



ATLAS MEXICANO DE ALMACENAMIENTO GEOLÓGICO DE CO₂



**GOBIERNO
FEDERAL**

SENER





ATLAS MEXICANO DE ALMACENAMIENTO GEOLÓGICO DE CO₂

Elaborado por:

Secretaría de Energía

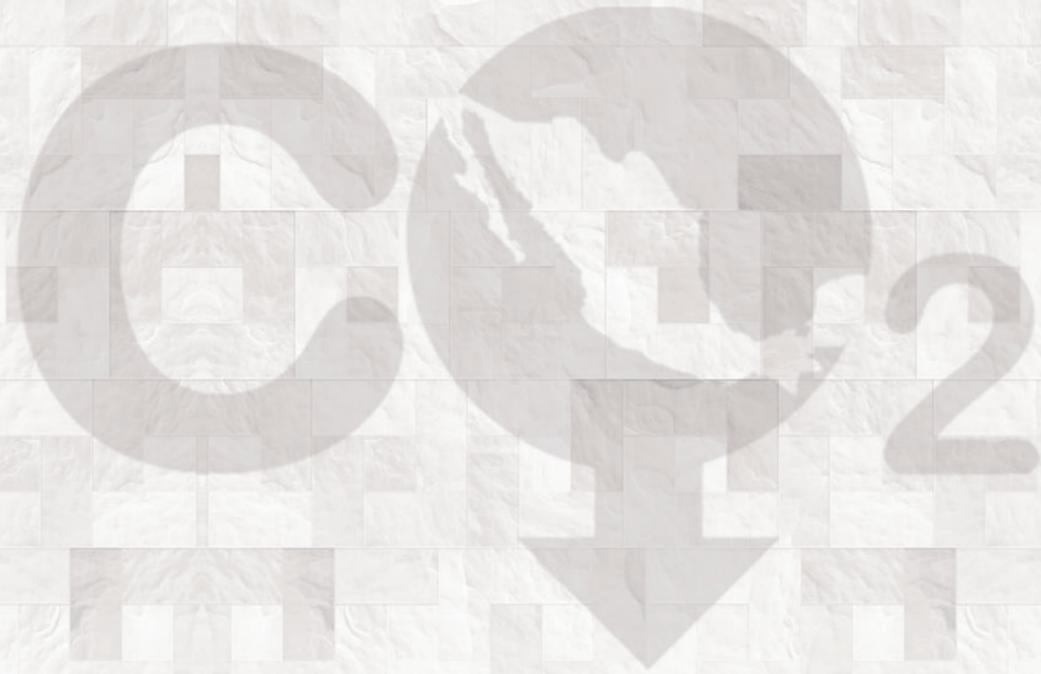
Leonardo Beltrán
Cesar Contreras
José María Valenzuela

Comisión Federal de Electricidad

Moises Dávila
Vicente Arévalo
Oscar Jiménez
Erik Medina
Oscar Cuevas
Héctor Ortega

México, 2012

Presentación



Prólogo

El bióxido de carbono (CO₂) es el gas de efecto invernadero más abundante en la atmósfera y su concentración muestra un crecimiento natural, pero también por intermediación antropogénica que preocupa importantemente a la humanidad pues es una seria amenaza para la biodiversidad.

El origen de la sobreproducción debida al hombre en el mundo moderno está relacionada principalmente a la quema de combustibles fósiles, por lo que la generación de electricidad en algunos países como México es una fuente de CO₂ importante. Sin embargo, dado el rol estratégico del sector eléctrico, el crecimiento económico y social, obliga a sostener el uso de combustibles fósiles, en tanto no se cuente con fuentes energéticas alternativas suficientes.

Por otra parte, el Gobierno Mexicano ha decidido adoptar el uso de energías alternativas como uno de los pilares estratégicos del sector eléctrico mexicano. Pero no obstante que cada día son tecnológicamente más refinadas y su crecimiento es optimista, aún no están disponibles en la cantidad y rentabilidad que fuera deseable para sustituir de inmediato a los hidrocarburos, lo cual se dará paulatinamente en el mediano y largo plazo.

