- Burliga, S., 2014. Heterogeneity of folding in Zechstein (Upper Permian) salt deposits in the Klodawa Salt Structure, central Poland. *Geological Quaterly*, 58(3), pp. 565-576.
- Caglayan, D. G. y otros, 2020. Technical potential of salt caverns for hydrogen storage in Europe. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(11), pp. 6793-6805.
- Cámara, P., 2017. Salt and Strike-Slip Tectonics as Main drivers in the Structural Evolution of the Basque-Cantabrian Basin, Spain. En: J. I. Soto, J. F. Flinch & G. Tari, edits. *Permo-Triassic Salt Provinces of Europe, North Africa and the Atlantic Margins*. Madrid: Elsevier, pp. 371-393.
- Cámara, P., 2020. Inverted turtle salt anticlines in the Eastern Basque-cantabrian basin, Spain. *Marine and Petroleum Geology*, Volumen 117.
- Carreras Suárez, F. J., Ramírez del Pozo, J. & Aguilar Tomás, M. J., 1976. *Mapa geológico de España 1:50000. Eulate (139)*. s.l.:Ministerio de Industria y Energía. Instituto Geológico y Minero de España..
- Chivelet, J. M. y otros, 2019. The Late Jurassic - Early Cretaceous Rifting. En: F. R. D. F. Roland Oberhänsli, ed. *The Geology of Iberia: A Geodynamic Approach. Regional Geology Reviews*. s.l.:Springer, pp. 169-249.
- Crotogino, F., 2016. Larger Scale Hydrogen Storage. En: T. M. Letcher, ed. *Storing Energy:with Special reference to Renewable Energy Sources*. Amsterdam: Elsevier, pp. Chapter 20, 411-429.

Crotogino, F., Donadei, S., Bünger, U. & Landinger, H., 2010. *Large-scale hydrogen underground storage for securing future energy supplies*. Essen, 18th World Hydrogen Energy Conference 2010 - WHEC 2010.

Crowther, M., 2015. *Hidrogen? The viable storage option*. [En línea] Available at: <https://www.kiwa.com/48d7d0/globalassets/uk/reports/hydrogen---the-viable-storage-option.pdf> [Último acceso: Septiembre 2022].

Díaz Cordero, G., 2012. El Cambio Climático. *Ciencia y Sociedad. Volumen XXXVII, Número 2*, pp. 227-240.

Duffy, O. B. y otros, 2023. The Role of Salt Tectonics in the Energy Transition: An Overview and Future Challenges. *Tektonika*, 1(1), pp. 18-48.

Eguiluz, L. & Llanos, H., 1988. *El diapiro de salinas de Araña: Un ejemplo de ascenso diapírico modificado por esfuerzos cizallantes*. Granada, IGME. Actas II Congreso Geológico de España 2.

Ferrero Vega, L., 2012. *Análisis de la sensibilidad del método gravimétrico para caracterizar almacenes geológicos profundos*. Madrid(Madrid): s.n.

Frankovic, A., 2010. *Análisis cinemático de la pared de sal Euskal Balea (Golfo de Vizcaya) y de los diapiros salinos de Salinas de Araña y Maestu (Cuenca Vasco-Cantábrica, Álava)*. Leioa(Vizcaya, País Vasco): Universidad del País Vasco.

Frankovic, A., Erguiluz Alarcón, L. & Martínez Torres, L. M., 2016. Geodynamic evolution of the Salinas de Araña diapir in the Basque-Cantabrian Basin, Western Pyrenees. *Journal of Structural Geology*, 83(1), pp. 13-27.

GESSAL. Geología de Exploración y Síntesis, S.L., 2002. *Petroleum system of the Basque-Cantabrian basin (Southwestern sector). A field trip guide book*. Primera ed. Madrid: s.n.

Gillhaus, A., 2010. Natural gas storage in salt caverns - Summary of worldwide projects and consequences of varying storage objectives and salt formations. En: M. Z. Hou, H. Xie & J. S. Yoon, edits. *underground Storage of CO2 and Energy*. Londres: CRC Press. Taylor & Francis Group/Balkema, pp. 191-197.

González García-Conde, A., 2010. *Producción, almacenamiento y distribución de hidrógeno*. [En línea] Available at: http://www2.udg.edu/Portals/88/proc_industrials/5%20-%20Otros%20Combustibles-Hidrogeno.pdf [Último acceso: 30 Marzo 2023].

Hubbert, M. K., 1948. A line-integral method of computing the gravimetric effects of two-dimensional masses. *Geophysics*, 13(2), pp. 215-225.

Instituto Geológico y Minero de España IGME y Laboratório Nacional de Energia e Geologia LNEG, 2015. *Mapa Geológico de de España y Portugal a escala 1:1.000.000*. s.l.:s.n.

Jackson, C. A.-L. & Lewis, M. M., 2012. Origin of anhydrite sheath encircling a salt diapir and implications for the seismic imagin of steep-sided salt structures, Egersund Basin, Northern North Sea. *Journak of the Geology Society*, 169(5), pp. 593-599.

Jackson, M. P. A. & Talbot, C. J., 1989. Anatomy of mushroom-shaped diapirs. *Journal of Structural Geology*, 11(1/2), pp. 211-230.

Kruck, O., Crotogino, F., Prelicz, R. & Rudolph, T., 2013. *Assessment of the potential, the actors and relevant business cases for large scale and seasonal storage of renewable electricity by hydrogen underground storage in Europe*, s.l.: Hyunder.

