



**CONAMA10**  
CONGRESO NACIONAL  
DEL MEDIO AMBIENTE

COMUNICACIÓN TÉCNICA

# **Aplicación de una evaluación preliminar de la seguridad y de los riesgos HSE a las potenciales ubicaciones de una planta piloto de almacenamiento geológico de CO<sub>2</sub>**

Autor: Antonio Hurtado Bezos

Institución: Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y  
Tecnológicas (CIEMAT)

e-mail: [antonio.hurtado@ciemat.es](mailto:antonio.hurtado@ciemat.es)

Otros Autores: Recreo F. (CIEMAT), Eguilior S. (CIEMAT), Lomba L. (CIEMAT),  
Ruiz C (MICINN)

## RESUMEN

La localización de un emplazamiento seguro, capaz de secuestrar el CO<sub>2</sub> durante largos periodos de tiempo y con un riesgo mínimo es esencial para ganar la aceptación del público, por lo que la evaluación de la seguridad a largo plazo relacionada con el almacenamiento geológico de CO<sub>2</sub> necesita de un marco robusto y fiable. Dentro de éste, la selección del emplazamiento será el primer paso y requerirá de investigaciones específicas. Esta comunicación describe la aplicación de un método de selección y clasificación de formaciones (SCF) desarrollado para evaluar el potencial de los posibles almacenes geológicos de CO<sub>2</sub>, siendo la base del mismo el análisis de los riesgos para la salud, seguridad y medio ambiente (HSE) derivados de posibles fugas de CO<sub>2</sub>. Las comparaciones de los resultados obtenidos de una serie de potenciales emplazamientos pueden ayudar a seleccionar el mejor candidato para la inyección de CO<sub>2</sub>. El potencial impacto estará relacionado con tres características fundamentales del almacenamiento geológico de CO<sub>2</sub>: el potencial de la formación objetivo para la contención a largo plazo del CO<sub>2</sub>; el potencial para una contención secundaria en caso de que la formación objetivo falle, y el potencial del sitio para atenuar y/o dispersar fugas de CO<sub>2</sub> si la formación primaria fuga y la contención secundaria falla. La metodología valora cada una de esas tres características a través de una evaluación de las propiedades de los diversos atributos de estas y, además, ya que la falta de datos será la norma para la mayoría de los procesos de selección de emplazamientos, especialmente en las primeras fases, se mantendrá la incertidumbre como un valor de entrada y de salida de la metodología. La incertidumbre global reflejará la confianza que el usuario tiene en que las características del emplazamiento son bien conocidas. Por lo tanto, la metodología permite comparar los emplazamientos teniendo en cuenta tanto la expectativa de riesgo HSE como la estimación de lo bien conocido que es dicho riesgo. Éste es el marco en el que se encuadran los estudios que se han realizado y que pretenden contribuir, desde la perspectiva de la Seguridad y del Análisis de Riesgos, a la selección de las potenciales ubicaciones para una Planta Piloto de Inyección de CO<sub>2</sub> en la Península Ibérica.

**Palabras Clave:** Almacenamiento de CO<sub>2</sub>, evaluación de riesgos, selección de emplazamientos

## 1. Introducción

La localización de un emplazamiento seguro, capaz de secuestrar el CO<sub>2</sub> durante largos periodos de tiempo y con un riesgo mínimo es esencial para ganar la aceptación del público. Es por ello que la evaluación de la seguridad a largo plazo relacionada con el almacenamiento geológico de CO<sub>2</sub> necesita de un marco robusto y fiable. Dentro de éste, la selección del emplazamiento será el primer paso y requerirá de investigaciones específicas [1].

Esta comunicación describe la aplicación de un método de selección y clasificación de formaciones (SCF) desarrollado para evaluar el potencial de los posibles almacenes geológicos de CO<sub>2</sub>. El método está basado en el análisis de los riesgos para la salud, seguridad y medio ambiente (HSE) derivados de posibles fugas de CO<sub>2</sub> [2].

En este estudio se ha aplicado la metodología desarrollada por C. M. Oldenburg [2] a tres zonas candidatas para la ubicación de una planta piloto de inyección de CO<sub>2</sub> y situadas en la parte occidental de la Cuenca Cantábrica. Se concluyó que la zona finalmente seleccionada y denominada “Huérmeces”, que comprende el sector del anticlinal de Hontomín, presentaba una mejor calificación relativa.

Aunque diseñado para ser utilizado en las primeras etapas de la selección de emplazamientos para estudios piloto de la inyección de CO<sub>2</sub>, puede encontrar aplicación en el desarrollo de proyectos de almacenamiento geológico de CO<sub>2</sub>. En este informe se describe la filosofía de la metodología junto con sus elementos básicos, y su aplicación a las zonas de Huérmeces, Huidobro y Leva, en la provincia de Burgos.

## 2. Riesgos HSE de un emplazamiento

En el caso de plantas piloto de inyección de CO<sub>2</sub> la cantidad de CO<sub>2</sub> inyectada es pequeña pero siempre existe la posibilidad de que pueda migrar fuera de la formación objetivo y alcanzar la superficie, lo que podría suponer un riesgo para la salud la seguridad y el medio ambiente. En la Figura 1 pueden verse esquemáticamente posibles vías de fugas y filtraciones al medio ambiente. Las fugas desde el sistema de contención primario pueden verse atenuadas por el potencial de atrapamiento secundario de los niveles superiores del sistema, es decir, las vías de fuga no necesariamente deben tener como consecuencia directa una filtración al medioambiente. Todas las vías incluyen posibilidades de dispersión o atenuación, también en el entorno cercano a la superficie, donde se da la posibilidad de que el CO<sub>2</sub> se disperse y mezcle con agua y/o aire. Por lo tanto, para minimizar los efectos de riesgos a la salud, seguridad o medioambiente (HSE) será necesario:

1. prevenir la fuga de CO<sub>2</sub>; o
2. prevenir que la fuga de CO<sub>2</sub> alcance el medioambiente cercano; o
3. atenuar el flujo o dispersar el CO<sub>2</sub> de manera que no presente altas concentraciones que supongan un riesgo HSE.

Bajo esta premisa, el potencial impacto está relacionado con tres características fundamentales del almacenamiento geológico de CO<sub>2</sub>:

1. Potencial de la formación objetivo para la contención a largo plazo del CO<sub>2</sub>;
2. Potencial para una contención secundaria en caso de que haya fugas desde la formación objetivo; y
3. Potencial del sitio para atenuar y/o dispersar fugas de CO<sub>2</sub> si la formación primaria fuga y la contención secundaria falla.

La metodología se diseñó para proporcionar una evaluación cualitativa e independiente de cada una de esas tres características a través de una evaluación de las propiedades de los diversos atributos de éstas. El método está diseñado también para que pueda ser

aplicado en los emplazamientos con datos limitados, lo que es adecuado para estadios tempranos de selección de emplazamientos o para estudios piloto, como es el caso que nos ocupa, o cuando hay varios sitios en estudio y se carece de datos detallados de caracterización. Muchas de las propiedades y los valores de los atributos que el evaluador utiliza son realmente aproximaciones de cantidades que serán medidas o modeladas en fases posteriores con esfuerzos adicionales.

La metodología mantiene la incertidumbre como un valor de entrada y salida de la misma ya que la falta de datos es una condición esperable en la mayoría de los procesos de selección de emplazamientos, especialmente en las primeras fases. La incertidumbre global en este marco se define de manera amplia e incluye tanto incertidumbres de los parámetros (por ejemplo, grado de conocimiento de una determinada propiedad) como la variabilidad (por ejemplo, qué grado de variabilidad tiene una determinada propiedad). La incertidumbre global refleja la confianza que el evaluador tiene en que las características del emplazamiento son bien conocidas. Por lo tanto, la metodología permite comparar los emplazamientos teniendo en cuenta tanto la expectativa de riesgo HSE como la estimación de lo bien conocido que es dicho riesgo.

En el marco de la aproximación SCF [2], no hay ni simulación ni asignación formal de probabilidades. La razón de este enfoque es que no se espera que haya disponible información detallada suficiente del emplazamiento, en especial para las inyecciones piloto de CO<sub>2</sub>, como para realizar un análisis de escenarios ni asignar probabilidades para realizar un análisis probabilístico. En lugar de eso, la SCF utiliza información cualitativa, extraída de informes generales o de expertos en la zona. Mediante este enfoque el análisis se simplifica considerablemente e incluye explícitamente el nivel de confianza que el evaluador asigna a las evaluaciones como salida principal. En resumen, el marco SCF se ha diseñado para responder a la pregunta, “Para una selección entre varios posibles emplazamientos, y sobre la base de la información existente, ¿qué emplazamiento tiene el menor riesgo HSE?” Éste es el marco en el que se encuadran los estudios preliminares que pretenden contribuir, desde la perspectiva de la Seguridad y del Análisis de Riesgos, a la selección de las potenciales ubicaciones para una Planta Piloto de Inyección en la zona N de la provincia de Burgos.

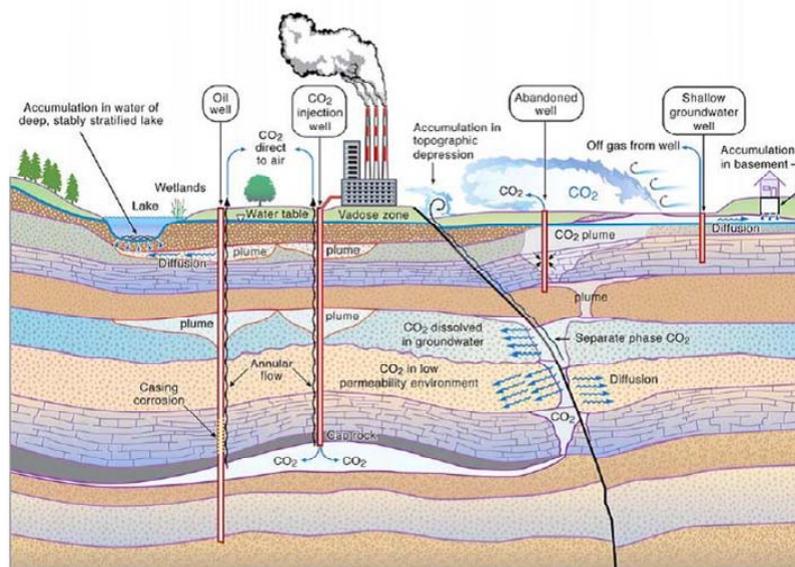


Figura 1: Esquema de las diversas vías de fugas y filtraciones del CO<sub>2</sub> a partir de un almacenamiento geológico [2].

### 3. Metodología SCF

El enfoque de la metodología se basa en una evaluación independiente de las tres características fundamentales desde el punto de vista del control del riesgo HSE de un emplazamiento. Aunque su desarrollo se ha basado en experiencias anteriores con el almacenamiento de CO<sub>2</sub> en vez de con la formalidad de análisis de decisión, el enfoque cae cerca de la categoría de la teoría de utilidad multi-atributo [3,4]. Las tres características que se evalúan para cada emplazamiento son representantes, para las combinaciones de impacto y probabilidad (es decir, del riesgo), de las fugas desde el sistema de almacenamiento, del atrapamiento secundario y de la atenuación. Los datos necesarios, de carácter general, se basan principalmente en la opinión de expertos y serán función del grado de caracterización disponible para los emplazamientos.

La evaluación realizada en este marco se basa en cuatro clases de información: las características (1) del emplazamiento que se definen por atributos (2); atributos que se definen por propiedades (3); propiedades que se definen por valores de entrada (4) suministrados por el evaluador en base a la información procedente de los estudios de caracterización realizados. La Tabla 1 muestra la relación entre las características, atributos y propiedades, y los comportamientos que estas propiedades quieren representar.

