



POLITÉCNICA

Ingeniamos el futuro



Cursos de verano UPM. La Granja
Tecnologías de lucha contra el cambio climático.
Captura y almacenamiento de CO₂.



Metodología y criterios de selección de estructuras potencialmente idóneas para el almacenamiento de CO₂. Metodología y procedimiento de caracterización.

Bernardo Llamas Moya

Dr. Ingeniero de Minas

Prof. Universidad Politécnica de Madrid. ETSI. Minas

Universidad Politécnica de Madrid
06 de julio de 2011

☞ SELECCIÓN DE ESTRUCTURAS

- ☞ Criterios de selección

- ☞ Metodología de jerarquización – Herramienta informática

- ☞ Proceso de caracterización. Paso 1

☞ SITUACIÓN ESPAÑOLA

- ☞ Caracterización escala cuenca

- ☞ Próximos trabajos

☞ CONCLUSIONES

- SELECCIÓN DE ESTRUCTURAS

 - Criterios de selección

 - Metodología de jerarquización – Herramienta informática

 - Proceso de caracterización. Paso 1

- SITUACIÓN ESPAÑOLA

 - Caracterización escalonada

 - Próximos trabajos

- CONCLUSIONES

**ANOTACIONES PREVIAS
ALMACENAMIENTO CO₂**

DEFINICIÓN:

La inyección y confinamiento de CO₂ en formaciones geológicas subterráneas.

Ley de almacenamiento geológico de dióxido de carbono (Ley 40/2010)

Confinamiento: supone la **retención segura** del CO₂ en la formación elegida, durante periodos de tiempo.

CO₂: Aceptar e inyectar flujos de CO₂ únicamente si se ha llevado a cabo un análisis de su composición.

Formaciones geológicas: estructuras que dadas sus características presentan una situación favorable a la retención y confinamiento de fluidos.

En el caso de un almacenamiento de CO₂, las características deben definirse.

- Naturales
 - Regiones activas (tectónicamente)
 - Regiones/cuencas sedimentarias

Stromboli, 27-02-2007



Panarea. Italia
IEA-GHG



Geiser Daisy, Yellowstone (EEUU)



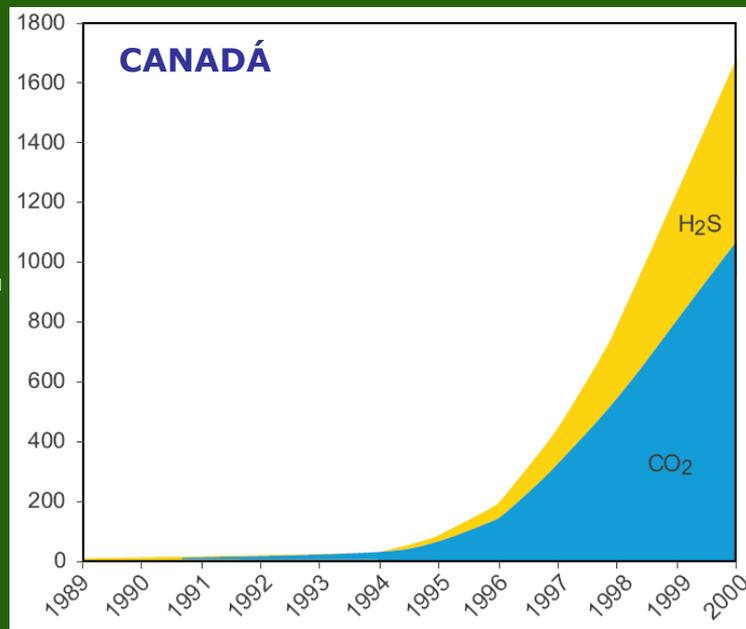
Burbujeo de CO₂ en cuenca sedimentaria
República Checa.
IEA-GHG

- Yacimientos de CO₂ (en explotación, y con fines industriales en EEUU)

Explotaciones de CO ₂ en EEUU	Reservas de CO ₂ 10 ⁶ ·m ³	profundidad (m)
Big piney-la barge	3.794.451,2	4.500
McElmo dome	481.385,6	1.800-2.600
Bravo dome	453.068,8	600-700
St Johns.-Springerville dome	447.405,4	200-700
Jackson dome	283.168,0	>5.000
Farnham dome	62.297,0	900
Gordon Creek	3.964,4	3.300-3.900
Escalante	113.267,2	400-960
Sheep Mountain	70.792,0	1.000-1.800
North McCallum	ND	1.500
Des Moines	ND	610
Indian Creek	ND	2.060

- Industriales

Almacenamiento de gases ácidos



Gases ácidos procedentes de crudos de petróleo ácidos (>1% de contenido de gases ácidos). Estos son: H₂S, CO₂.

La primera inyección de gases ácidos en el subsuelo comenzó en 1989 en las afueras de Edmonton (Canadá). A finales del año 2003 estaban activos 41 proyectos de inyección.

Medida medio ambiental: La aplicación de esta técnica se desarrolló en Canadá como forma de reducir las emisiones a la atmósfera de H₂S procedente de la industria extractiva de pozos de petróleo (crudo ácido). Este tipo de crudos deben ser procesados para retirar el H₂S y el CO₂ antes de su comercialización.

- Industriales

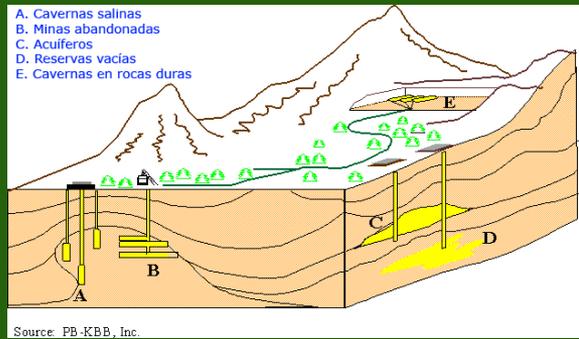
Almacenamiento de gas natural

Inyección de gas natural (CH₄) en formaciones idóneas.

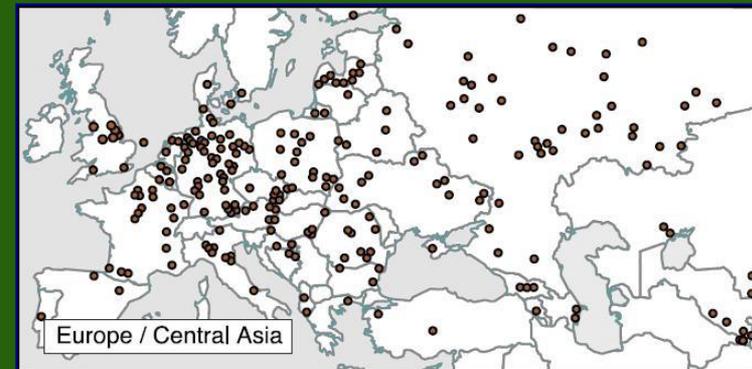
Tipos de formaciones consideradas:

- Reservas de hidrocarburos vacías.
- Acuíferos salinos profundos.**

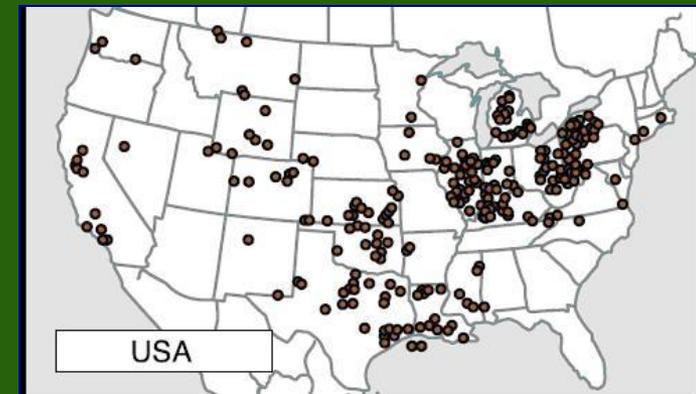
Aproximadamente el 98% de los almacenes son de este tipo.



Source: PB-KBB, Inc.



> 100 emplazamientos/estructuras



> 500 emplazamientos/estructuras

SELECCIÓN DE ESTRUCTURAS

Criterios de selección

Metodología de jerarquización – Herramienta informática

Proceso de caracterización. Paso 1

SITUACIÓN ESPAÑOLA

Caracterización escala cuenca

Próximos trabajos

CONCLUSIONES

Anexo I, Ley 40/2010 sobre almacenamiento de CO₂ **Criterios de caracterización y de evaluación del complejo de almacenamiento potencial y de la zona circundante.**

La caracterización y la evaluación de los lugares de almacenamiento contemplados en esta Ley se llevarán a cabo en tres etapas:

1. Recogida de datos



2. Creación del modelo geológico estático tridimensional

3. Caracterización del modelo dinámico del almacenamiento, sensibilidad y evaluación del riesgo

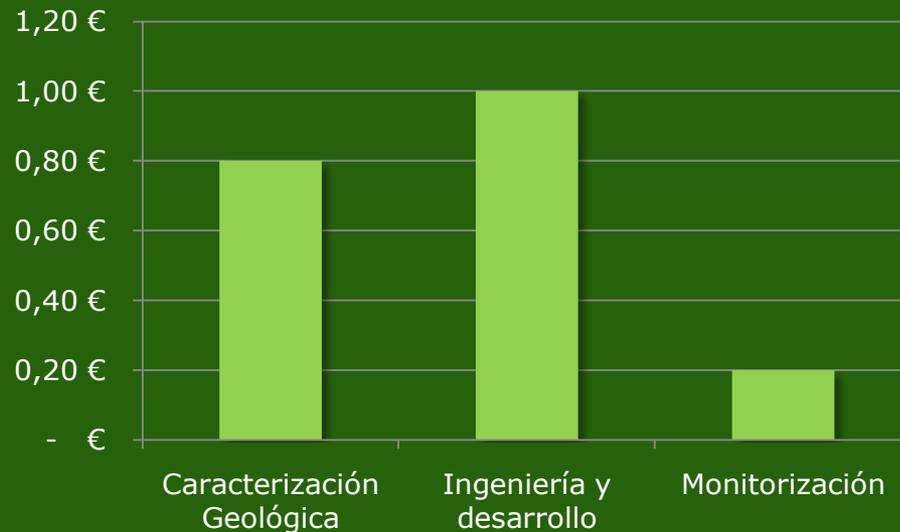
- 3.1 – caracterización del comportamiento dinámico del almacenamiento
- 3.2 – caracterización de la sensibilidad
- 3.3 – evaluación del riesgos

- La exploración de estructuras geológicas profundas*, supone:
 - Grandes inversiones
 - Alto riesgo
- + **Es la etapa clave en el desarrollo de la tecnología CAC**

**Profundo: por encima de los 800 m, situación en la que por P y T^a se alcanza el estado supercrítico.*



- Captura de CO₂
- Transporte CO₂
- Almacenamiento de CO₂



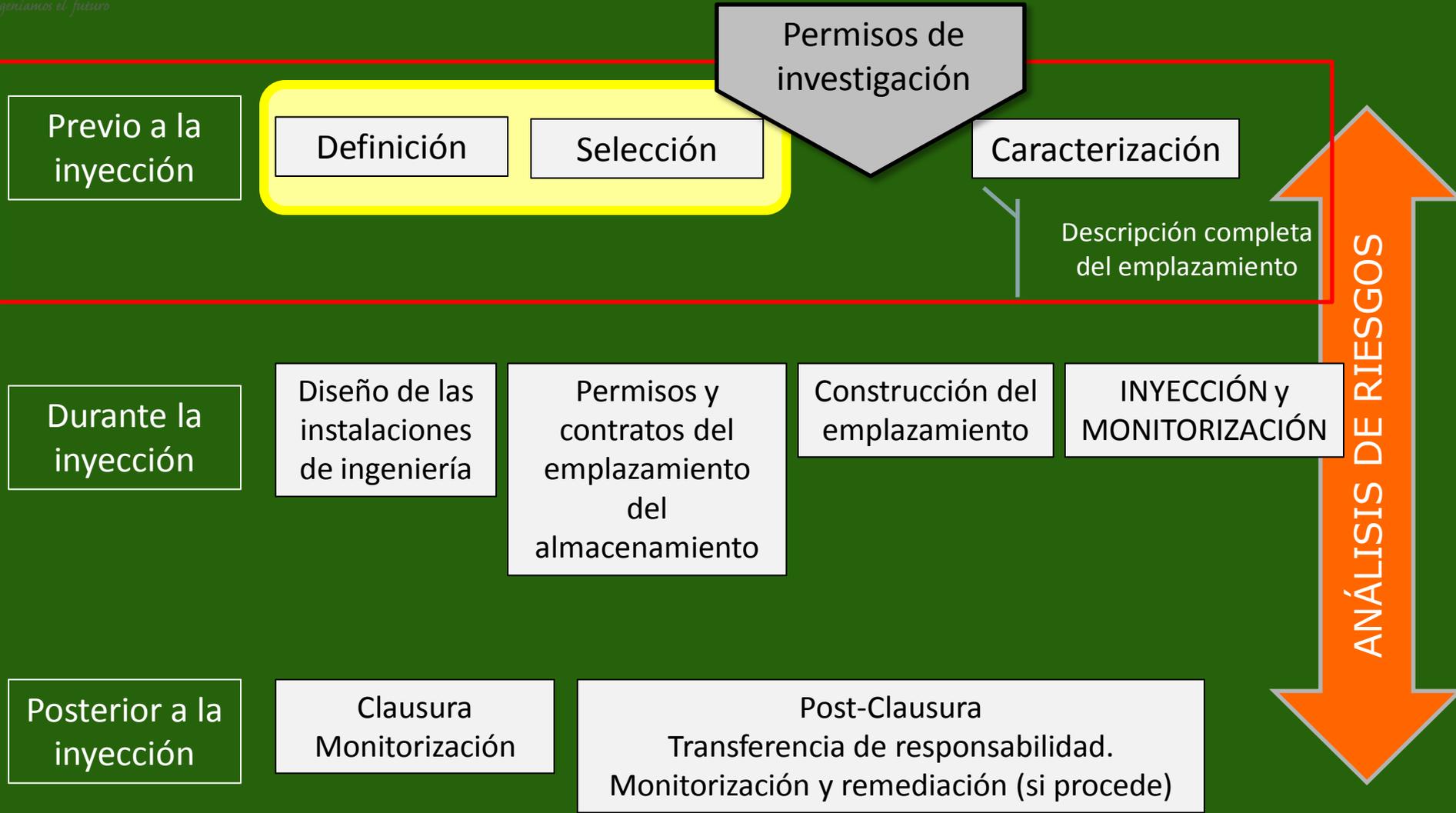
- Costes de exploración (caracterización geológica):

	Unidades	Coste unitario	Coste total
Sísmica de reflexión, 2D	300 km	17.000 €	5,1 M€
Sísmica de reflexión 3D	60-80 km	23.000 €	1,38 – 1,84 M€
Sondeos mecánicos	5-6	4 – 5 M€	20 – 30 M€
TOTAL			26,48 – 36,94 M€

Nomad 65, CGG VERITAS



Es conveniente saber qué buscamos



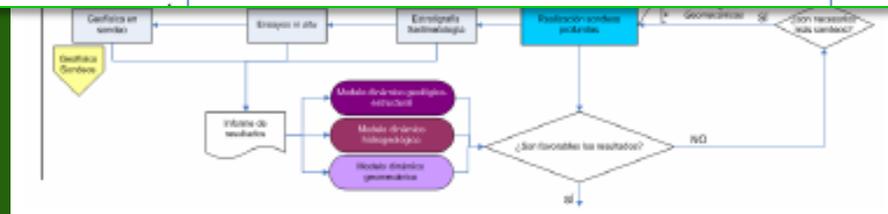
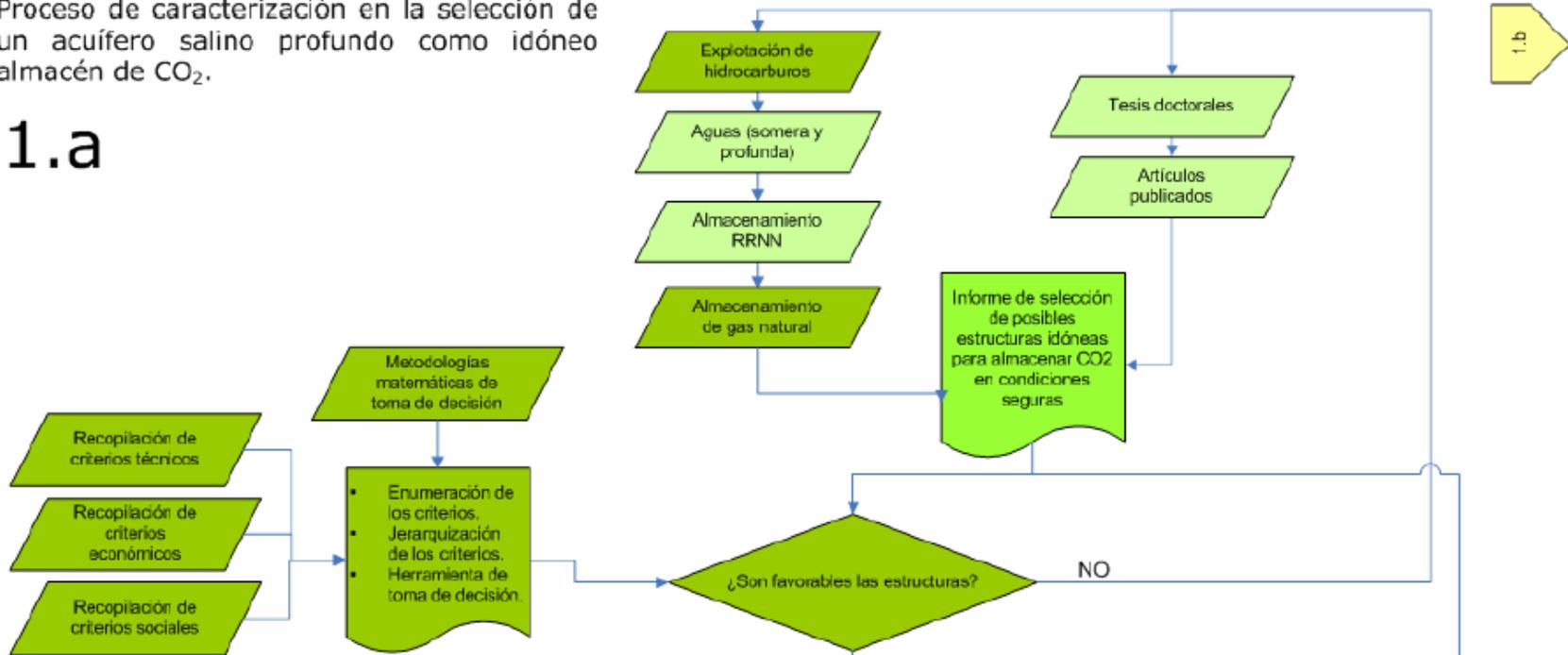
¿Qué buscamos?