Es así como la tecnología de almacenamiento geológico de carbono está llamada a ser la alternativa más importante para mitigar los efectos de la emisión de CO₂ proveniente de fuentes estacionarias como las centrales de generación eléctrica, las refinerías, la industria siderúrgica y la cementera, entre otras, en tanto se prescinde del carbono como el energético primario más importante.

Dicha tecnología es una realidad desde la década de los años ochenta del siglo anterior, de tal forma que ahora hay más de un centenar de instalaciones de su tipo en el mundo y se espera que para el año 2030 haya más de 800 y más de 3500 para el año 2050 constituyendo la solución que más ayude a la mitigación de gases de efecto invernadero. En el caso particular de nuestro país, el inicio de su implementación data de abril de 2008 en que los Presidentes de México y Estados Unidos y el Primer Ministro de Canadá se comprometieron en Houston Texas en la Cumbre de Líderes de Norteamérica a trabajar en forma conjunta en el desarrollo de dicha tecnología como fórmula esencial para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero en esta región de Mundo.

La captura y secuestro geológico de CO₂ en México forma parte de la Estrategia Nacional de Energía y en ese contexto el sector energético mexicano se complace en presentar este Atlas Mexicano de Almacenamiento Geológico de CO₂ cuyo motivo principal es explicar a la sociedad en su conjunto, los principios básicos de esta tecnología, esperando que los mexicanos conozcan esta importante opción que el país adopta en aras de continuar su desarrollo de manera sostenible

MTRO. Antonio Vivanco Casamadrid
Director de la Comisión Federal de Electricidad

CONTENIDO

Introducción

- 1 Economía de la energía en México
- 5 Sustentabilidad y uso eficiente de los recursos
- 7 La ruta tecnológica del almacenamiento geológico de CO₂ en México
- 9 Captura, uso y almacenamiento de CO₂ en la política energética mexicana
- 11 La Tecnología de almacenamiento geológico de CO₂

El Bióxido de Carbono en México

- 13 Gases de efecto invernadero
- 15 Emisiones estacionarias de CO₂ por sector industrial
- 17 Emisiones estacionarias de CO₂ por entidad federativa

Almacenamiento geológico

- 18 Almacenamiento geológico de CO₂
- 20 Almacenamiento de CO₂ asociado a yacimientos de hidrocarburos

- 22 Almacenamiento de CO₂ en lechos de carbón
- 23 Almacenamiento en acuíferos salinos profundos
- 25 Almacenamiento seguro de bióxido de carbono
- 26 Grados de resolución en la cuantificación de capacidades

Capacidades de Almacenamiento Geológico de CO₂ en México

- 28 Potencial de almacenamiento geológico de CO₂ en México
- 32 Capacidad Teórica de Almacenamiento de CO₂ en Acuíferos Salinos Profundos
- 33 Comentarios finales
- 34 Referencias
- 35 Glosario
- 36 Créditos de fotografías e imágenes
- 36 Agradecimientos



INTRODUCCIÓN



El crecimiento de las empresas, la creación de fuentes de trabajo, y las condiciones de vida de las familias están directamente relacionadas con la capacidad de una economía para ofrecer combustibles y electricidad en condiciones y precios que permitan a las empresas competir con sus similares en otros países.

La producción y aprovechamiento de la energía están determinados por un entorno económico y social en transformación, que facilita o limita el uso y desarrollo de tecnologías apropiadas o mejores prácticas, y que incide en la posibilidad de alcanzar los niveles óptimos de producción y bajo características que respondan a las diversas necesidades de la sociedad, incluidas las ambientales.

El mercado energético está condicionado por la dotación de recursos y la disponibilidad tecnológica que permite su aprovechamiento. En México se han desarrollado las industrias de hidrocarburos y carbón, que utilizan recursos fósiles almacenados en depósitos subterráneos, pero también las que aprovechan otros recursos, como el agua, uranio, y fuentes renovables de energía como la geotermia, el viento y el sol.