Por tanto, el sistema vendrá definido por:

- Las características (c), con:  $c_1$ ="Potencial para contención primaria",  $c_2$ ="Potencial de contención secundaria" y  $c_3$ ="Potencial de atenuación". Definen las características fundamentales del almacenamiento desde el punto de vista de los riesgos HSE
- Los atributos (t). Cada característica tendrá unos atributos que determinarán cómo puede cumplir con su función. En nuestro caso, la primera característica tiene tres atributos: "Sello primario", "Profundidad" y "Formación" que deben servir para valorar el potencial de la formación objetivo para la contención del CO<sub>2</sub>
- Las propiedades (p). Cada atributo vendrá definido por una serie de propiedades, en función de las cuales podría determinarse el comportamiento de los atributos respecto a las posibles fugas/retención del CO<sub>2</sub>. Será a estas propiedades a las que se asignará valores al aplicar la metodología.

Para aplicar la metodología, se debe asignar una importancia a cada propiedad de los distintos atributos a través de la especificación de su factor de peso, ' $w_j$ ', de manera que los factores de peso estén normalizados a 1 para cada atributo:  $\sum w_j=1$  con la suma que se extiende a todas las propiedades para cada atributo.

Una vez asignados los pesos, se asignará un valor a las propiedades, ' $a_i$ ', según su relación con el riesgo HSE. Los valores numéricos se eligen en nuestro caso como reales que varían entre -2 (propiedad que se comporta negativamente respecto al riesgo) y 2 (propiedad que tiene un comportamiento excelente respecto al riesgo) con 0 si se considera neutra.

Por último, se introduce un valor que mide la confianza en el valor de la propiedad, ' $c_j$ '. Este valor tomará el valor '2' si existe mucha confianza en el valor asignado a la propiedad, '1' si se considera que es un valor generalmente admitido por la comunidad científica y '0,1' si se considera el valor incierto. Esta confianza se representará junto con la evaluación de cada atributo para cada característica. Una vez asignados todos los valores a las propiedades se puede calcular el promedio de las mismas y de su certeza para los atributos, las características y, finalmente, para la formación que se esté evaluando, siendo:

Tabla 1: Características, atributos, propiedades y a qué comportamiento del sistema representan.

Características	Atributos	Propiedades	Representado por ...
Potencial para contención primaria	Sello primario	Grosor Litología Sellado demostrado Continuidad lateral	Probable eficacia del sellado Permeabilidad, porosidad Fuga potencial Integridad y punto más bajo de la trampa estructural
	Profundidad	Distancia bajo la superficie	Densidad del $CO_2$ en la formación
	Formación	Litología Permeabilidad y porosidad Grosor  Fracturación o porosidad primaria Fluido de poro Presión Tectónica Hidrología Pozos profundos Permeabilidad de fallas	Probable eficacia de almacenamiento Inyectividad, capacidad Extensión superficial de la pluma inyectada Potencial migración  Inyectividad desplazamiento Capacidad, tendencia a la fracturación Fractura inducida, sismicidad Transporte por aguas subterráneas Probabilidad de fugas por pozos Probabilidad de fugas por fallas
Potencial de contención secundaria	Sello secundario	Espesor Litología Sellado demostrado Continuidad lateral  Profundidad	Probabilidad de sellado efectivo Permeabilidad, porosidad Potencial de fuga Integridad y existencia de spill points Densidad del $CO_2$
	Sellos superficiales	Espesor Litología Litología Continuidad lateral  Evidencia de infiltración	Probabilidad de efectividad de sello Permeabilidad, porosidad Integridad y existencia de spill points Efectividad de todos los sellos
Potencial atenuación	Características de la superficie	Topografía Viento Clima Uso de la tierra Población Agua superficial	Dispersión de la pluma de $CO_2$ Dispersión de la pluma de $CO_2$ Dispersión de la pluma de $CO_2$ Tendencia a la exposición Tendencia a la exposición Filtración
	Hidrología del agua subterránea	Flujo regional Presión Geoquímica Salinidad	Dispersión-disolución Solubilidad Solubilidad Solubilidad
	Pozos existentes	Pozos profundos Pozos someros Pozos abandonados Pozos de residuos	Vía directa desde la profundidad Vía directa Vía directa poco conocida Nuevos fluidos, perturbación
	Fallas	Fallas tectónicas Fallas normales Fallas Strike-slip Permeabilidad de las fallas	Grandes zonas de fallas permeables Grosor de Sello modificado Zonas de fallas permeables Tiempo de tránsito

- Valor 'v<sub>t</sub>' y certeza 'u<sub>t</sub>' de un atributo:

$$v_t = \sum_{j=1}^{n_p} w_j a_j \quad u_t = \frac{1}{n_p} \sum_{j=1}^{n_p} c_j \quad (1)$$

con 'n<sub>p</sub>' número de propiedades del atributo.

- Valor promedio 'v<sub>c</sub>' y certeza promedio 'u<sub>c</sub>' de una característica:

$$v_c = \frac{1}{n_t} \sum_{j=1}^{n_t} v_{t_j} \quad u_c = \frac{1}{n_t} \sum_{j=1}^{n_t} u_{t_j} \quad (2)$$

con 'n<sub>t</sub>' número de atributos de la característica.

- Puntuación promedio de una característica 'S<sub>c</sub>':

$$S_c = \frac{1}{n_t} \sum_{j=1}^{n_t} (v_{t_j} u_{t_j}) \quad (3)$$

- Valor promedio de la formación 'v' y certeza promedio de una formación 'u'. A la hora de valorar una formación, se puede asignar un factor de peso a cada una de las características 'W<sub>i</sub>' con el factor de normalización  $W = \sum W_i$

$$v = \frac{1}{W} \sum_{i=1}^{n_c} W_i v_{c_i} \quad u = \frac{1}{W} \sum_{i=1}^{n_c} W_i u_{c_i} \quad (4)$$

- Magnitud promedio de una formación 'm':

$$m = \sqrt{u^2 + (v+2)^2} \quad (5)$$

Se ilustra una representación gráfica de los resultados en la Figura 2. Una medida de la calidad media de un emplazamiento, teniendo en cuenta tanto la puntuación como la incertidumbre promedio, viene proporcionada por la distancia entre en el punto que representa el emplazamiento y el origen de la gráfica (la longitud de la recta azul en la Figura 2) y que se expresa con la magnitud promedio de la formación. Debe recalcar que las puntuaciones obtenidas por distintos emplazamientos representan simplemente una posición relativa entre ellos, sin indicar ningún tipo de relación lineal con el comportamiento físico del sistema.

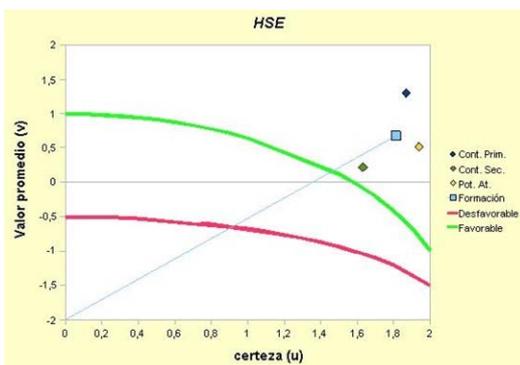


Figura 2: Ejemplo de aplicación de la metodología a una formación favorable.

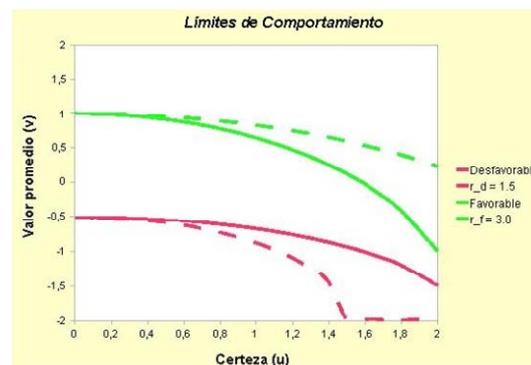


Figura 3: Curvas de comportamiento favorable/desfavorable.

Las distintas zonas de comportamiento se limitan gráficamente mediante las curvas favorable/desfavorable (ver Figura 3). Éstas han sido definidas utilizando tanto la magnitud promedio de la formación, como la certeza que se tiene de las características de la misma, de manera que, a un nivel más elevado de nivel de certeza, se aceptarían formaciones con magnitudes menores. Fijando unas magnitudes en el origen de  $r_f=3,0$  para el límite favorable y de  $r_d=1,5$  para el desfavorable, dichas curvas siguen las siguientes expresiones:

$$v_{fav} = \sqrt{r_f^2 - 2,0u^2} - 2 \quad v_{desf} = \sqrt{r_d^2 - 0,5u^2} - 2 \quad (6)$$

#### 4. Áreas en estudio

La metodología descrita anteriormente se ha aplicado a las tres zonas que pueden verse en la Figura 4 y que genéricamente se han denominado Huérmeces, Huidobro y Leva. Estas zonas se encuentran situadas en la parte occidental de la denominada “Cuenca Cantábrica” y el esquema regional del área de estudio puede verse en la Figura 5.

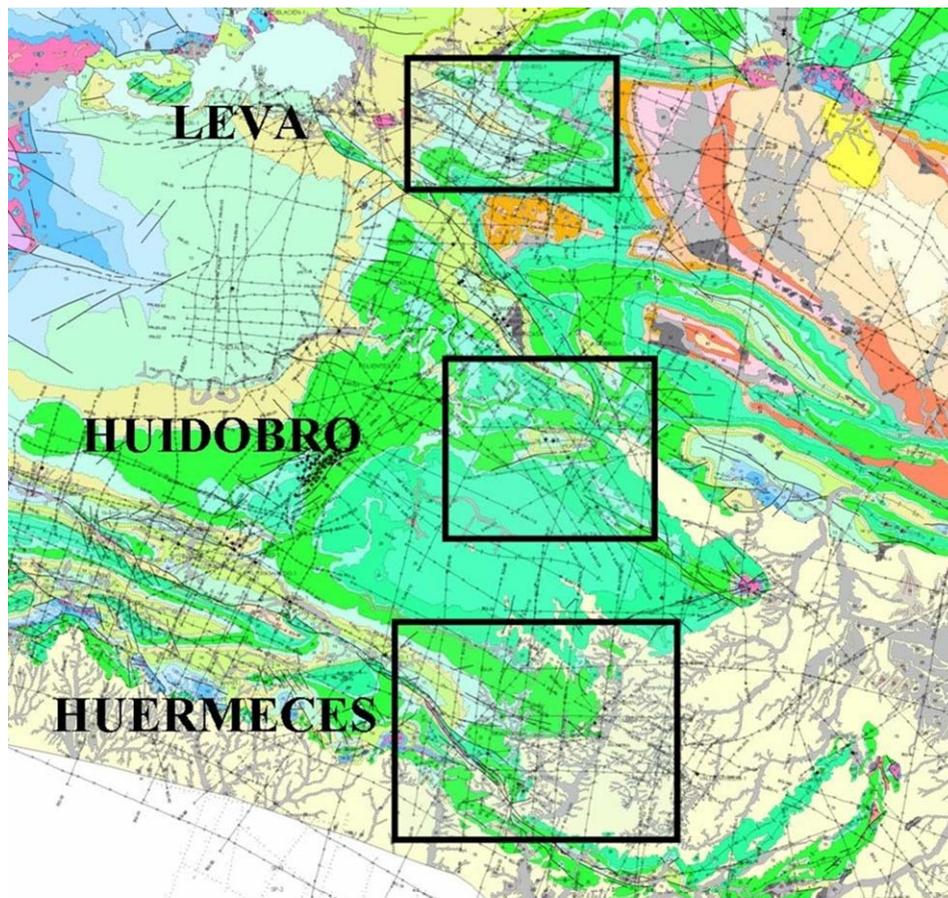


Figura 4: Áreas de estudio (Pérez-Estaún, A.; Comunicación Personal)

El clima en la región es mediterráneo continental con una temperatura media anual de 11 °C con unas oscilaciones térmicas medias de casi 17 °C entre el mes más cálido (Julio, 20 °C) y el más frío (Enero, 3.4 °C) [5]. La proximidad a la Cordillera Cantábrica y la

elevada altitud media en la mayor parte del área (1000 m), favorecen las precipitaciones en forma de nieve. Las precipitaciones anuales se extienden en el rango de 500 a 700 mm, siendo el otoño y la primavera las estaciones más húmedas, y los veranos relativamente templados y cortos, con importantes fenómenos tormentosos [6].