- Lafuente Martínez, P. V., 2021. *Diseño del hueco de explotación de una cantera de ofitas y selección de la maquinaria de trituración*. Cantabria: Universidad de Cantabria. Escuela Politécnica de Ingeniería de Minas y Energía.
- Martínez del Olmo, W., 2021. Almacenamiento de Hidrógeno en España. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 34(2), pp. 53-59.
- Martínez del Olmo, W., Motis, K. & Martín, D., 2015. El papel del diapirismo de la sal triásica en la estructuración del Prebético (SE de España). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 28(1).
- Morante, J. R. y otros, 2020. *Hidrógeno. Vector energético de una economía descarbonizada*. Cuarta ed. Madrid: Fundación Naturgy.
- Moya Corencia, J., 2018. *Estudio Geológico del domo salino de Araña para su posible utilización como Almacenamiento de Energía*. Madrid(Madrid): Universidad Politécnica de Madrid.
- MyA Ingeniería, 2018. *Estudio en profundidad sobre las posibilidades de aprovechamiento geotérmico en Navarra e identificación de las zonas con mayor potencial*, Pamplona (Navarra): Gobierno de Navarra.
- Olivé Davó, A., Ramírez del Pozo, J. & Riba Arderiu, O., 1977. *Mapa geológico de España 1:50000. Miranda del Ebro (137)*, s.l.: Ministerio de Industria y Energía. Instituto Geológico y Minero de España.
- Ozarslan, A., 2012. Large-scale hydrogen energy storage in salt caverns. *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 37, Issue 19, pp. 14265-14277.
- Pichat, A., 2022. Stratigraphy, Paleogeography and depositional setting of the K-MG Salts in the Zechstein Group of Netherlands - Implications for the development of salt caverns. *Minerals*, 12(4).
- Pinto, V., Casas, A. & Font, X., 1998. Diapiro de Salinas de Araña: ¿Un diapiro con un Overhang? Modelo 3D gravimétrico. *Estudios Geológicos*, Volumen 54, pp. 123-128.
- Pinto, V., Casas, A., Riveri, L. & Lázaro, R., 2002. Modelización gravimétrica 3D de Cardona, Cuenca del Ebro (NE de España). *Acta Geológica Hispánica*, 37(4), pp. 273-284.
- Pinto, V., Casas, A., Rivero, L. & Torné, M., 2005. 3D gravity modeling of the Triassic salt diapirs of the Cubeta Alavesa (northern Spain). *Tectonophysics*, 405(1-4), pp. 65-75.
- Ramos, A. y otros, 2022. Salt control on the kinematic evolution of the Southern Basque-Cantabrian Basin and its underground storage systems (Northern Spain). *Tectonophysics*, 822(229178).
- Reveillere, A. & Hevin, G., 2018. *Future roles of hydrogen in the energy transition and examples of operating and future Hydrogen storages*. Paris, ENERG.
- Rosen, M. A. & Koohi-Fayegh, S., 2016. The prospects for hydrogen as an energy carrier: an overview of hydrogen energy and hydrogen energy systems. *Energy, Ecology and Environment*, 1(1), pp. 10-29.
- Rowan, M. G., Urai, J. L., Fiduk, C. J. & Kukla, P. A., 2019. Deformation of intrasalt competent layers in different modes of salt tectonics. *Solid Earth*, Volumen 10, pp. 987-1013.
- RPS, 2023. *RPS Group*. [En línea] Available at: <https://www.rpsgroup.com/sectors/energy-consultants/storage/energy-and-low-carbon-storage-solutions/underground-gas-storage/> [Último acceso: 30 Marzo 2023].

Scintrex Autograv System, 2012. *CG-5 Operation Manual*. s.l.:s.n.

Smil, V., 2018. *Energy and civilization. A history*. Cambridge: The MIT Press.

Sobolik, S. R. & Ehgartner, B. L., 2012. *Structural integrity of oil storage caverns at a strategic petroleum reserve site with highly heterogeneous salt and caprock*, Albuquerque, New Mexico, USA: Sandia National Laboratories.

Talbot, C. J. & Jackson, M. P. A., 1987. Internal Kinematics of Salt Diapirs. *The American Association of Petroleum Geologist Bulletin*, 71(9), pp. 1068-1093.

Talwani, M., Worzel, J. L. & Landisman, M., 1959. Rapid gravity computations for two-dimensional bodies with application to the Mendocino submarine fracture zone. *Journal of Geophysical Research*, 64(1), pp. 49-59.

Tarkowski, R., 2019. Underground hydrogen storage: Characteristics and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volumen 105, pp. 86-94.

Tarkowski, R. & Czapowski, G., 2018. Salt domes in Poland - Potential sites for hydrogen storage in caverns. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(46), pp. 21414 - 21427.

Valdés Pérez, A., 2014. *Sistema CAES en un domo salino integrando el almacenamiento de energía térmica*. Madrid(Madrid): Universidad Politécnica de Madrid.

Vergés, J. y otros, 2019. *An Introduction to the Alpine Cycle in Iberia*. s.l.:s.n.

Won, I. J. & Bevis, M., 1987. Computing the gravitational and magnetic anomalies due to a polygon: Algorithms and Fortran subroutines. *Geophysics*, 52(2), pp. 232-238.

Zulauf, G., Zulauf, J., Thiessen, A. & Hattingen, E., 2019. Formation of dome-in dome structures: Results from experimental studies and comparison with natural examples. *Journal of Structural Geology*, Volumen 118, pp. 324-339.