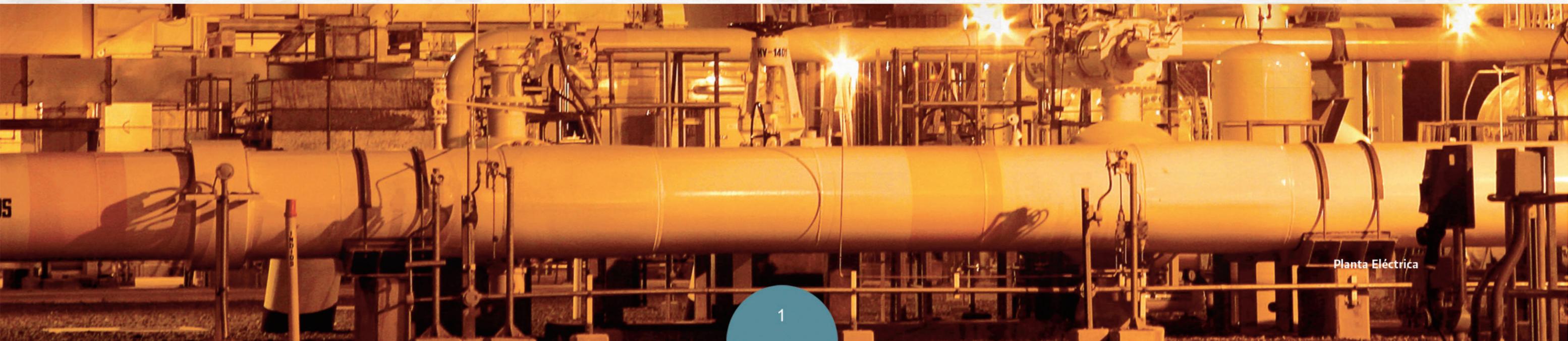
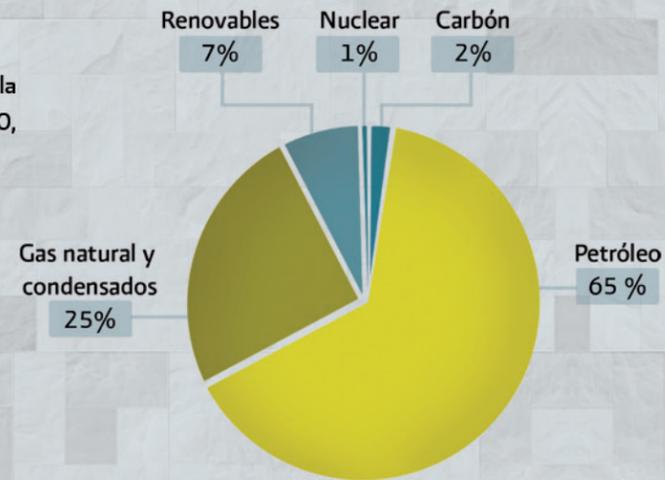
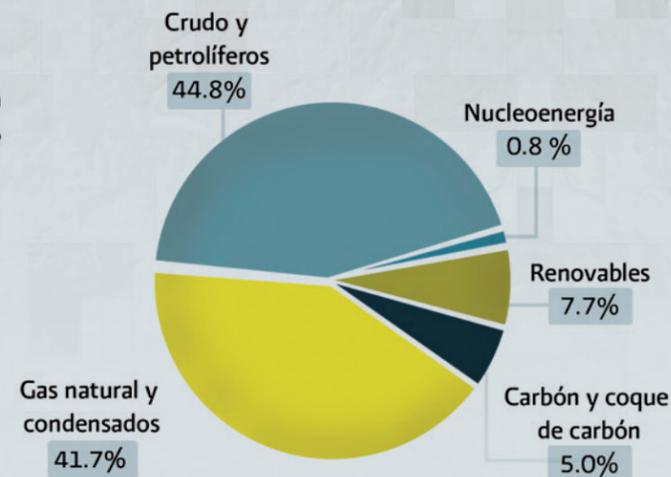


Figura 1 - Estructura de la producción primaria 2010, 9,250.7PJ (1)



México posee grandes reservas de hidrocarburos, lo cual ha permitido al país mantener altos niveles de producción para atender el mercado nacional e internacional. En 2010, los hidrocarburos representaron el 90.2 % de la producción primaria de energía, 65.0 % el petróleo y 25.2 % el gas natural y condensados; mientras que las fuentes renovables de energía representaron el 6.9 %, el carbón mineral el 2.2 % y la nucleoeenergía el 0.7 % (Figura 1).