#### 4.1 La zona de “Huermece”

##### 4.1.1 Características

El área de estudio denominada Huérmece abarca la totalidad de la Hoja nº 167 (Montorio) del Mapa Geológico de España a escala 1:50000, que se localiza al norte de la provincia de Burgos (ver Figura 6) [6].

La población de la zona se asienta en pequeños pueblos, normalmente de menos de 500 habitantes, siendo la densidad de población extraordinariamente baja [6].

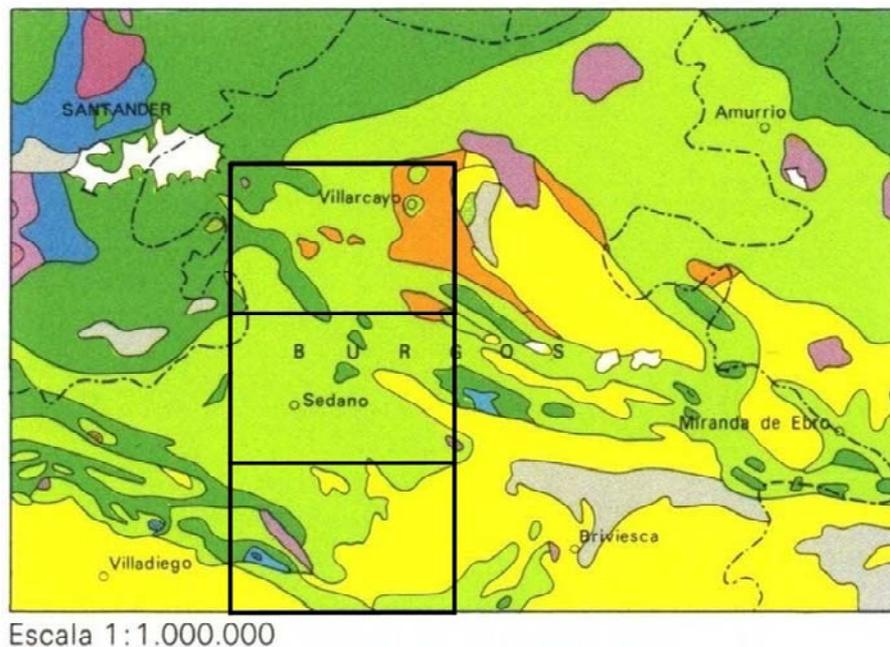
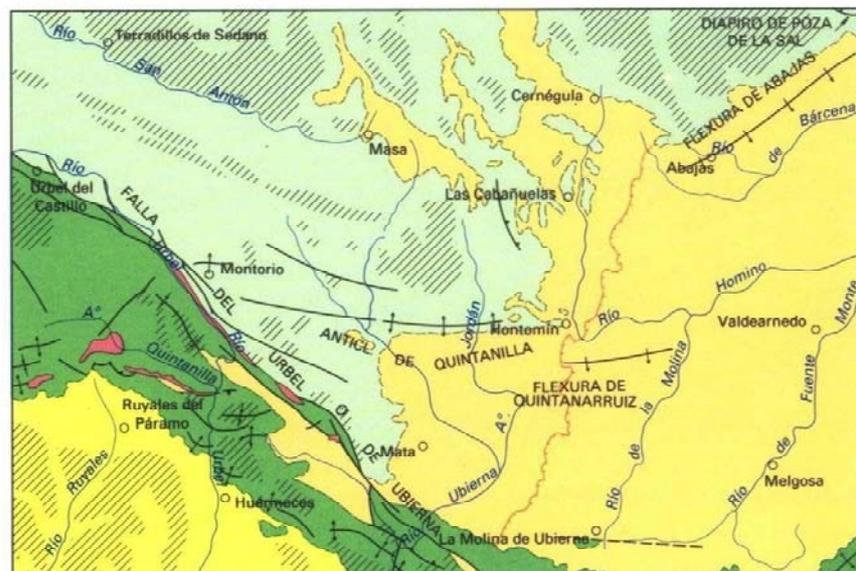


Figura 5: Localización regional de las tres zonas estudiadas (Modificado de [7])

Las zonas centro y oeste de la Hoja pertenecen a la Cuenca Hidrográfica del Duero, mientras que una pequeña franja septentrional y el tercio oriental, sobre los materiales terciarios de la Depresión de la Bureba, a la del Ebro. A la primera vierten sus aguas los ríos Urbel y Ubierna, mientras que a la segunda, los de San Antón y Homino (ver Figura 6). La división hidrográfica entre ambas cuencas, que recorre la Hoja aproximadamente de NO a SE, es muy inestable debido al menor nivel de base del Ebro. La velocidad de

excavación y vaciado del río Homino ha sido muy superior a la del Ubierna, resultando en una expansión hacia el oeste de la Depresión de la “Neobureba” (Cuenca del Ebro) a expensas de la “Paleobureba” (Cuenca del Duero). Este proceso es muy activo en la actualidad y previsiblemente continuará hasta que el escarpe erosivo que separa ambas se sitúe sobre materiales mesozoicos (ver Figura 7) [6].

Hidrogeológicamente, los materiales de la Hoja forman parte de tres sistemas acuíferos, dos de los cuales se sitúan en la Cuenca del Duero y el tercero, en la del Ebro. En la Cuenca del Duero, un sistema está formado por materiales terciarios de permeabilidad variable y se conecta hidráulicamente con el segundo, que está constituido por las calizas del Turoniense-Coniaciense, así como las del Santoniense. En el sistema acuífero que pertenece a la Cuenca del Ebro, destacan los mismos niveles calizos mesozoicos, que poseen buena permeabilidad por fracturación y karstificación. Este último sistema se recarga mediante agua de lluvia y la descarga tiene lugar a través de manantiales, como el de Hontomín (centro de la Hoja). No presenta apenas explotación y la calidad química de sus aguas se describe en la zona SO, fuera de la Hoja, como bicarbonatada-cálcica y apta para el consumo (ver Figura 7) [6].



Escala 1:200.000



Figura 6: Hidrografía y esquema tectónico en la hoja de Montorio

En la Hoja de Montorio afloran materiales mesozoicos en las zonas centro y norte que originan extensas altiplanicies de más de 1000 m de altitud, dando un paisaje en muelas o loras, en las que la red hidrográfica no se ha encajado muy profundamente aún o a las que ha desconectado entre sí. En la parte suroccidental afloran depósitos terciarios de la Cuenca del Duero, que presentan un paisaje de páramos poco erosionado. Al este, sobre

los materiales terciarios del Ebro, predomina un paisaje acaravado e intrincado, con unos 800 m de altitud promedio (ver Figura 7) [6].

Los materiales mesozoicos se extienden desde el Triásico Superior hasta el Cretácico terminal, y pertenecen a la orla mesozoica Vasco-Cantábrica del Macizo Hespérico. Sus direcciones estructurales fundamentales son ONO-ESE. El ángulo SO de la Hoja está ocupado por materiales terciarios de la Cuenca del Duero y en el tercio oriental de la misma, afloran depósitos terciarios de la Depresión de la Bureba, que corresponde a la terminación occidental de la Cuenca del Ebro (ver Figura 6) [6].

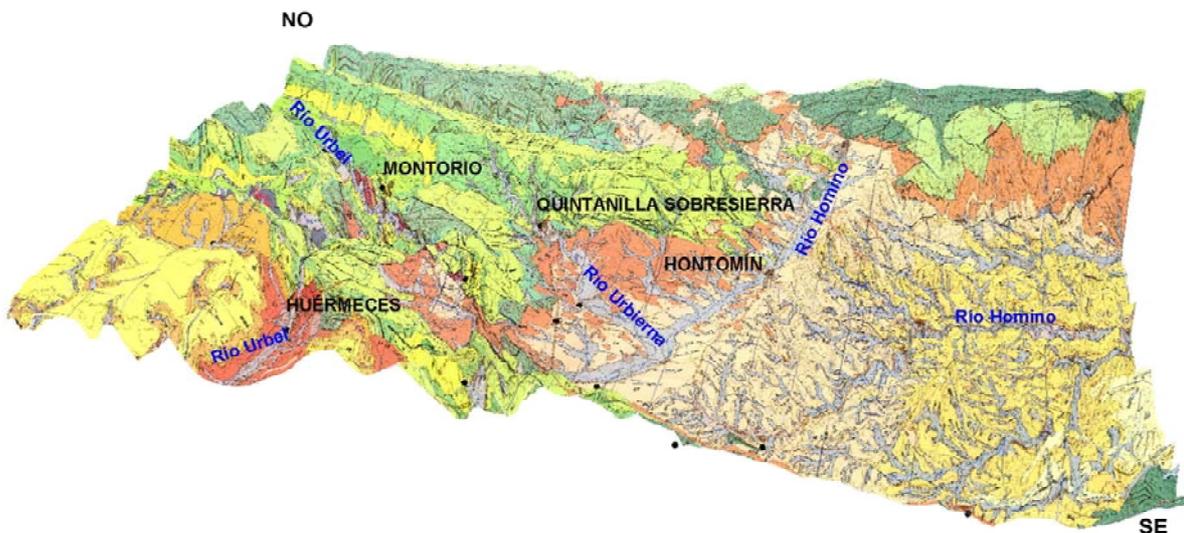


Figura 7: Topografía geológica de la Hoja de Montorio (escala vertical exagerada por 10)

Dentro del Mesozoico de la Hoja se distinguen dos dominios estructurales distintos, separados por la Falla de Urbel o Ubierna, de dirección NO-SE (ver Figura 6):

- la zona más suroccidental de la Plataforma estructural de los Páramos o Plataforma Burgalesa, al norte, poco deformada, y
- la Banda Plegada de Montorio-Ubierna, constituida por la Sierra de Ubierna, al sur. Ambos dominios y la Falla de Urbel están afectados por diapirismo del Kéuper.

La Plataforma Burgalesa es una amplia zona sinclinal, casi subhorizontal, que en la Hoja de Montorio aparece como un monoclinal de mayor buzamiento hacia el SO y que en su parte central está afectada por fracturas E-O y NO-SE y pliegues de dirección E-O, como el anticlinal de Quintanilla (ver Figura 6). Se observa disarmonía entre los plegamientos de los depósitos del Cretácico Superior y el conjunto detrítico del Jurásico Superior-Cretácico Inferior, así como entre estos últimos y los del Jurásico marino [8]. En la Banda Plegada de Montorio-Ubierna coexisten pliegues y cabalgamientos de dirección E-O y NO-SE, con vergencia O-SO. La falla de Urbel es representante del sistema de fracturas de Ventaniella, de orientación NO-SE, de actuación en la fase alpina, y que hacia el sureste queda oculta bajo depósitos terciarios. Es una falla importante que se interpreta como reflejo superficial de fracturas de dirección, de zócalo, dextrales. Próximos a la Falla de Urbel afloran núcleos jurásicos, muy probablemente a favor de fracturas distensivas NNO-SSE en relación con el carácter dextral de la misma; asimismo afloran materiales del Kéuper con carácter diapírico y retazos del terciario de la Bureba [6].