Proceso de caracterización en la selección de un acuífero salino profundo como idóneo almacén de CO₂.

1.a

ETAPA DE DEFINICIÓN



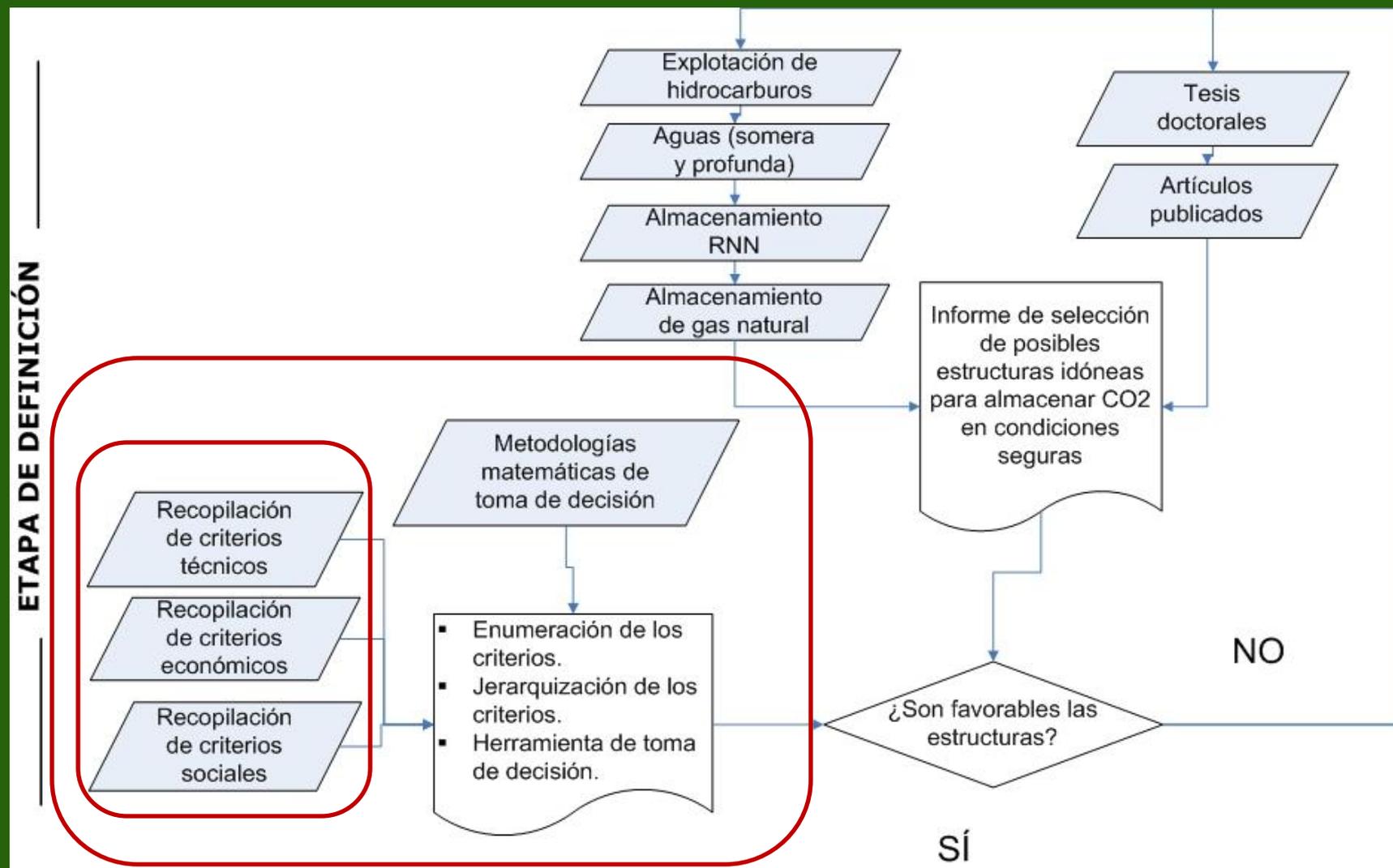
- La selección de un emplazamiento geológico profundo para el **confinamiento seguro** de CO₂ se deberá basar en una serie de criterios: problema con múltiples criterios de selección.
- Dichos criterios deberán ser:
 - Técnicos
 - Socio-económicos

B. Llamas (2007)

▪ Definición de los criterios de selección

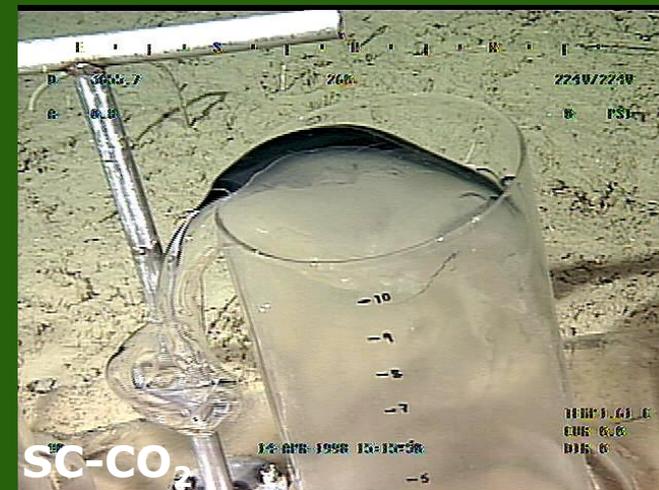
- **Criterio** (DEF.): norma o juicio para conocer la verdad. *Puede ser también definido como una herramienta para evaluar y comparar acciones potenciales de acuerdo a un punto de vista definido.*
- Los criterios deben ser:
 - **SENCILLOS Y CUANTIFICABLES**
- Los criterios en un primer nivel serán divididos en:
- **Técnicos**: aquellas variables que evalúan parámetros geológicos, tectónicos, petrofísicos, capacidad, etc.
- **Socio-económicos**: variables como la calidad y cantidad de la información, ubicación y calidad del foco emisor, etc.

- Desarrollo de un almacenamiento.
 - Definición del problema. Metodología

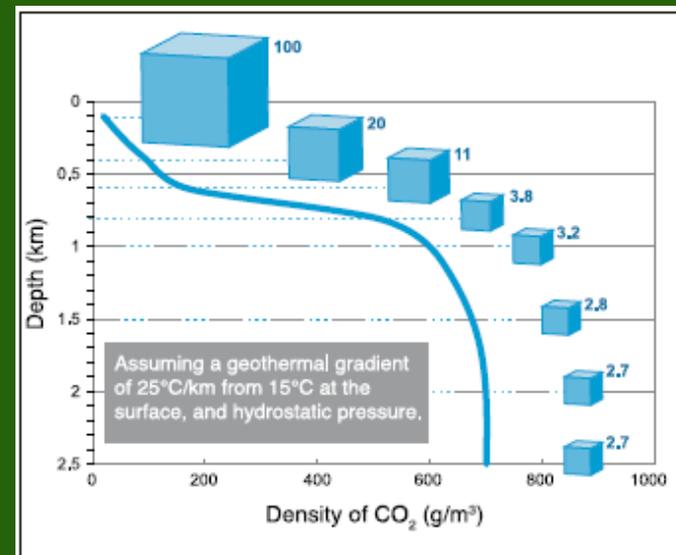
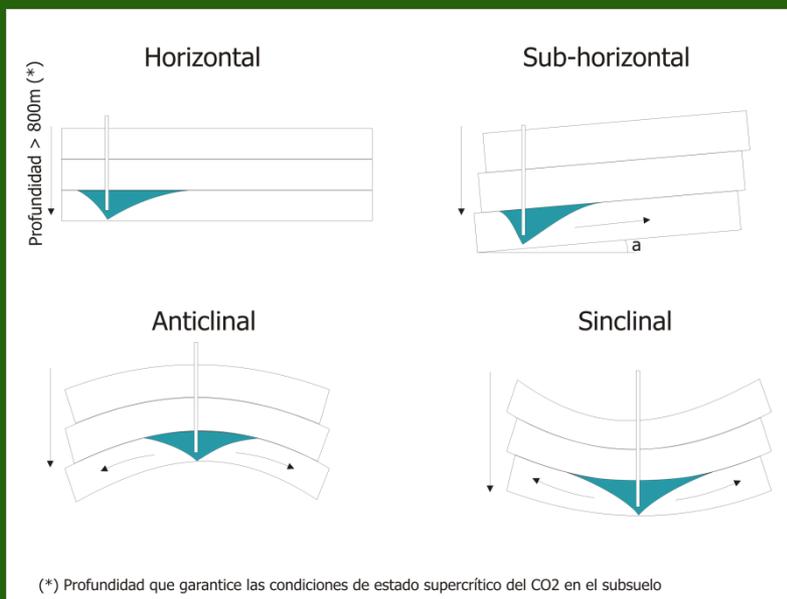


CRITERIOS TÉCNICOS:

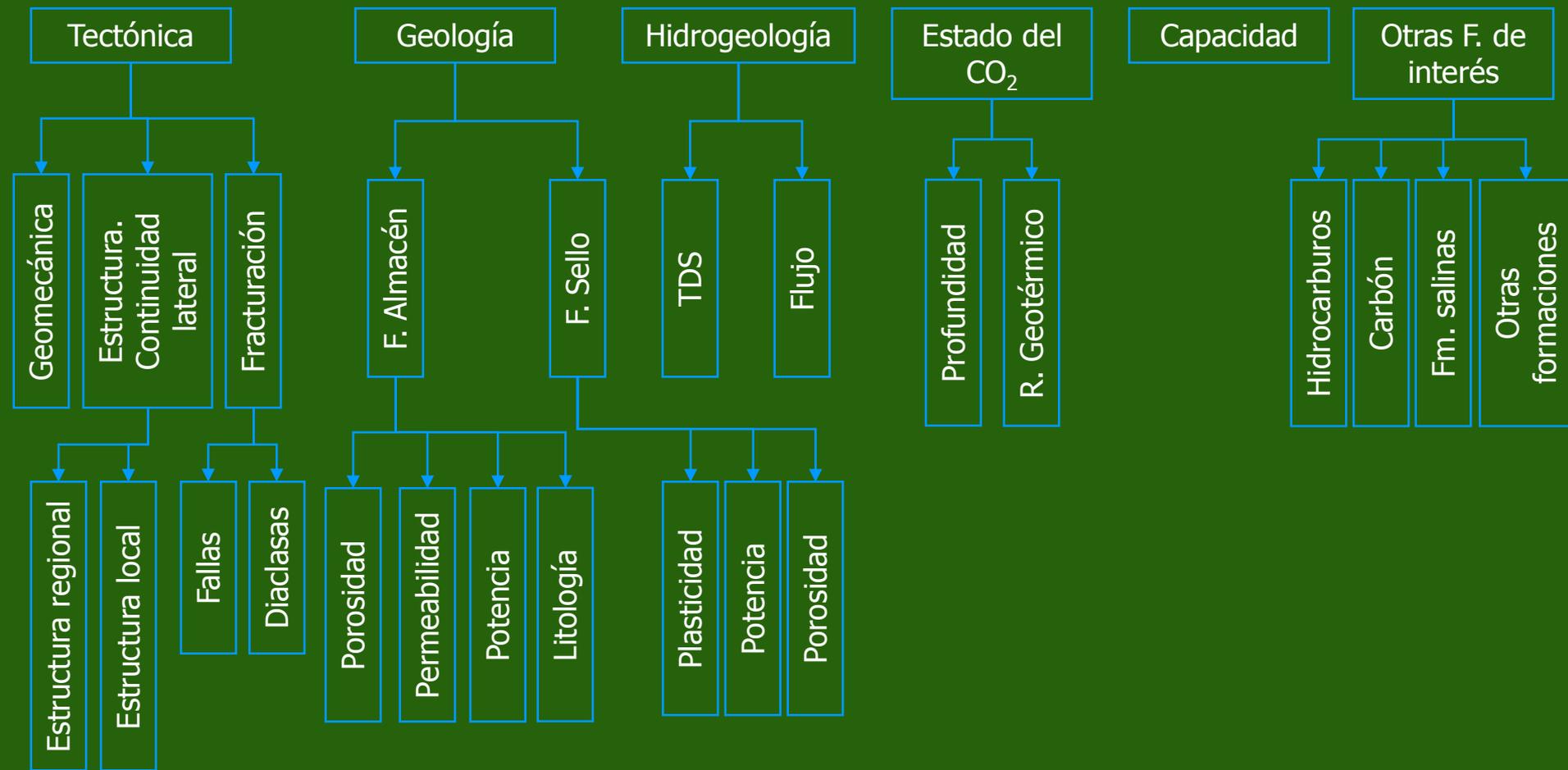
- Estructuralmente favorable
- Geología: fm. Almacén y sello
- Profundidad y temperatura
- Capacidad
- Hidrogeología
- Existencia de otras formaciones



*Proyecto mbari.
Profundidad ensayo (océano) > 3400 m*



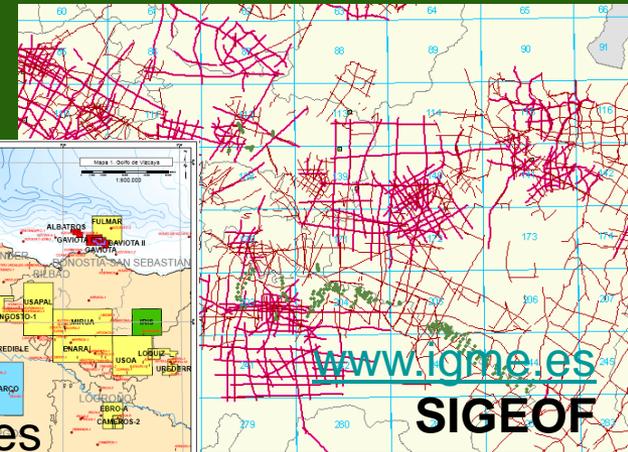
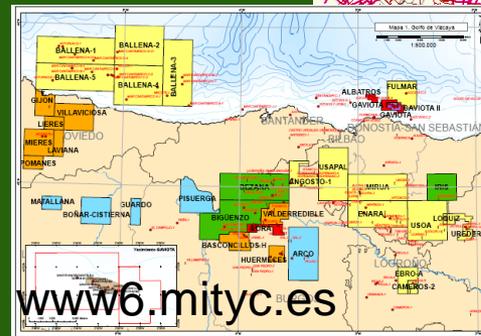
■ Criterios técnicos (CRITERIO PRIMER NIVEL)



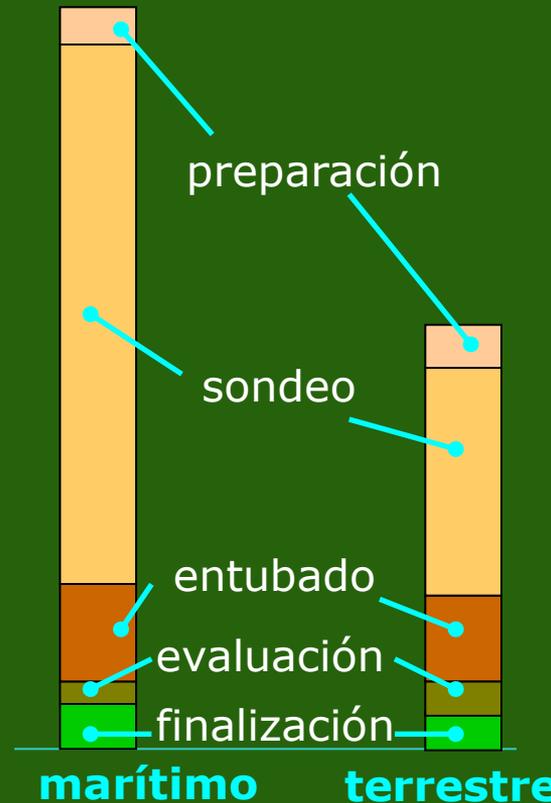
- Criterios técnicos (**VALORES ÓPTIMOS**):
 - Estructural: anticlinal, escasamente fallada
 - Geología almacén: arenisca especialmente, carbonatos en segundo nivel.
 - Geología sello: arcillas o margas, gran potencia
 - Hidrogeología: régimen regional y TDS > 10.000 ppm
 - Estado del CO₂: presión (profundidad) y T^a → 800 m y cuenca fría.
 - Capacidad:
 - Piloto ≥ 100.000 kt
 - Industrial ≥ 100 Mt (vida útil industria)
 - Otras formaciones de interés: área sin ningún otro interés en formaciones someras.

■ CRITERIOS SOCIO-ECONÓMICOS

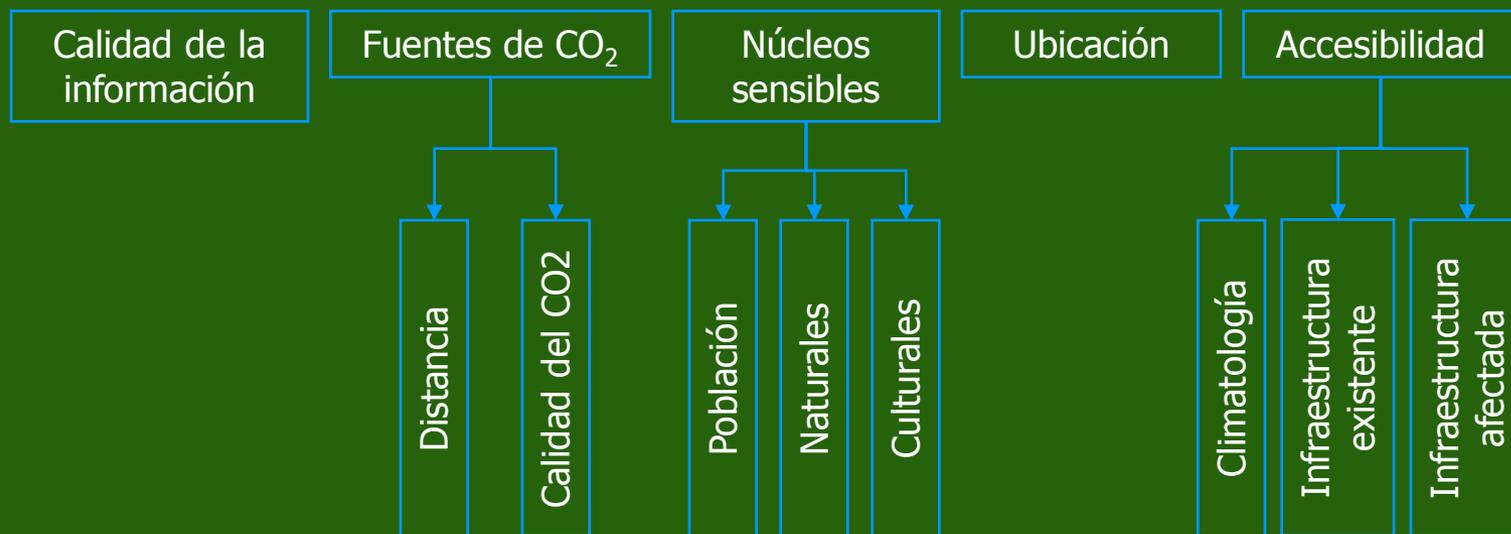
- Fuentes de CO₂
- Núcleos sensibles
- Calidad de la información
- Ubicación
- Accesibilidad



IEA-GHG, 2005		CAPEX			
Tipo de formación	Ubicación	Desarrollo del emplazamiento	Sondeos (por m.) Estimación año 2000.	Instalaciones en superficie	Monitorización
Reservas de gas	Terrestre	1,6 M€	1750 €	0,4 M€	0,2 €
	Marítimo	1,8 M€	2500 €	25,0 M€	
Reservas de petróleo (con o sin EOR)	Terrestre	1,6 M€	1750 €	0,5 M€	4,2 M€
	Marítimo	1,8 M€	2500 €	25,0 M€	
Acuíferos confinados	Terrestre	1,6 M€	1750 €	0,4 M€	2,0 M€
	Marítimo	1,8 M€	2500 €	25,0 M€	
ECBM	Terrestre	1,8 M€	500 €	0,4 M€	2,0 M€
	Marítimo	--	--	--	--

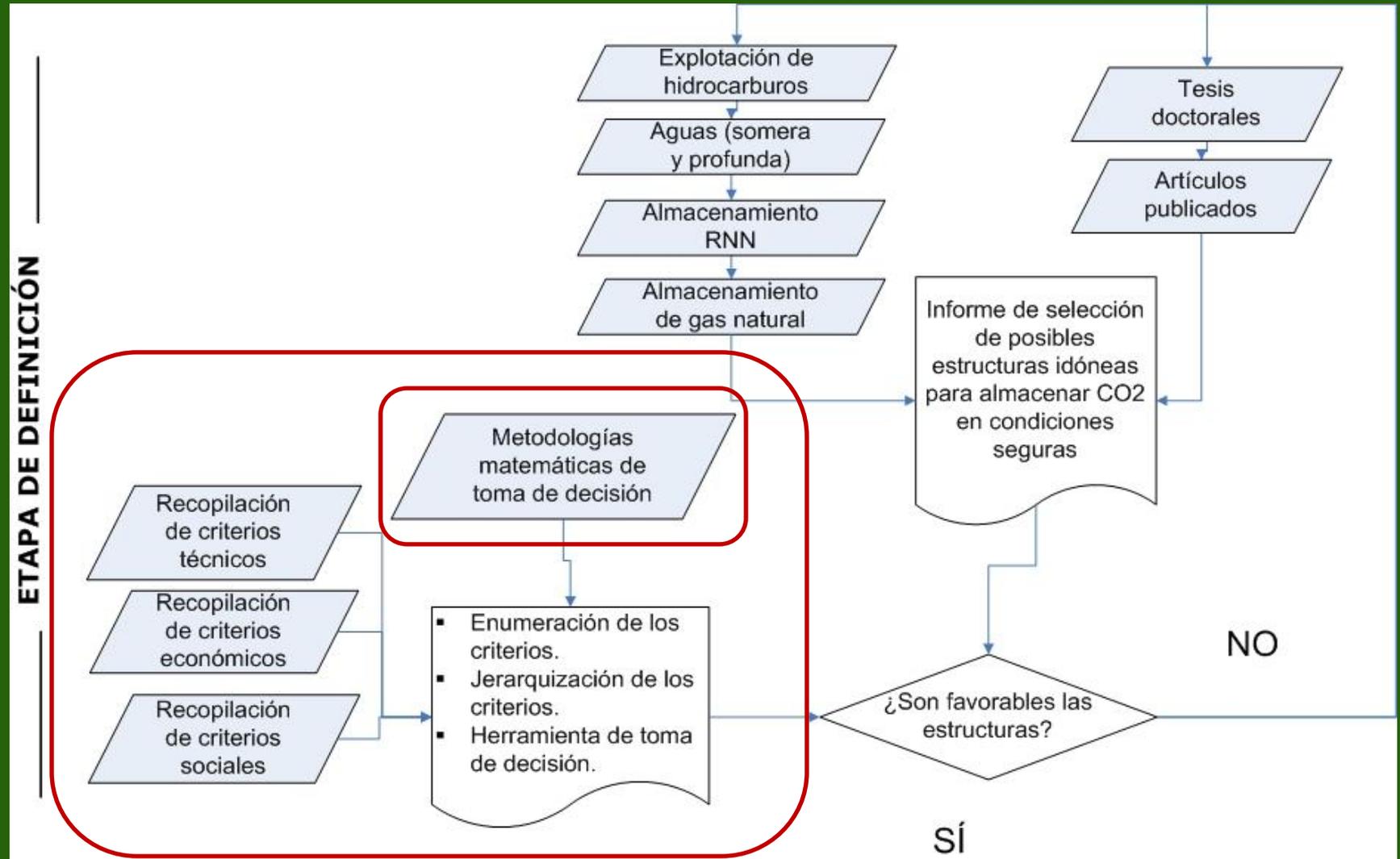


- Criterios socio-económicos (CRITERIO PRIMER NIVEL)



- Criterios socio-económicos (**VALORES ÓPTIMOS**):
 - Información: sondeos mecánicos profundos y sísmica en la zona. 
 - Fuentes del CO₂: corriente sin impurezas nocivas y que interaccionen con la formación almacén y/o sello.
 - Fuentes del CO₂: distancia foco/estructura < 25 km
 - Núcleos sensibles: área de interés (exploración & explotación) no superpuesta con Espacios Naturales Protegidos, monumentos naturales o poblaciones.
 - Ubicación: entorno terrestre (reducción de costes)
 - Accesibilidad: que exista infraestructura que permita el despliegue de herramientas de caracterización y explotación.
 - Accesibilidad: que la infraestructura existente no se vea afectada por las actividades propias del almacenamiento.

- Desarrollo de un almacenamiento.
 - Definición del problema. Metodología





- La resolución al problema de valoración de emplazamientos de forma objetiva y rigurosa pasa por la utilización de un método o proceso matemático.

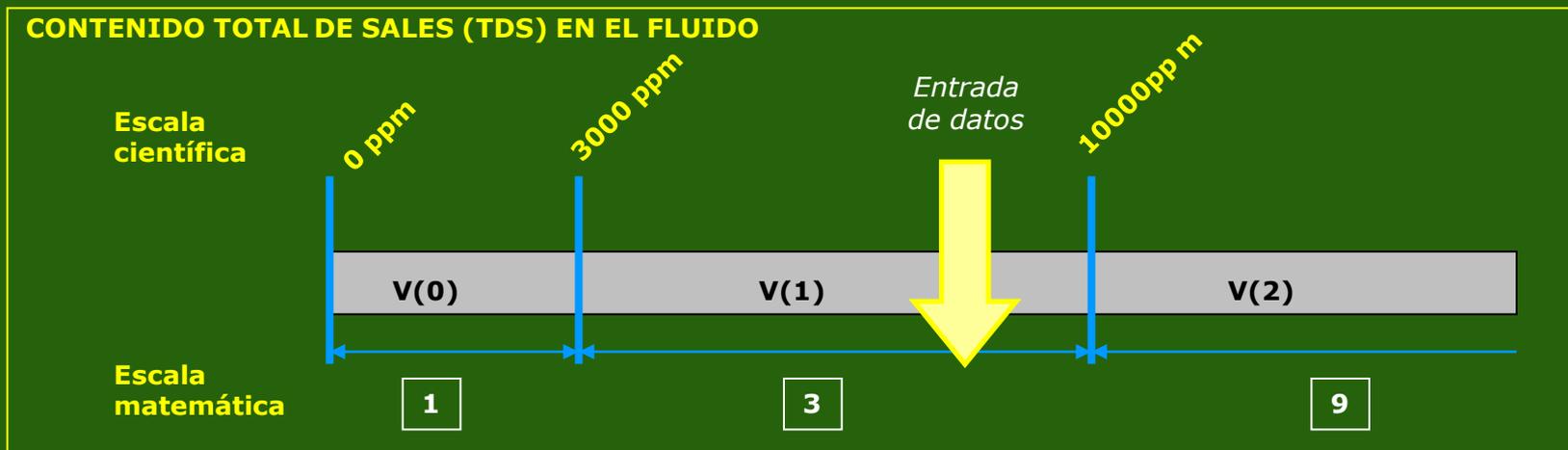
- Método propuesto:
 - Ponderación lineal
 - Utilidad de multi-atributo
 - Relaciones de superación
 - Proceso de análisis jerárquico (en inglés: Analytical Hierarchy Process (AHP))

- Resolución de un problema multicriterios: **Método AHP**
- **¿Por qué AHP?**
 - Formalizar la comprensión intuitiva de problemas complejos mediante la construcción de un modelo jerárquico.
 - Estructuras un problema multicriterio en forma visual, mediante la construcción de un modelo que básicamente está constituido por: objetivo, criterios y alternativas.
 - **Simplificación y desglose de un problema complejo.**
 - **Valoración en una escala.**
 - **Capacidad de síntesis y resumen.**
 - Características:
 - 😊 Presenta una base matemática.
 - 😊 Permite desglosar y analizar un problema por partes.
 - 😊 Permite medir criterios cuantitativos y cualitativos, mediante una escala común.
 - 😊 Proporciona la participación de diferentes personas o grupos de interés.
 - 😊 Permite verificar el índice de consistencia y hacer fácilmente correcciones.
 - 😊 Capacidad de síntesis
 - 😊 Fácil uso y puede complementarse con métodos matemáticos de optimización.