En relación con la Neotectónica, desde el Mioceno Superior parece estar produciéndose una extensión N-S de tendencia radial o multi-radial, contradictoria con el estado actual de esfuerzos compresivos por aproximación de las placas Euroasiática, Ibérica y Africana [8]. En el Cuaternario, los movimientos diapíricos aparentemente cesan en la zona, o al menos se dejan de observar deformaciones importantes [8]. En 1979 se produjo el único sismo del que se tenga noticia, con una magnitud 3; su epicentro se situó a 1 km al SO de la población de Masa, sobre una fractura NNE-SSO. El área de la Hoja tiene una peligrosidad sísmica entre los grados III y IV de la escala M.K.S. [6].

Existen distintas áreas en la Hoja de Montorio que han sido objeto de exploración petrolífera. Concretamente se han realizado estudios de sismica de reflexión y un total de 8 sondeos profundos en las estructuras del subsuelo de Hontomín, Montorio, Pino y Valdearnedo. Los sondeos realizados son: Hontomín-1 (1965), Hontomín-2 (1968, 1989-1991), Hontomín-3 (1991), Hontomín-SW1 (1977), Hontomín-SW2 (1977), Montorio-1 (1986), Pino-1 (1966) y Valdearnedo-1 (1971) (ver Figura 8) [9].

#### 4.1.2 Par sello almacén

La formación almacén que a priori cumple mayor número de requisitos geológicos para almacenar CO<sub>2</sub> en fase supercrítica dentro de la zona de Huérmeces sería la denominada Unidad Clástica del Lías, que aparece a muro de un sello margoso del Lías Medio, y a techo del Lías anhidrítico basal (Carniolas) y los materiales salinos del Kéuper del Triásico Superior. Esta Unidad está constituida por calizas, intercaladas con calizas dolomíticas y dolomías. En su parte superior se describen 21 m de calizas arenosas que caracterizan esta Unidad [10]. Fue objetivo principal en los distintos sondeos realizados en la zona, para evaluar las potenciales reservas de hidrocarburos.

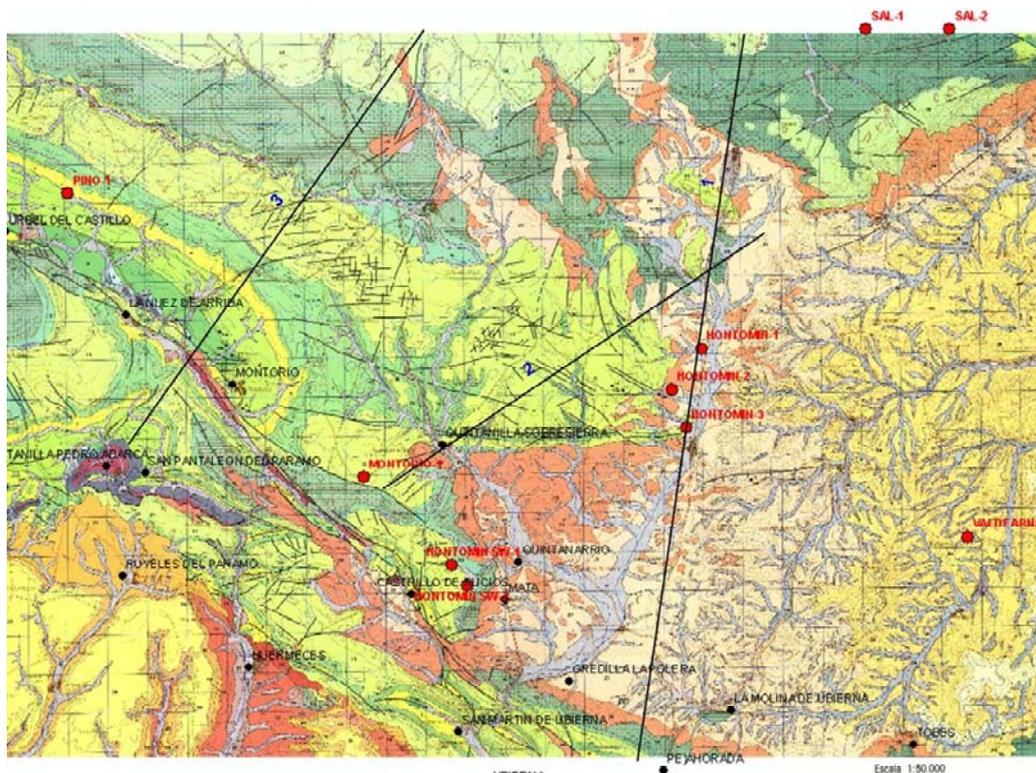


Figura 8: Sondeos profundos realizados en la zona de Huérmeces (puntos rojos)

La estructura más importante analizada en la Hoja, durante la prospección de hidrocarburos, es la que se asocia a la denominada Falla de Hontomín, en el subsuelo de las proximidades del pueblo del mismo nombre (ver Figura 9). Esta estructura se ha interpretado mediante estudios sísmicos como un bloque de falla inclinado frente a un graben [10] y responde a una estructura característica de alto salino/falla de crecimiento/semigraben [8]. Se trata de una estructura que ocupa un área de 32 km<sup>2</sup>, con un cierre vertical de 475 m [10]. En ella la Unidad Clástica del Lías se sitúa a una profundidad de 1582, 1353 y 1238 m, en los sondeos de Hontomín-1, Hontomín-2 y Hontomín-3, con una potencia de 114, 92 y 62 m, respectivamente, estando afectada por una zona de fractura o falla en el último [11, 12, 13] (ver Figura 8).

Esta Unidad también aparece en otras estructuras analizadas en la Hoja, indicando que presenta continuidad regional y, por tanto, mayor capacidad de almacenamiento que la aportada exclusivamente por la estructura asociada a la Falla de Hontomín (ver Figura 10 y Figura 11).

Al suroeste de la estructura anterior, en el sondeo de Montorio-1, se atravesaron 100 m de esta Unidad a 1250 m de profundidad y hacia el sureste, aparecen 75 m en el sondeo Valdearnedo-1, a 2085 m de profundidad. Al suroeste de la estructura de Hontomín aparece una estructura fallada, separada de aquella por una pequeña ensilladura, que está cerrada al suroeste por una gran falla NO-SE, con fallas menores asociadas. En el sondeo Hontomín- SW1, que atraviesa esta estructura, la existencia de una falla ha provocado la desaparición de 160 m de serie, entre la que se encuentra la Unidad Clástica del Lías, y que el Lías margoso se encuentre en contacto con el anhidrítico del InfraLías. No obstante, se concluye que el sondeo confirma la existencia de Lías por debajo del Dogger en el entorno del mismo [14]. En el sondeo Hontomín-SW2 tampoco aparece esta Unidad ya que el Purbeck aparece en contacto directo sobre el Lías anhidrítico [15].

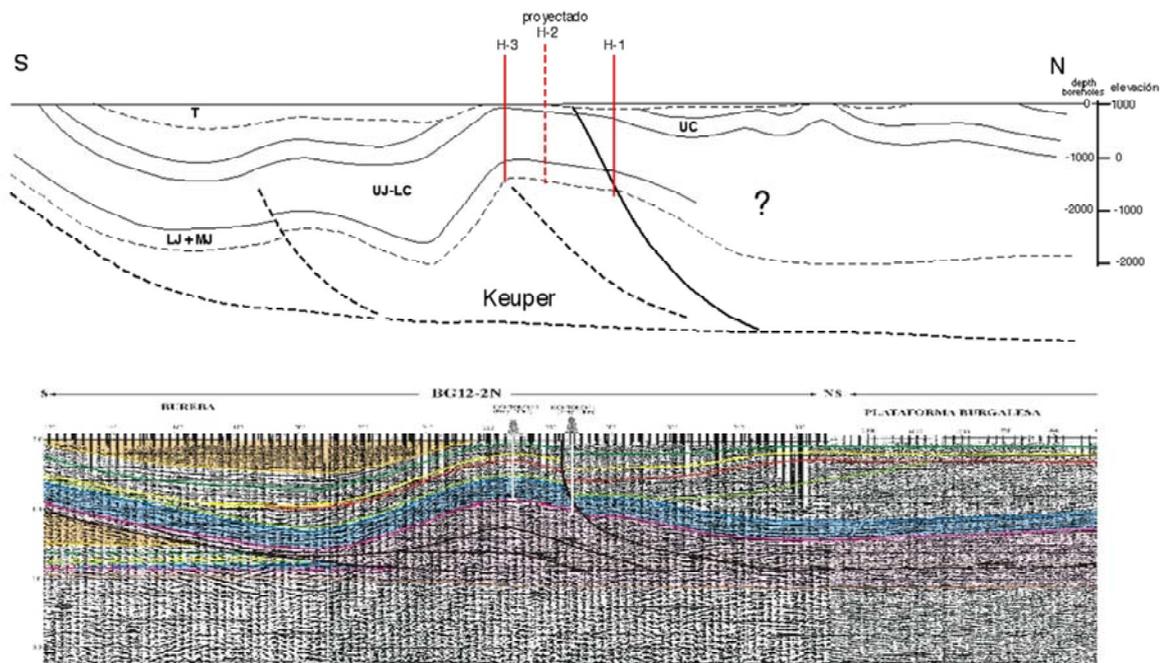


Figura 9: Corte 1 de la Figura 8. Interpretación sísmica de la estructura Hontomín (Pérez-Estaún A.; Comunicación Personal).

Las calizas de la Unidad Clástica en la estructura de Hontomín presentan menor porosidad media que las dolomías [10]. Se ha estimado una porosidad media en torno al 14% en los sondeos Hontomín-2 y 3, alcanzando valores superiores, en algunos tramos, en el sondeo Hontomín-1 (20-30 %). La presión hidrostática inicial de la formación es ligeramente superior a la teórica. El agua de formación presenta una salinidad elevada, llegando a medirse 90000 ppm de Cloruro de Sodio (ClNa) en el sondeo Hontomín-1 [11], y cerca de 40000, en el de Hontomín-2 [12]. La existencia de un gradiente de salinidad a lo largo de la estructura confirma que no hay una trampa válida por ausencia de sello lateral de falla, frente a las calizas del Jurásico Medio [10]. No obstante, debe existir algún mecanismo de atrapamiento estructural o estratigráfico de menor resolución que la de los estudios sísmicos en el entorno del sondeo Hontomín-2, dadas las reservas de hidrocarburo que se encontraron [10].

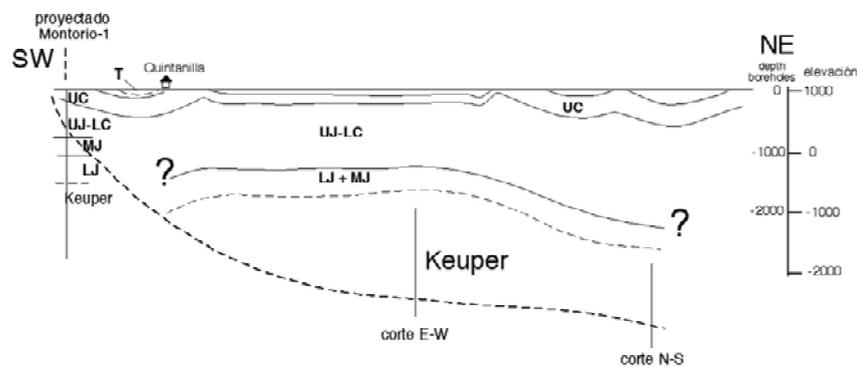


Figura 10: Corte 2 de la Figura 8 (Pérez-Estaún A.; Comunicación Personal).