- Resolución de un problema multicriterios: **Método AHP**
 - Método seguido: **medida absoluta**
 - De esta forma se compara una alternativa (emplazamiento) con respecto a un estándar.
 - Idóneo para la evaluación de numerosas alternativas.
 - Basado en un algoritmo sencillo de evaluación:

$$E_A = \sum_1^i V_i \cdot P_i$$

- Valoración (V): tabulación de los criterios, transformando la cuantificación científica en una escala matemática.
- Peso (P): Cuantificación de la importancia de cada criterio



SELECCIÓN DE ESTRUCTURAS

- ☐ Criterios de selección

- ☐ Metodología de jerarquización – Herramienta informática

- ☐ Proceso de caracterización. Paso 1

SITUACIÓN ESPAÑOLA

- ☐ **Caracterización escala cuenca**

- ☐ **Próximos trabajos**

CONCLUSIONES

SITUACIÓN ESPAÑOLA

Yacimientos/reservas de hidrocarburos

- ☹ Escasos
- ☹ Reducida capacidad
- ☹ No se encuentran en las proximidades de focos emisores
- ☺ Ampliamente investigados y conocidos
- ☺ Presentan un confinamiento demostrado

Acuíferos salinos profundos

- ☺ Presentan una mayor capacidad teórica
- ☺ El potencial de confinamiento inicial (porosidad y estructura) se complementa con mecanismos químicos (solubilidad) y físicos (hidrodinámica)
- ☺ Existen indicios de su idónea ubicación, próxima a grandes focos emisores
- ☹ Mayor grado de desconocimiento: requiere mayor investigación

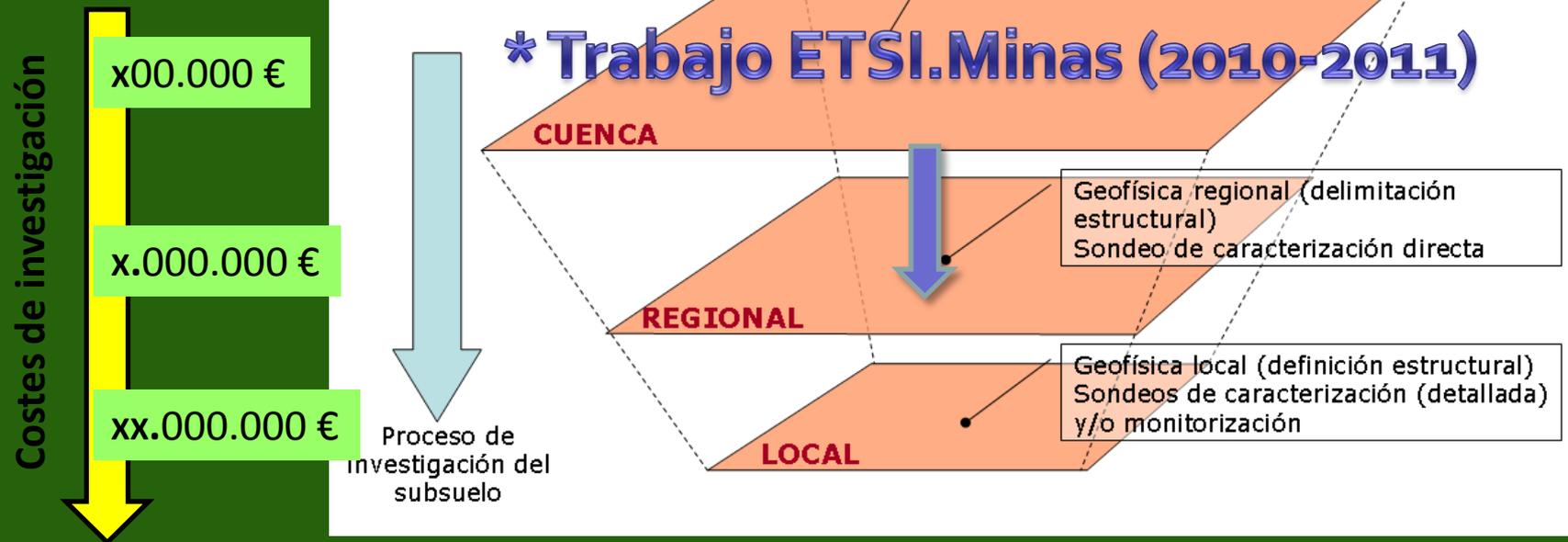
Capas de carbón

- ☺ Posibilidad de recuperación de metano (combustible)
- ☹ Escasa capacidad

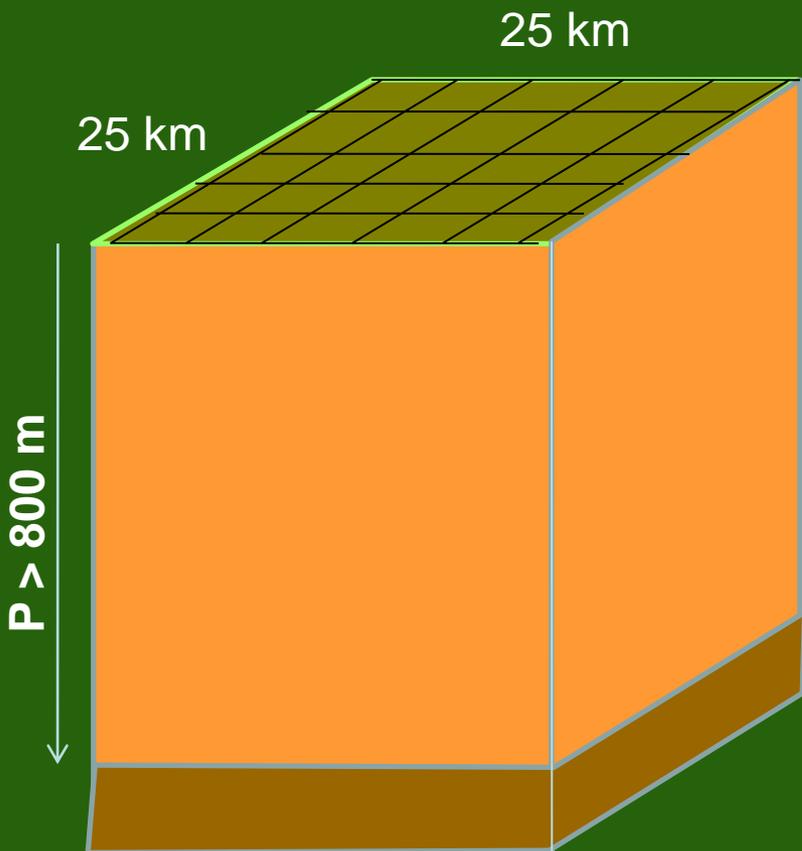
- Una vez seleccionada la región y estructura con propiedades más óptimas, será necesario establecer un **programa detallado de caracterización**.
- Previamente, es necesario solicitar los correspondientes permisos de exploración, de acuerdo a la legislación actual vigente:
 - Ley de Minas, 22/1973
 - Ley de Hidrocarburos, Ley 34/1998
 - **Ley de almacenamiento de CO₂, 40/2010**
- La exploración del subsuelo (profundo, por debajo de los 800-1000 m de profundidad) requiere de fuertes inversiones, y con un alto 'riesgo de fracaso'.
- Para reducir el riesgo se plantea una exploración en varias etapas, contemplando tres fases :
 1. Estudio de afloramientos
 2. Geofísica (ligera y sísmica de reflexión)
 3. Sondeos mecánicos profundos.
- Estas etapas se suelen correlacionar con la escala de la exploración.
- Toda la información generada, irá retro-alimentando la herramienta de selección.

NUEVO

- Desarrollo de caracterización (almacenamiento geológico de CO₂)
 - Concepto de escala



Etapa de **SELECCIÓN**, escala cuenca (1:200k)



- ↘ ¿Hemos elegido bien el área?
- ↘ ¿Hemos tenido éxito con nuestros modelos previos?
- ↘ ¿La sísmica a aportado la información deseada?

¿Por dónde empezamos?