El sello a techo de esta Unidad está constituido por un paquete con predominio de margas y calizas arcillosas. Parece presentar asimismo continuidad lateral a escala regional: aparece con una potencia de 40, 115 y 94 m, en los sondeos Hontomín-1, Hontomín-2 y Hontomín-3, respectivamente, estando afectado por una falla en el primero [11]. En el sondeo Montorio-1 se cortaron unos 100 m de este sello [8], 85 m en el sondeo Valdearnedo-1 [9] y sólo 40 en el de Hontomín-SW1, por la existencia de una falla [14]. No se ha atravesado en el sondeo Hontomín-SW2 ni en el de Pino-1, en los que aparecen sendas fallas [15, 16]. Por debajo de este sello, en la Unidad Clástica del Lías, se han encontrado indicios de hidrocarburos en los sondeos Hontomín-1 y Hontomín-3, y se ha extraído una producción acumulada de 2939 barriles de petróleo en el de Hontomín-2, indicando la efectividad de este material como sello [11, 12, 13].

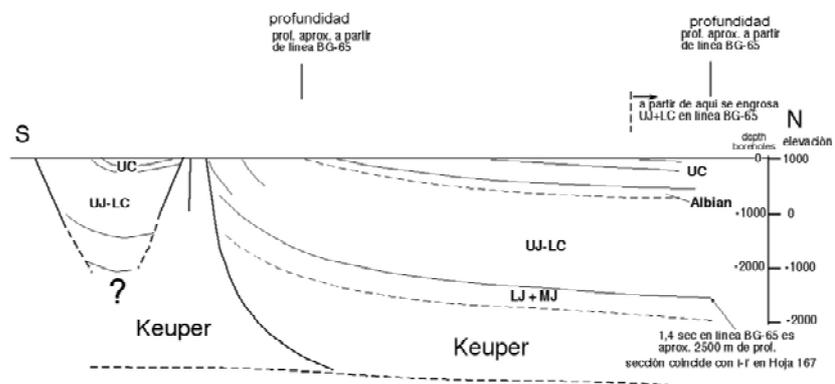


Figura 11: Corte 3 de la Figura 8 (Pérez-Estaún, A.; Comunicación Personal).

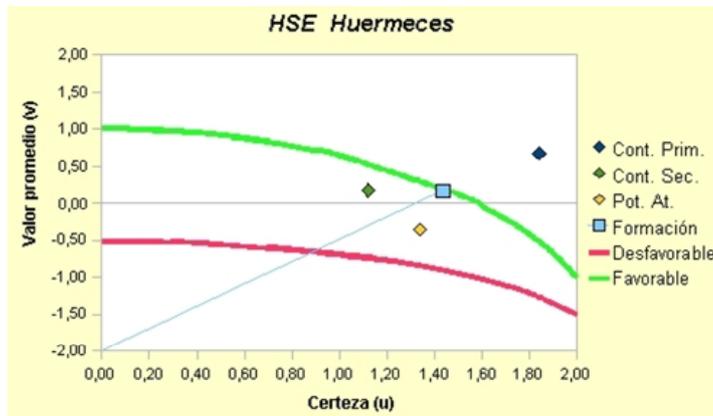


Figura 12: Representación gráfica de la aplicación de la metodología a la formación Huérmeces

A techo de este sello primario, en todos estos sondeos aparecen los depósitos siliciclásticos de las Facies Purbeck, Weald, complejo Aptense-Albense y la Formación Utrillas, todas ellas con grandes cambios laterales de facies. Por encima, dentro de los depósitos del Cenomanense-Turonense, aparece un sello más somero (a menos de 200-300 m de profundidad) que incluye margas y calizas margosas, con una potencia

inferior a 20 m en los sondeos Hontomín-1, Hontomín-2 y Hontomín-3, y mayor potencia en los sondeos Hontomín-SW1, Hontomín-S2 y Valdearnedo-1.

#### 4.1.3 Aplicación del método

Mediante la aplicación de la metodología a la zona de “Huérmeces”, evaluamos la formación a través de sus características relevantes para los riesgos HSE (ver Tabla 1), que se representa en la Figura 12.

### 4.2 La zona de “Huidobro”

#### 4.2.1 Características

La zona denominada “Huidobro” (ver Figura 4) está situada dentro de la hoja geológica de Sedano (135) del Mapa Geológico de España a escala 1:50000 [17], que corresponde a la parte occidental de la denominada “Cuenca Cantábrica”. La mayor parte de dicha hoja se engloba dentro de la provincia de Burgos, aunque el ángulo noroccidental pertenece a la de Santander.

En la mayor parte de la hoja afloran materiales calcáreos dispuestos en extensas mesas de alturas comprendidas entre 800 m y 1000 m, que se encuentran atravesadas y cortadas por profundos tajos y barrancos producidos principalmente por los ríos Ebro y Rudrón. Dichos cursos fluviales incrementan su caudal con los manantiales que drenan en su cauce los notables acuíferos del Cretácico Superior, principalmente de las calizas del Turoniense-Coniaciense y de las del Santoniense Medio-Superior [17].

De manera general, se pueden sintetizar las características geológicas de la zona como un conjunto de materiales detrítico-terrágenos y carbonatados mesozoicos aflorantes, con estructuras de dirección predominante E-O y NO-SE, con reducidos depósitos cenozoicos (ver Figura 13).

Los sedimentos más antiguos pertenecen al Kéuper, aflorantes en el extremo suroriental de la hoja y relacionados con el diapiro de Poza de la Sal. En los bordes de este diapiro y en zonas cercanas afloran depósitos del Jurásico, desde el Lías calizo hasta margas y calizas del Dogger. Del mismo modo, en la parte oriental de la hoja afloran los materiales de “facies Purbeck”, constituidos por conglomerados poligénicos, calizas arriñonadas y arcillas margosas. La “facies Weald” aflora en la mitad septentrional de la hoja, en los núcleos de Los anticlinales de Madrid de las Calderechas, Huidobro y Zamanzas (ver Figura 13). El Aptiense-Albiense Inferior, constituido en su mayor parte por materiales

detrítico-terrágenos gruesos y finos, con algunas intercalaciones de areniscas calcáreas y calizas arenosas, aflora en los mismos núcleos anticlinales, así como en el anticlinal de Dobro, al norte de la hoja. En esas mismas estructuras anticlinales, además de en algunas depresiones erosionadas por el Ebro, aparece en superficie la denominada “facies Utrillas”, formada principalmente por una serie clástico-terrágena, de naturaleza arcósica, en la que predominan las arenas, a veces conglomeráticas, con intercalaciones de niveles arcillosos. Los materiales mayoritarios en superficie corresponden al Cretácico Superior, y están representados principalmente por sedimentos carbonatados, calizos y margosos, aumentando la proporción de detríticos-terrágenos hacia el techo del Santoniense Superior, Campaniense y Maastrichtiense. El Terciario está poco representado en la hoja, aflorando parte del mismo en determinadas zonas [17].

### ESQUEMA TECTONICO



Escala 1:250.000



Figura 13: Esquema tectónico en la zona Huidobro.

En cuanto a las características tectónicas, se pueden distinguir claramente dos zonas diferenciadas, delimitadas y separadas por una gran falla inversa que es la prolongación del cabalgamiento de la Sierra de Cantabria-Montes Obarenes. La primera zona, denominada “Área tectonizada de Zamanzas-Puerto de Mazorra” se sitúa en el sector nororiental, mientras que la segunda se conoce como “Plataforma estructural de los Páramos” y está ubicada en el dominio suroccidental de la hoja (ver Figura 13). El “Área tectonizada de Zamanzas-Puerto de Mazorra” presenta un conjunto de pliegues apretados, de dirección NO-SE y E-O, y con vergencia al sur en su mayoría, afectados por una notable red de fallas inversas y normales. La mayor parte de los anticlinales tienen sus flancos meridionales verticalizados, incluso algunos están volcados, como el de Dobro, con fallas inversas muy cercanas a sus núcleos. La “Plataforma estructural de los Páramos” está caracterizada porque presenta pliegues muy suaves y poco tectonizados, de gran amplitud, como es el sinclinal de Sedano [17].

Hidrogeológicamente los acuíferos más importantes son las calizas y calizas dolomíticas del Turioniense Medio-Coniaciense, y las calcarenitas de Lacazinas del Santoniense Medio-Superior, apoyadas sobre sustratos margosos impermeables. El área correspondiente a la zona tectonizada de Zamanzas-Puerto de Mazorra es propiamente de recarga, con pocos manantiales, casi siempre a techo del Cretácico Inferior, inmediatamente debajo de las calizas del Turioniense-Coniaciense. La “Plataforma

En cuanto a las características tectónicas, se pueden distinguir claramente dos zonas diferenciadas, delimitadas y separadas por una gran falla inversa que es la prolongación del cabalgamiento de la Sierra de Cantabria-Montes Obarenes. La primera zona, denominada “Área tectonizada de Zamanzas-Puerto de Mazorra” se sitúa en el sector nororiental, mientras que la segunda se conoce como “Plataforma estructural de los Páramos” y está ubicada en el dominio suroccidental de la hoja (ver Figura 13). El “Área tectonizada de Zamanzas-Puerto de Mazorra” presenta un conjunto de pliegues apretados, de

estructural de los Páramos” es asimismo una amplia zona de recarga, constituyendo el sinclinal de Sedano uno de los objetivos hidrogeológicos principales de toda la comarca. Las investigaciones de hidrocarburos llevadas a cabo en su día se centraron sobre las estructuras de Dobro (sondeo Dobro-1), Huidobro (sondeos Huidobro-1 y Huidobro-2) y Villalta (sondeo Villalta-1) (ver Figura 14). Los sondeos, realizados por Amospain y Campsa, en las décadas de los años 50 y 60 del siglo pasado, alcanzaron el techo del Jurásico o el Kéuper, dando en algún caso ligeros indicios de petróleo.

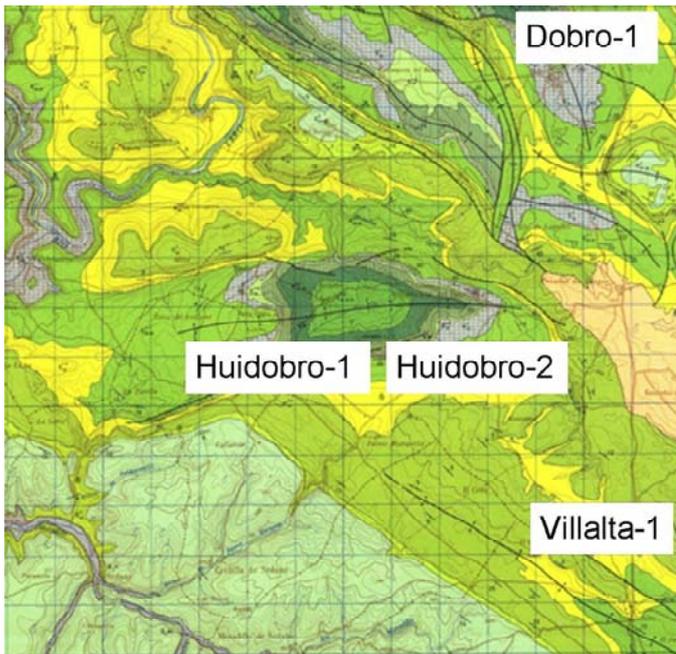


Figura 14: Mapa geológico de la zona denominada “Huidobro” y situación de los sondeos de exploración de hidrocarburos realizados en la misma.