GESTIÓN DEL RIESGO EXPLORATORIO. ETAPAS

1. Selección inicial de áreas de mayor interés geológico, aplicando el **criterio histórico** de los resultados exploratorios obtenidos en la investigación de hidrocarburos y utilizando los costosos datos exploratorios disponibles adquiridos históricamente
2. Información de **sondeos** de exploración de hidrocarburos para la evaluación petrofísica de las formaciones almacén/sello en profundidad (diagráfias e informes)
3. Información de **sísmica de reflexión**

CAMPAÑAS SÍSMICAS					
CAMPAÑA	FECHA ADQUISICIÓN	CIA. CONTRATISTA	CIA. OPERADORA	TIPO	EXTENSION
T	1971	CGG	ENAGAS	2D	700 km.
DC	1977	CGG	ENAGAS	2D	15 km.
M-79	1979	CGG	SHELL ESPAÑA	2D	180 km.
M-80	1980	CGG	SHELL ESPAÑA	2D	110 km.
ENG-91	1991	CGG	ENAGAS	2D	74 km.
92/BAS	1992	CGG	IGME	2D	15km.
ENG96	1996	CGG	ENAGAS	2D	180 km.
SB-00	OCT-NOV 2000	CGG	ENAGAS	2D	67 km.
SB-01	SEP-OCT-2001	CGG	ENAGAS	3D	55 km ²
SB-03	JUL-AGO 2003	CGG	ENAGAS	2D	27 km

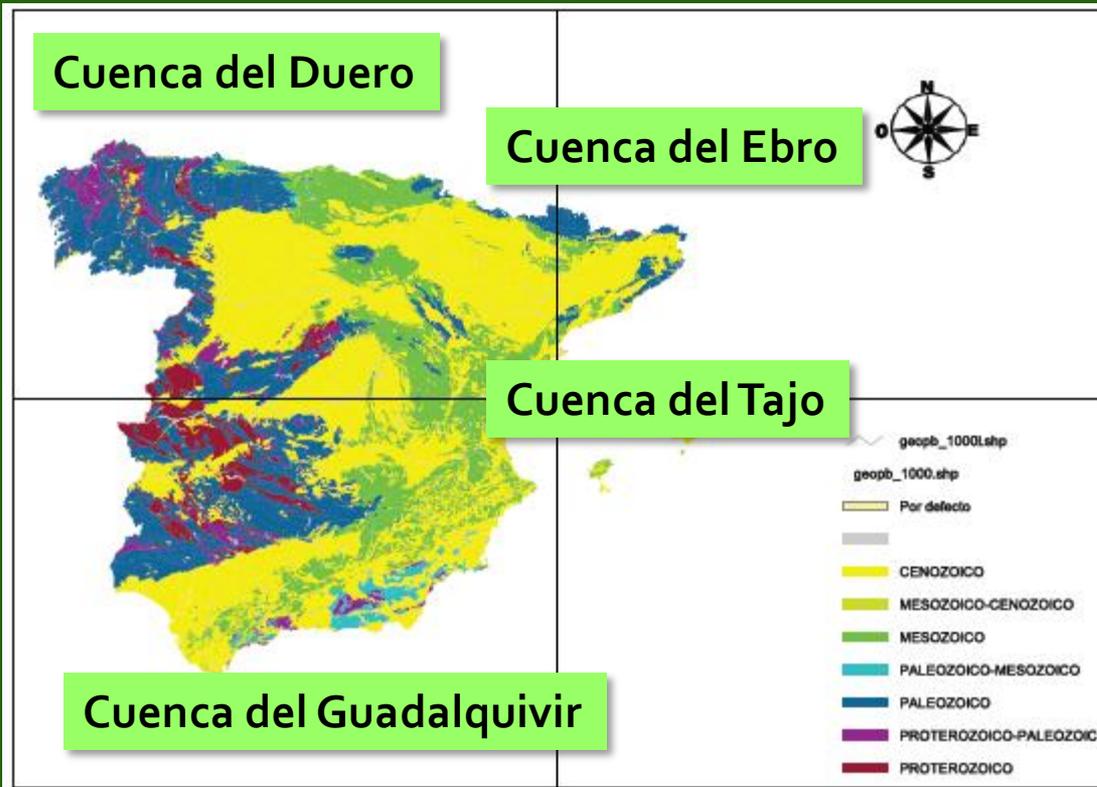
1.110 KM SÍSMICA 2D
 403 KM SÍSMICA ENAGAS
 (26,6%)



- EL PRADILLO 1
- TIELMES 1
- TRIBALDOS 1
- S. S. DE LOS REYES 1 (expl. geotérmica)
- TRES CANTOS 1 (expl. geotérmica)
- SANTA BÁRBARA 1
- BAIDES 1
- TORREMOCHA 1
- TORRALBA 1
- EL HITO 1
- GABALDÓN 1
- BELMONTEJO 1

5+11 SONDEOS EXISTENTES

Investigación en curso, fases 1 y 2



Fuente: IGME, y elaboración propia

Estrategia de exploración:

1. Búsqueda de REGIONES óptimos
 - Búsqueda de estructuras óptimas
2. Búsqueda de REGIONES buenos
 - Búsqueda de estructuras buenas



Estimación capacidad de almacenamiento 'industrial'

Criterios considerados

(fase 1)

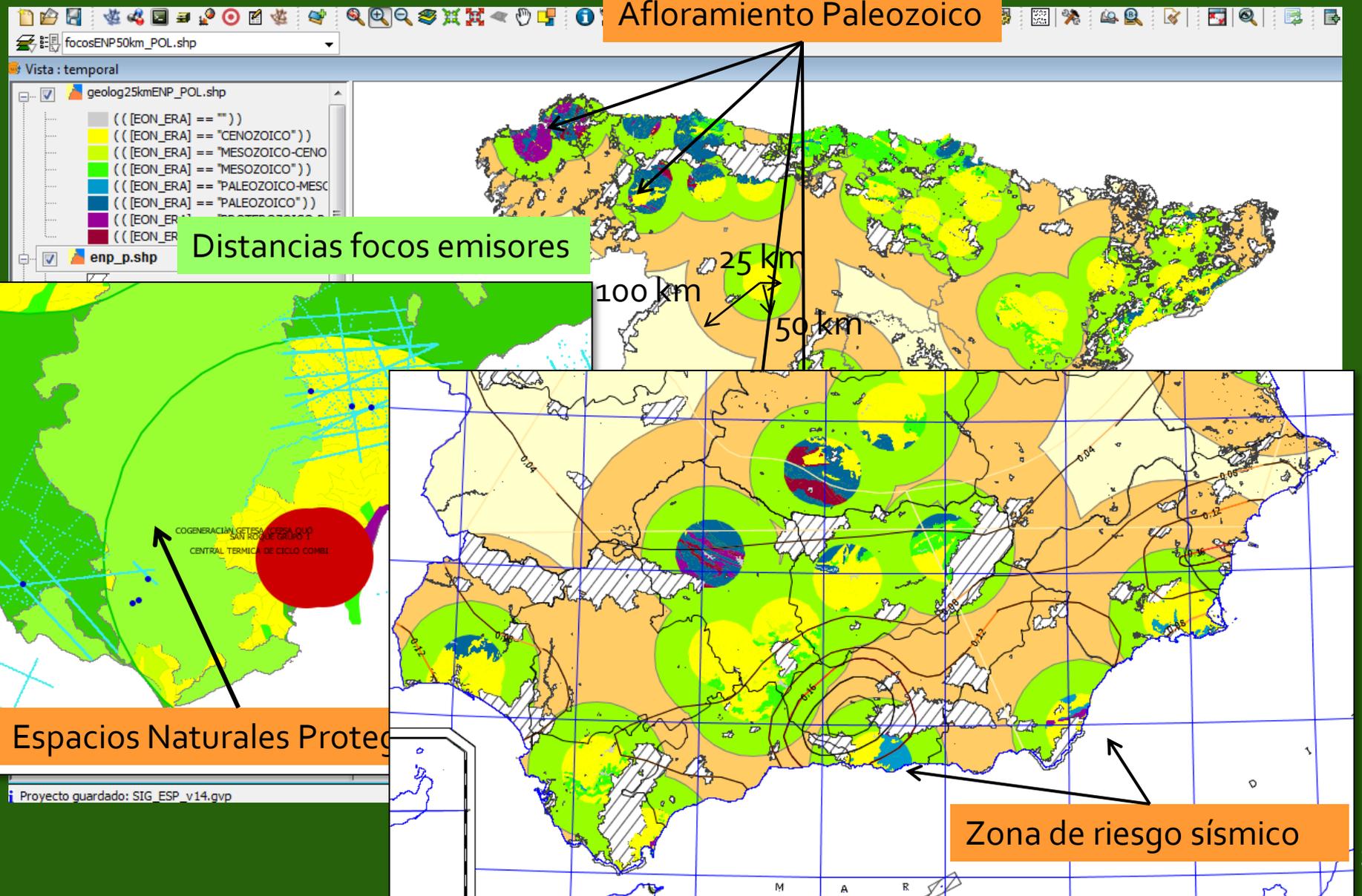
- Cuenca sedimentaria
- Focos emisores (distancia)
- Espacios Naturales Protegidos
- Ubicación (*onshore*)
- Calidad de la información:
 - Sondeos(*)
 - Sísmica 2D
- Tectónica (seísmos)

(fase 2)

- Definición estructural
- Definición almacén/sello
- Cálculo de capacidad
- Hidrogeología
- Otras formaciones de interés
- Población

ALMACENAMIENTO DE CO₂. Selección Almacenamiento de CO₂

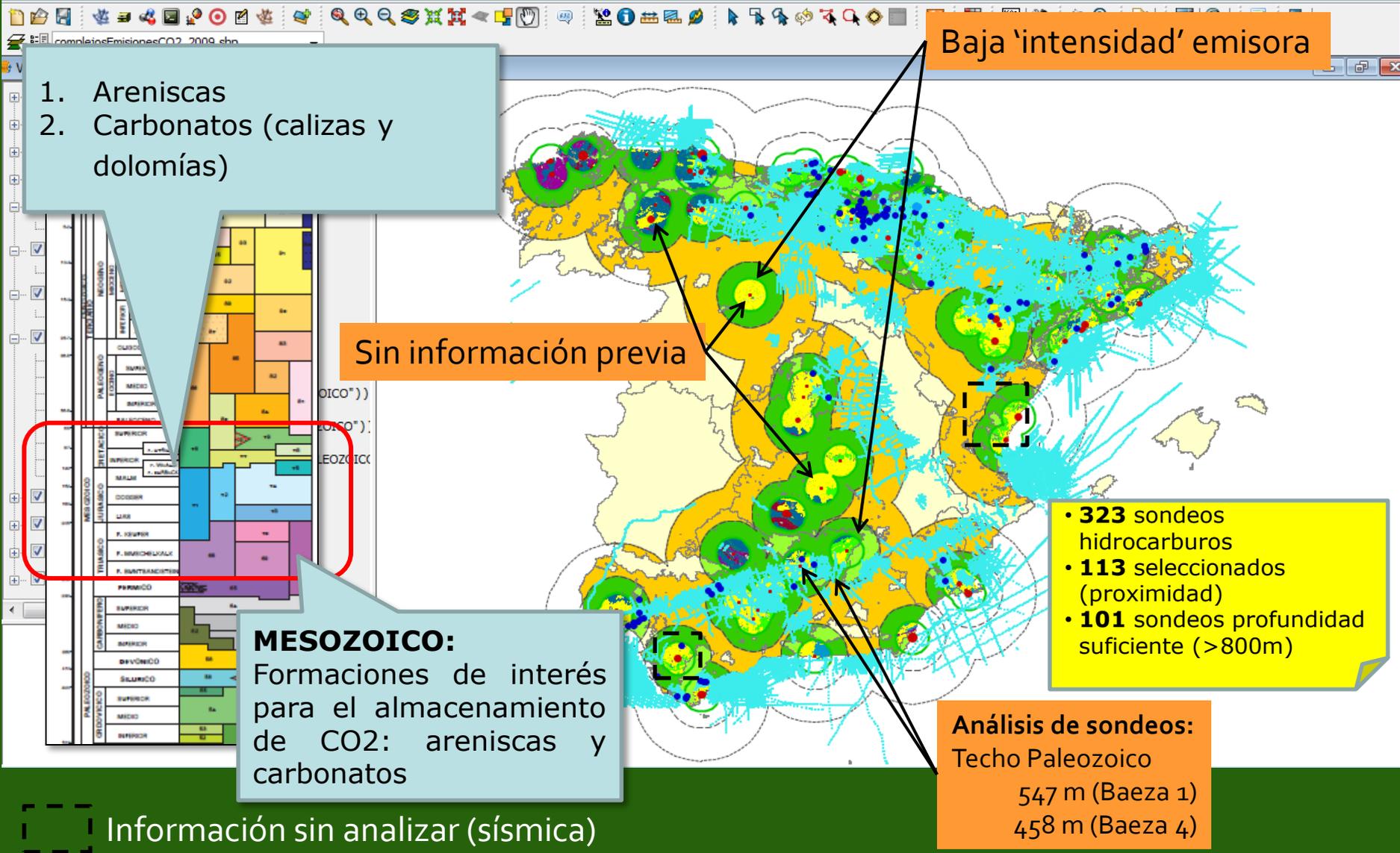
Afloramiento Paleozoico



Distancias focos emisores

Espacios Naturales Protegidos

Zona de riesgo sísmico



REGIÓN óptima:

N; NE de la cuenca del DUERO

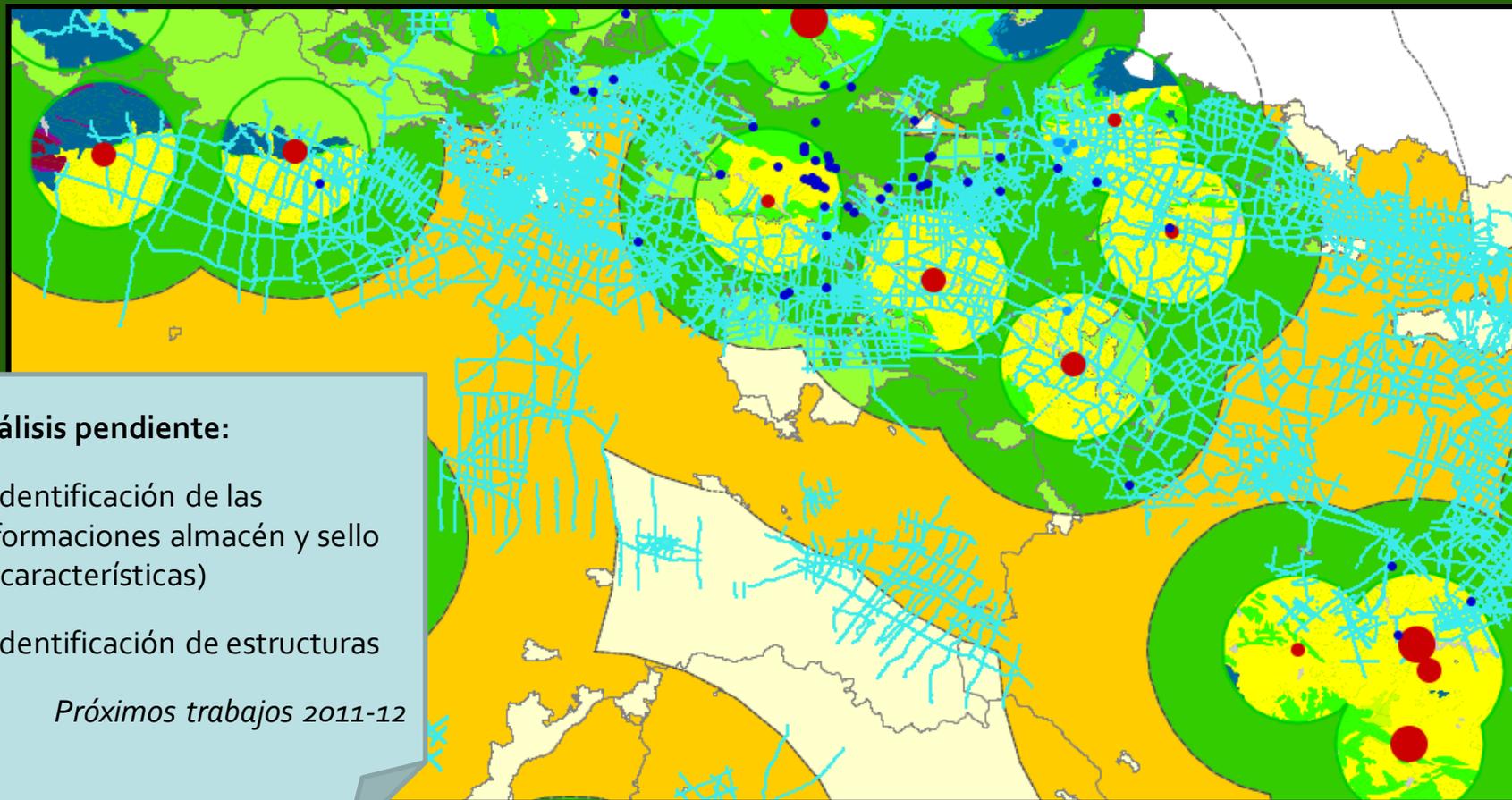
N; NE de la cuenca del EBRO

Gran cantidad de información

Focos emisores y potenciales estructuras próximas

No interacciona con Espacios Naturales Protegidos

No seísmos – región estable tectónicamente



Análisis pendiente:

- Identificación de las formaciones almacén y sello (características)
- Identificación de estructuras

Próximos trabajos 2011-12

RESULTADOS ALCANZADOS:

- Identificación de criterios técnicos y socio-económicos (tabulación y jerarquización)
- Base de datos y herramienta multicriterio (base de datos)
- Identificación de un SIG (OpenSource), funcional y que reduce los costes de evaluación.
- Integración de criterios georeferenciables en un SIG
- Análisis de criterios a nivel de cuenca (1:200k)
- Selección áreas óptimas (camino de escala regional).

PRÓXIMOS TRABAJOS:

- Integración de la base de datos y herramienta multicriterio en SIG
- Completar el análisis cuenca, incorporando ciertos criterios adicionales
- Estimación de capacidades a nivel regional.



SELECCIÓN DE ESTRUCTURAS

-  Criterios de selección

-  Metodología de jerarquización – Herramienta informática

-  Proceso de caracterización. Paso 1

SITUACIÓN ESPAÑOLA

-  Caracterización escala cuenca

-  Próximos trabajos

CONCLUSIONES

- No existen grandes yacimientos de hidrocarburos.
- En España, el escaso conocimiento de acuíferos salinos profundos requerirá de un gran esfuerzo investigador.
 - Las diferentes condiciones de almacenamiento de CO₂ en formaciones **no depletadas** requerirá además una investigación adicional.
 - Los yacimientos de Gas Natural presentan grandes analogías, sin embargo, la **capacidad** de almacenamiento es completamente diferente.
- Es necesario establecer una base de conocimiento estable y objetiva.
- El problema es un problema ingenieril, que requiere el concurso de múltiples especialidades del conocimiento (**PROBLEMA MULTIDISCIPLINAR**)
- Es conveniente, al igual que se está realizando en otros países europeos, establecer una investigación aplicada (**ALMACENAMIENTO PILOTO**), en aquellos tipos de estructuras más favorables o que cuenten con una mayor posibilidad de encontrarse en la península: **ACUÍFEROS SALINOS PROFUNDOS**.
- El riesgo de fracaso en este tipo de exploraciones aconseja la formación de **CONSORCIOS EMPRESARIALES** para reducir este riesgo.

- **Gracias por vuestra atención**
- **Preguntas**

Bernardo Llamas Moya

Dr. Ingeniero de Minas

Prof. Universidad Politécnica de Madrid. ETSI. Minas

✉ bernardo.llamas@upm.es