En concreto, la zona de estudio denominada “Huidobro” está centrada en el anticlinal de Huidobro, limitando hacia la parte oriental con los anticlinales de Dobro y Villalta (ver Figura 13). En el núcleo del anticlinal de Huidobro afloran materiales de “facies Weald” los cuales, con los de la “facies Utrillas”, configuran morfológicamente la zona como deprimida. La estructura, circundada por los crestones calizos del Turoniense-Coniaciense, es de dirección E-O y está afectada por una falla normal E-O de pequeño salto, en su flanco meridional, y por dos fallas inversas en su flanco septentrional. Constituye la estructura anticlinal menos

tectonizada de la zona concreta de estudio, pues el anticlinal de Villalta se encuentra próximo y muy afectado por la halocinesis del diapiro de Poza de la Sal, y el anticlinal de Dobro está muy relacionado con la gran falla inversa continuación del cabalgamiento de la Sierra de Cantabria-Montes Obarenes. En cualquier caso, el anticlinal de Huidobro se ubica asimismo próximo a la citada gran falla inversa, que separa las dos zonas tectónicas de la hoja.

#### 4.2.2 Par sello/almacén

Para el análisis del par sello/almacén se ha estudiado el sondeo Huidobro-2, que está más exhaustivamente descrito y testificado que el Huidobro-1. Ambos se perforaron en el flanco sur del anticlinal de Huidobro y muy próximos entre sí. El sondeo Huidobro-2 abarca desde las arenas y arcillas de la aflorante “facies Weald” hasta el Kéuper, alcanzando una profundidad de 1469 m. Fue realizado por la compañía Amospain entre noviembre de 1966 y enero de 1967. Sintéticamente, de techo a muro, aparece la facies Weald hasta 430 m de profundidad, la “facies Purbeck” entre 430 m y 582 m. Por debajo aparece el Dogger, entre 582 m y 1070 m, fracturado, debajo del cual se sitúa el par sello/almacén considerado, correspondiente al denominado Lías margoso, entre 1070 m y 1355 m. Por debajo se sitúan el Lías Inferior y el Kéuper, entre 1440 m y 1469 m.

El par sello/almacén considerado es el tramo del Lías margoso, de edad Lías Medio-Superior, con una profundidad en el sondeo entre 1070 y 1355 m. Por debajo del mismo se encuentran el Lías Inferior, y el Rhaetiense-Kéuper. El sello corresponde a los tramos superiores de naturaleza margosa y más arcillosa, siendo su potencia máxima de unos 130 m [17]. No se han encontrado datos más concretos sobre la profundidad y potencia específica de estos niveles margo-arcillosos así como de su continuidad lateral.

El almacén propiamente o emplazamiento de almacenamiento presenta un espesor en la zona del sondeo de más de 200 m, con una profundidad de entre aproximadamente 1100 m y 1355 m. Lo constituyen calizas oolíticas, calizas arcillosas y calizas mudstones, permeables y con una porosidad de 8-12% [18], siendo su potencia media en la zona de unos 130 m [18]. Con la descripción que se tiene del sello no se puede hablar de una litología que garantice la capacidad de sellado idónea.

El complejo de almacenamiento presenta el problema de la fracturación del Dogger, formación situada inmediatamente a techo del par sello/almacén considerado, según consta en la documentación analizada del Proyecto PA95 [8]. La situación y el buzamiento de las fracturas descritas descartan en principio la consideración de contenciones secundarias.

#### 4.2.3. Aplicación del método

La aplicación de la metodología de análisis de riesgos HSE del par almacén/sello considerado a la zona de Huidobro se refleja en la Figura 15. Se observa que la evaluación del emplazamiento de almacenamiento realizado aparece dentro del área

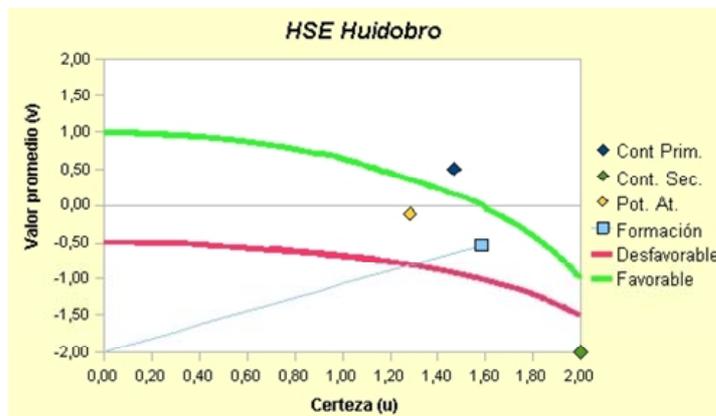


Figura 15: Representación gráfica de la aplicación de la metodología a la formación Huidobro

entre las líneas favorable y desfavorable, más o menos equidistante de ambas. El potencial para la contención primaria ha obtenido una mejor valoración que el potencial de atenuación, también con un mayor nivel de certidumbre.

No se ha analizado el potencial para la contención secundaria, debido a la fracturación del Dogger suprayacente al par almacén/sello, tal y como se explica en el epígrafe anterior.

### 4.3. La zona de “Leva”

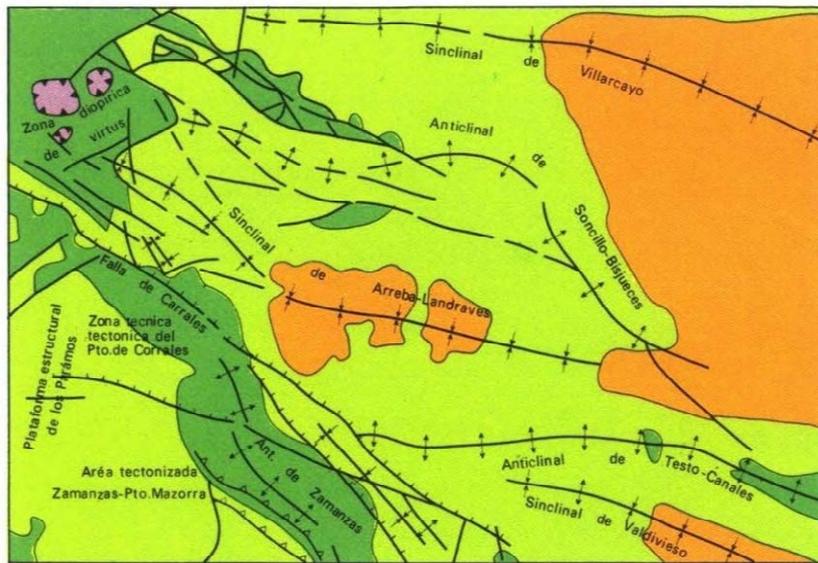
#### 4.3.1. Características

La zona de estudio (ver Figura 4), denominada “Leva”, se sitúa dentro de la hoja de Villarcayo (109) del Mapa Geológico de España a escala 1:50000 [7], cuya tectónica regional se configura como una región plegada y parcialmente fallada con direcciones predominantes ONO-ESE y NO-SE, como resultado de la actuación de los movimientos alpinos [7] (ver Figura 16).

Concretamente, la zona de estudio se limita al anticlinal de Soncillo (o Soncillo-Bisjueces), en el área del alto estructural en el que los materiales aflorantes pertenecen al Cretácico Superior y que se extiende en dirección ONO-ESE desde Cilleruelo de Bezana hasta el sondeo Navajo-1. En dicha zona se localizan tres sondeos profundos (ver Tabla

2 y Figura 17): Leva-1, Leva-2 y Navajo-1 [9, 19]. Es un área cuyos materiales aflorantes pertenecen al Cretácico Superior. Se trata de una estructura de dirección fundamental NO-SE, con un flanco norte afectado por fallas de dirección NO-SE y que hunden al sur, por lo que queda rota su continuidad con el sinclinal de Villarcayo. Cierra al estar relacionada por el área diapírica de Virtus. Su flanco sur aparece afectado por fallas de dirección NO-SE, que hunden hacia el norte [7].

Se trata de un área de complejidad estructural debido principalmente a la proximidad de la falla de Carrales y a las fallas asociadas, en la que se presume una intensa fracturación, así como la cercanía de la estructura diapírica de Virtus [19]. Los acúmulos



Escala 1 : 250.000



Figura 16: Esquema tectónico en la zona de Leva [7].

halocinéticos de sección circular en la zona diapírica de Virtus han sido interpretados como almohadillas salinas, mientras que en el sector de los sondeos Navajo-1 y Leva-1 se observa una morfología más irregular. En ambos casos se alcanzan espesores de 2500 a más de 3000 m para el Trías salino [8].

En ninguno de los sondeos profundos de la zona (Navajo-1, Leva-1, Leva-2 y Arcoiris), fruto de la prospección petrolífera, se obtuvieron resultados positivos. En Navajo-1 se encontraron indicios de gas en las pizarras y

calizas del Devónico y en las calizas del Muschelkalk. En Leva-1 se encontró presencia de petróleo ligero con saturación 8 %, pero sin gas ni presión, en los niveles margo-arenosos del Cenomaniense basal [19].

Actualmente no hay evidencias de acciones cuaternarias. Sin embargo hay sospechas de que se mantenga en la actualidad la situación distensiva que produjo una fracturación subparalela a las direcciones principales, en ocasiones aprovechando accidentes antiguos, tales como la falla de Carrales, y que produjo, como efectos más importantes, el desplazamiento en la vertical de 30 a 50 m de la superficie de erosión finieógena, una

Tabla 2: Sondeos de la zona de Leva [8]

Nombre	Compañía	Profundidad(m)	Inicio	Final	Fecha
Leva1	CAMPSA	1512	Cret.	Kéuper	01/01/57
Leva2	CAMPSA	2219	Cret.	Kéuper	30/03/58
Navajo1	ENIEMSA	5208	Cret.	Dev. Inf.	28/09/83

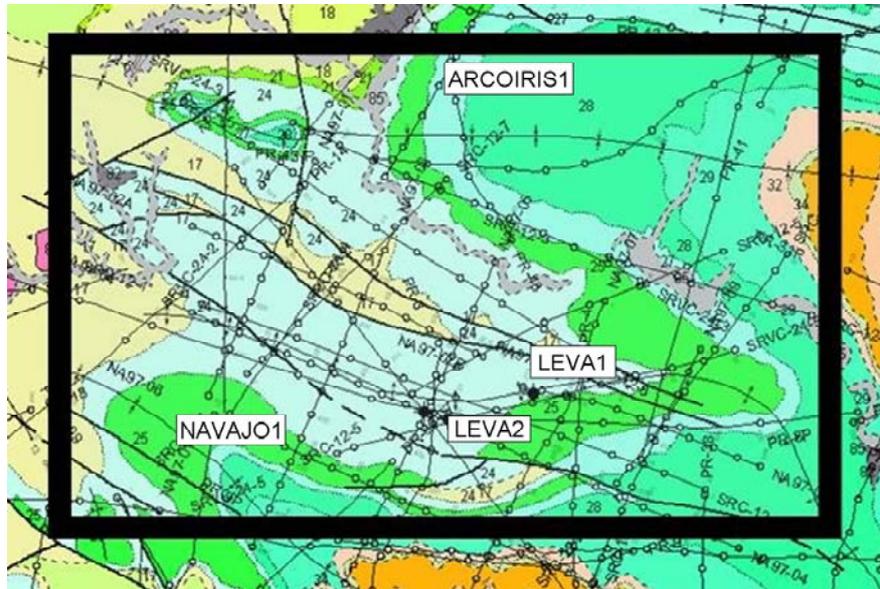


Figura 17: Situación de los sondeos geológicos profundos en el área de Leva (Pérez-Estaún, A.; Comunicación Personal).

subsistencia local con la acumulación simultánea de depósitos cuaternarios y el encajamiento de la red de drenaje [19].

La zona de estudio representa la máxima expresión de la superficie de erosión que constituye la principal unidad geomorfológica de la zona, y que se desarrolla entre los 920 m y los 1020 m [19] (ver Figura 18). Desde el punto de vista hidrogeológico, debe señalarse una alta complejidad estructural en relación principalmente con los accidentes de primer orden de la zona (falla de Carrales y su prolongación NO) [19]. En relación al funcionamiento hidrogeológico de los sistemas de flujo subterráneo y, al ser los términos superiores del Triásico superior fundamentalmente arcillosos, la formación salina actúa como substrato impermeable con respecto a las unidades suprayacentes, provocándose que dicha formación salina funcione como divisoria hidrogeológica según la dirección de la “Estructura diapírica de Cilleruelo de Bezana-Navajo”, ocupando la franja central del área con dirección ONO-ESE, que hacia el este se amortigua, y hacia el NO probablemente se prolonga bajo las aguas del embalse del Ebro, enlazando con la estructura de La Población. Los sistemas de flujo subterráneo adquieren direcciones hacia el N-NE y S-SO en los materiales permeables del Jurásico marino y Cretácico inferior, afectados por la divisoria hidrogeológica descrita. Por amortiguamiento de la estructura diapírica, en los materiales carbonatados y permeables del Cretácico superior, los flujos subterráneos adquieren direcciones fundamentalmente hacia el SE. De manera general, el gradiente hidráulico regional se considera bajo [19].

Los parámetros físico-químicos de los puntos de agua de la zona indican un pH ligeramente ácido. No existen descargas de aguas subterráneas profundas con evidencias de termalismo o anomalías hidrogeoquímicas. En términos generales, se observa que las aguas de este área se encuentran poco mineralizadas, lo que indica la escasa lixiviación de sales en su recorrido subterráneo y/o la proximidad del área de recarga por infiltración directa de lluvias [19]. La calidad de las aguas subterráneas es

muy buena, con un residuo seco inferior a los 400 mg/l, con una dureza generalmente inferior a 120 °F, no existiendo otros contenidos significativos de iones.

El acuífero de la zona pertenece al Sistema La Lora y Villarcayo [20] (ver Figura 19). Sus acuíferos principales se instalan en terrenos calcáreos de distintas edades. Concretamente, se distingue la unidad “Sinclinal de Villarcayo”, de unos 1000 km<sup>2</sup> de superficie permeable en cuyas calizas se estima se infiltran unos 160 hm<sup>3</sup>/año.

La zona de Soncillo-Bisjueces está definida por un amplio sector dominado en su mayor parte por materiales detrítico-terígenos gruesos, de tal forma que la mayor parte del agua de precipitación se infiltra, constituyendo un área de recarga que en buena parte debe descargar hacia la cuenca del Río Nela y al mismo tiempo recargar las unidades de Villarcayo y de Soncillo-Bisjueces [7].

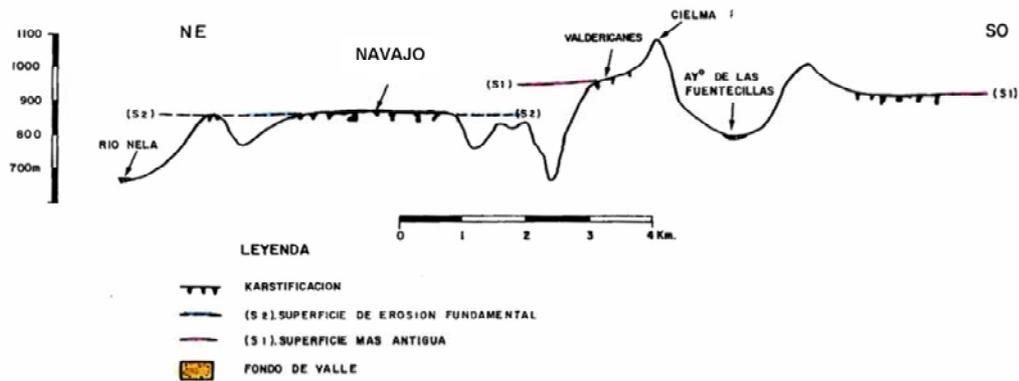


Figura 18: Superficie de erosión en el área de Leva [19].

La utilización del agua subterránea es actualmente escasa, no existiendo prácticamente sondeos ni pozos, centrándose la explotación en el aprovechamiento de manantiales para la mayor parte de los abastecimientos y pequeños regadíos familiares [20].

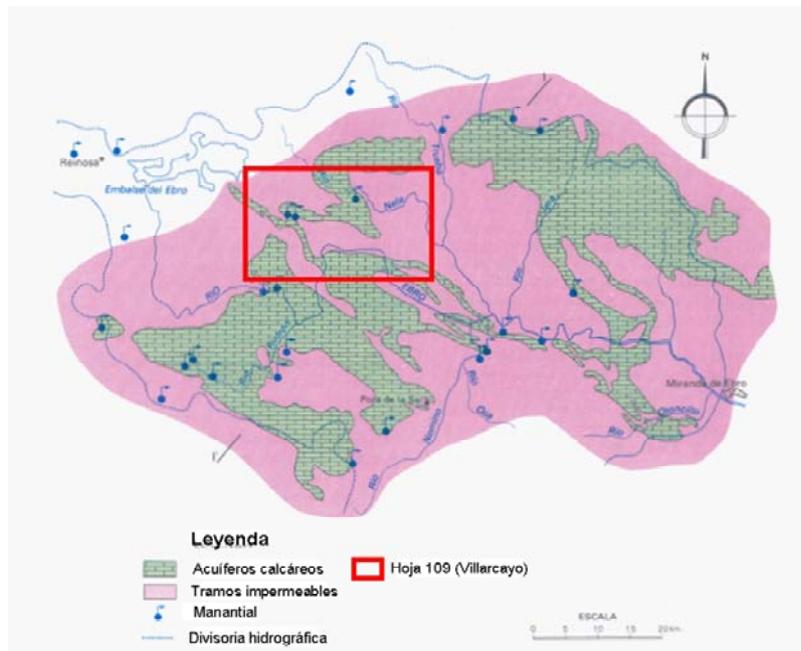


Figura 19: Sistema La Lora-Villarcayo [20].

Climatológicamente la zona se describe como mediterránea, variando entre continental templado y templado frío; y un viento dominante de dirección NE-SO y velocidad media de 6-7 m/s. La temperatura media anual es de 11.1 °C, con valores extremos de -5°C a 31 °C, con una precipitación media anual de 1138 mm, con valores extremos de 737 a 1470 mm [19].

#### 4.3.2 Par sello/almacén

En la zona de estudio, la facies Kéuper presenta en subsuelo un importante acúmulo. Discordantemente sobre el Kéuper, se deposita el Cretácico inferior no marino, posible formación almacén, en sus facies Purbeck, Weald y Utrillas más o menos diferenciadas, y que constituyen una potente sucesión terrígena continental con falta de continuidad lateral. Únicamente en el sondeo Leva-2 se describe la aparición de material liásico anhidrítico y dolomítico, en principio no válido para el almacenamiento de CO<sub>2</sub> dados sus valores estimados de permeabilidad y porosidad asociados.

El techo de la sucesión mesozoica está constituida por los depósitos del Cretácico superior (Cenomanense y Turonense) representado esencialmente por una alternancia entre unidades margosas y carbonatadas o mixtas de plataforma, con una base definida por un tramo siliciclástico de carácter continental. Únicamente en el sondeo Leva-2 se describe la aparición de material claramente impermeable con capacidad de sellado (calizas, calizas margosas y margas).

#### 4.3.3. Aplicación del método

Mediante la aplicación de la metodología a la zona de "Leva", la formación puede evaluarse a través de sus características relevantes para los riesgos HSE (ver Tabla 1),

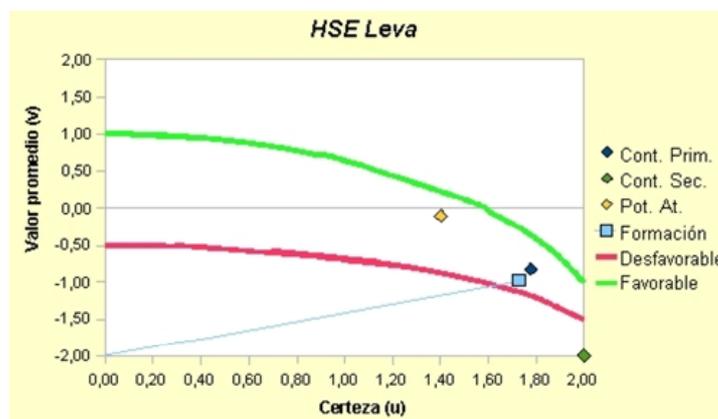


Figura 20: Representación gráfica de la aplicación de la metodología a la formación Leva.

que se representan en la Figura 20. En dicha Figura 20 se observa que la evaluación de la formación se sitúa dentro del área definida por las líneas favorable/desfavorable, aunque sensiblemente más cercana a ésta última. De las tres características evaluadas, el potencial de atenuación es el que mejor valoración ha obtenido, seguido del potencial para la contención primaria, cuyo valor promedio es menor aunque con un mayor nivel de certidumbre. Deben destacarse las propiedades del

emplazamiento desde el punto de vista de contención secundaria, cuya incidencia altamente negativa determina de manera importante el valor final de la evaluación.

## 5. Resultados y Conclusiones

El principal beneficio de la metodología aplicada es que expresa de manera formal tanto el conocimiento como las incertidumbres asociadas a las evaluaciones, de tal forma que en futuras iteraciones podría ser revisado y modificado si se dispusiese de nuevos datos. El sistema admite un amplio grado de versatilidad, permitiendo al evaluador asignar

distintos pesos en función de la importancia relativa para el riesgo de las propiedades indicadas en la Tabla 1. Dado que ello haría más complejas las comparaciones directas entre áreas, en el trabajo actual los pesos asignados a las distintas propiedades han sido los mismos para todos los emplazamientos bajo estudio. No obstante, la transparencia del sistema y su simplicidad permite a cualquier revisor alterar los pesos asignados y realizar nuevos análisis para comparar los efectos de esos cambios en la respuesta del emplazamiento.

La metodología ha permitido establecer un orden que cuantifica la idoneidad relativa de un potencial emplazamiento de una planta piloto de inyección de CO<sub>2</sub> frente a los demás candidatos. Un resumen de los resultados de la metodología aplicada a los emplazamientos se ilustra en la Figura 21. De los tres emplazamientos en estudio, el de Huérmeces es el que presenta los mejores resultados en la evaluación relativa de las características consideradas, con una magnitud promedio de la formación de 2.6, asociada sobre todo a la certeza en el conocimiento de las propiedades de la formación, ya que la magnitud de su índice evaluador “valor promedio de la formación” es sólo ligeramente positivo (0.17). Las otras dos formaciones comparten con la anterior un buen nivel de certidumbre, aunque los valores promedio en ambas son claramente negativos (Huidobro, -0.54; Leva, -0.97) y, por tanto, se sitúan en evidente desventaja frente a la primera como potenciales emplazamientos de una planta piloto de inyección.

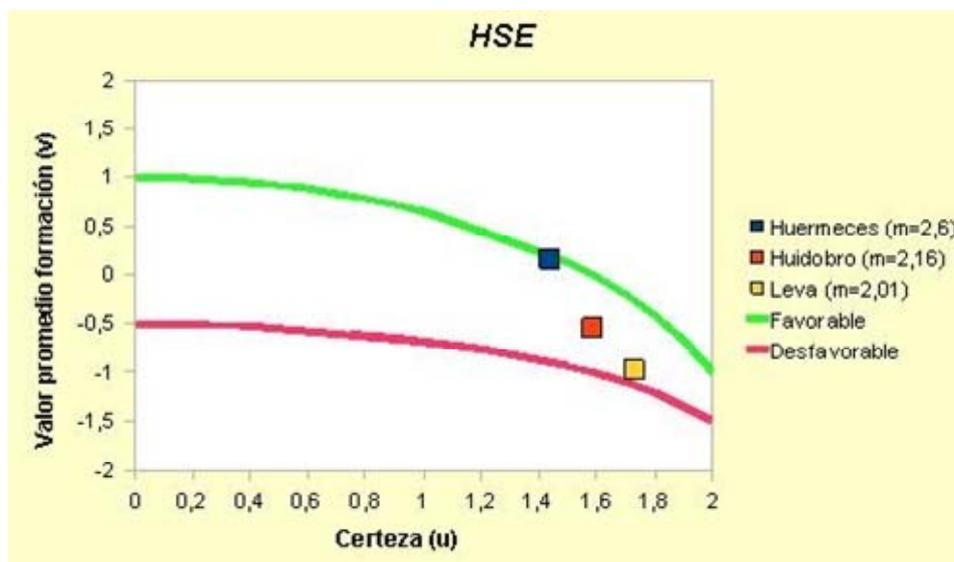


Figura 21: Valoración final de zonas.

Tabla 3: Tabla resumen de resultados

	Cont. Prim.		Cont. Sec.		Pot. At.		Formación		Magnitud
	Valor	Certeza	Valor	Certeza	Valor	Certeza	Valor	Certeza	
<b>Huérmeces</b>	0.67	1.84	0.18	1.12	-0.35	1.34	0.17	1.43	2.60
<b>Huidobro</b>	0.50	1.47	-2.0	2.0	-0.11	1.28	-0.54	1.58	2.16
<b>Leva</b>	-0.82	1.78	-2.0	2.0	-0.10	1.40	-0.97	1.73	2.01

La formación almacén probablemente mejor calificada en la zona de Huérmeces (sector del Anticlinal de Hontomín) es la Unidad Clástica del Lías, un nivel de calizas intercaladas

con calizas dolomíticas y dolomías, de 114, 92 y 62 m potencia en los sondeos Hontomín-1, Hontomín-2 y Hontomín-3, respectivamente, al que se atribuye una permeabilidad media y que constituye un acuífero profundo muy salino, a presión hidrostática y con un flujo lento. En Hontomín-3, la referida formación almacén se sitúa entre los 1238 y los 1300 de profundidad, y se señala la existencia de una falla a la profundidad de 1259 m con pérdida total temporal de fluido de perforación, lo que podría comprometer la estanqueidad de aquella.

La contención primaria, que incluye el nivel almacén y el sello primario, es de carácter predominantemente margoso y con calizas arcillosas intercaladas, con presumible continuidad lateral y potencias de 40, 115 y 94 m en los citados sondeos. Se señalan indicios de hidrocarburos en Hontomín-1 y Hontomín-3, y una producción de casi 3000 barriles de petróleo en Hontomín-2, lo que avala su capacidad de sello. A efectos de la evaluación de su efectividad como sello, se le ha asignado, no obstante, una potencia inferior a los 100 m. La profundidad es superior a los 1000 m.

La contención primaria o primer sello, da un valor promedio de atributos de 0.67 (ver ahora y en adelante la Tabla 3), en un rango de 2 (excelente) a -2 (desaconsejable), con un grado de certeza promedio de 1.84, siendo 2 bien conocido, y una puntuación promedio de 1.37.

La contención secundaria es de litología calizo-margosa y de potencia inferior a los 20m en Hontomín-1, Hontomín-2 y Hontomín-3, pero mayor en Hontomín-SW1, Hontomín-SW2 y Valdearnedo-1. Esta contención secundaria se establece a una profundidad de 200-300m, por lo que su efectividad va a estar muy condicionada por la intensidad local del relieve, máxime si como parece, la formación puede aflorar localmente en superficie. La contención secundaria, tiene un promedio de atributos de 0.18, con un grado de certeza de 1.12, y una puntuación promedio de 0.18.

El potencial de atenuación es bajo, -0.35, pero no malo, siendo -2 un emplazamiento desaconsejable y 2 un emplazamiento excelente, con una certeza promedio de 1.34 y una puntuación promedio de -0.34. De los tres sistemas de acuíferos someros, los que vierten a la cuenca del Ebro, arman en las calizas del Turoniense - Coniaciense, a techo del nivel de sello secundario. Los que vierten a la cuenca del Duero, arman en materiales detríticos terciarios.

Como conclusión, puede decirse que este emplazamiento goza de un buen sello primario, pero un secundario no tan bueno, si bien el potencial de atenuación también es aceptable, lo que disiparía las fugas procedentes de un escape desde el almacén.

Desde el punto de vista de la seguridad global del almacenamiento en la zona de Huérmeces, el rasgo de mayor significación es la existencia de un sistema de fracturas NO-SE, la Falla de Urbel, que separa dos dominios estructurales y que forma parte del sistema de fracturas de Ventaniella, con macrosismicidad asociada, reflejo de fracturas de dirección de edad alpina que llegan al zócalo. Ambos dominios estructurales y la Falla de Urbel están afectados por el diapirismo del Kéuper. Como se ha dicho anteriormente, una de las fracturas afecta a la formación almacén en el sondeo Hontomín-3 a 1259 m de profundidad. Se trata de una falla abierta que causa pérdida del fluido de perforación. Otra fractura, a 1096 m de profundidad, afecta a la contención primaria.

En comparación, las zonas de Huidobro y Leva arrojan valores promedio de 0.50 y de -0.82 para la contención primaria, con un grado de certeza promedio de 1.47 y 1.78, respectivamente. Las contenciones secundarias presentan un promedio de atributos de -2.00, en ambos casos, y con un grado de certeza también de 2.00. El potencial de atenuación en las zonas de Huidobro y Leva es muy bajo, -0.11 y -0.10, con una certeza promedio de 1.28 y 1.40, respectivamente.

Por tanto, el emplazamiento denominado Hontomín finalmente seleccionado ofrece los siguientes puntos fuertes:

- Una contención primaria, que incluye el nivel almacén y el sello primario y que expresa el potencial de la formación objetivo para la contención de CO<sub>2</sub> a largo plazo, que da un valor promedio de atributos de 0.67 en un rango de 2 (excelente) / -2 (desaconsejable), claramente por encima de la curva de “comportamiento favorable”, y con un grado de certeza promedio de 1.84 sobre un máximo de 2.00, basado en datos de sondeo razonablemente bien conocidos.
- Una contención secundaria, que expresa el potencial de una contención adicional en caso de fuga en la formación objetivo, que da un promedio de atributos de 0.18, ligeramente por debajo de la curva de “comportamiento favorable”, con un grado de certeza promedio de 1.12.
- Un potencial de atenuación, que expresa la capacidad del emplazamiento, incluido el recubrimiento por encima del sello secundario, para atenuar o dispersar eventuales fugas de CO<sub>2</sub> en el caso de fallo sucesivo de las contenciones primaria y secundaria (concepto de barrera múltiple), que es bajo, con un valor promedio de -0.35, por encima de la traza de la curva de “comportamiento desfavorable”, siendo -2 un emplazamiento desaconsejable, y con un grado de certeza de 1.34, sobre 2.00.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo desean expresar su agradecimiento a la Fundación Ciudad de la Energía (Ciuden) por la financiación de este trabajo así como por facilitar el acceso a los datos de partida.

## Referencias

- [1] van Egmond, B. “*Developing a method to screen and rank geological CO<sub>2</sub> storage sites on the risk of leakage.*” Copernicus Institute. Department of Science, Technology and Society. NWS-E-2006-108. August 2006.
- [2] Oldenburg, C.M. “*Health, Safety, and Environmental Screening and Ranking Framework for Geologic CO<sub>2</sub> Storage Site Selection.*” LBNL 58873. 2005.
- [3] Keeney, R.L. “*Siting Energy Facilities.*” Academic Press, New York. 1980.
- [4] Keeney, R.L.; y Raiffa, H. “*Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Tradeoffs.*” John Wiley and Sons, New York. 1976.
- [5] Lomba L., Ruiz C. y Recreo F. “*Breve descripción bioclimática de la cuenca del Duero*” Informe CIEMAT. CIEMAT/DIAE/551/55120/05/03. 2003
- [6] Pineda, A. “*Mapa y Memoria explicativa de la Hoja 167 (Montorio) del Mapa Geológico de España a escala 1:50.000 (Segunda serie).*” IGME. Madrid. 1997.
- [7] del Olmo Zamora, P; Carreras Suárez, F.; Ramírez del Pozo, J.; Aguilar. M.; y Leal, M.C. “*Mapa y Memoria explicativa de la Hoja 109 (Villarcayo) del Mapa Geológico de España a escala 1:50.000 (Segunda serie), Primera edición.*” IGME. Madrid. 1979.
- [8] “*Geología de emplazamientos. Estudio geológico estructural. Sector oriental de la Cordillera Cantábrica.*” RCO. Tomo 1.Memoria. 96-RCO-IF. ENRESA. 1999.
- [9] Lanaja, J.M.; y Navarro, A. “*Contribución de la exploración petrolífera al conocimiento de la geología de España.*” IGME. 1987
- [10] “*Hontomín Structure. Final Review. Montorio permit.*” SHESA. 1992.
- [11] “*Permiso de Ubierna. Sondeo Hontomín-1. Informe Final.*” AMOSPAIN. 1966.
- [12] “*Final Report Hontomín-2, Montorio Permit, Province of Burgos, Spain.*” SHESA. 1992

- 
- [13] "Final Geological Report Hontomín-3, Montorio Permit. Province of Burgos, Spain." SHESA. 1991.
- [14] "Informe Final del Sondeo Hontomín-SW1 (Exploración). Permiso Hontomín." SHESA
- [15] "Informes Semanales de Perforación del sondeo Hontomín-SW2." ENIEPSA. 1977.
- [16] "Permiso de Ubierna. Sondeo Pino-1. Informe Final." AMOSPAIN. 1966.
- [17] Carreras Suárez, F.; y Ramírez del Pozo, J. "Mapa y Memoria explicativa de la Hoja 135 (Sedano) del Mapa Geológico de España a escala 1:50.000 (Segunda serie)." IGME. Madrid. 1979.
- [18] Pendás Fernández, F.; y Menéndez Casares, E. "Mapa y Memoria explicativa de la Hoja 134 (Polientes) del Mapa Geológico de España a escala 1:50.000 (Segunda serie)." ITGE. Madrid. 1994.
- [19] "Proyecto AFA. Estudios temáticos en medios sedimentarios. Pantano del Ebro (SK-84). Capítulo 13: Monografía (resumen y conclusiones)." Memoria. 46.93-SK-04-IF. Tomo XIV de XIV. 1993.
- [20] IGME: Porrás Martín J.; Nieto López-Guerrero P.; EPTISA: Alvarez- Fernández C.; Fernández Uría A.; y Gimeno M.V. "Calidad y contaminación de las aguas subterráneas en España." IGME. 1985.