Figura 2 - Oferta interna bruta por tipo de energético 2010, 8,151.9PJ (2)



México es exportador neto de hidrocarburos, coloca grandes volúmenes de petróleo crudo, e importa otros productos como gas natural y cantidades limitadas de carbón, entre otros productos. La mayor parte de estos recursos son transformados para obtener combustibles y energía eléctrica, de modo que puedan ser finalmente utilizados por las empresas y las familias. La mayor parte de la producción de electricidad se realiza a partir de hidrocarburos, con una participación mayor de gas natural. Las energías renovables representan el 7.7 %, el carbón y coque de carbón el 5 % y la nucleoelectricidad el 0.8 % (Figura 2).

La Prospectiva del Sector Eléctrico para el periodo 2011-2025 prevé cambios importantes en el uso de combustibles fósiles para la generación de electricidad. Se observará un aumento en la participación del gas natural, hasta alcanzar el 76.2 %. Los avances tecnológicos en materia de aprovechamiento de gas no convencional fortalecerán estas tendencias de crecimiento. El combustóleo y otros petrolíferos sólo representarán el 5.2 % del total de combustibles fósiles utilizados (Figura 3).

Se prevé que para el 2025 se desarrollarán opciones tecnológicas que permitan expandir el sistema de generación con niveles de emisiones de CO₂ prácticamente nulos, como la captura de bióxido de carbono. El uso de estas tecnologías se le denomina “nueva generación limpia”. El aumento en el uso del carbón, a partir del 2020 se deberá exclusivamente al uso de tecnología de generación limpia, permitiendo aprovechar las reservas minerales sin afectar el desempeño ambiental del sector. Se espera que en el 2025 se generen a partir de estas tecnologías un total de 6,899MW.

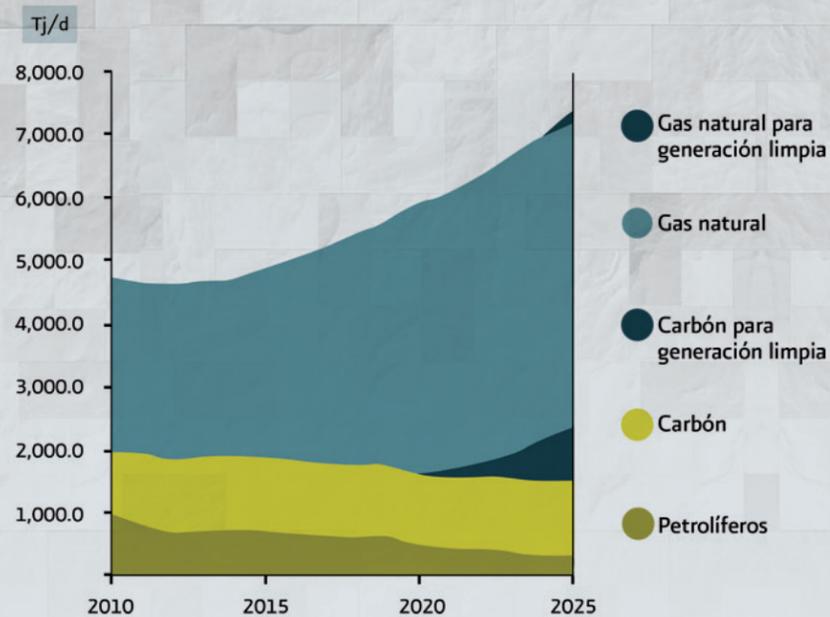


Figura 3 - Prospectiva de la participación de combustibles fósiles en la generación de electricidad (2010-2025) (3)

Combustibles fósiles en la generación de electricidad 2025	Participación
Petrolíferos	5.2%
Carbón	27.2%
Carbón para generación limpia	12.3%
Gas natural	67.2%
Gas natural para generación limpia	1.5%

(4)

La producción y distribución de los energéticos tienen características particulares; por ello, observamos la ocurrencia de fenómenos conocidos como fallas de mercado, que distorsionan los volúmenes de producción y los precios de los energéticos, reduciendo los beneficios sociales de su aprovechamiento. En estos casos es necesaria la participación del gobierno, para el adecuado desarrollo de los mercados, mediante soluciones como la propiedad pública, la regulación, los subsidios focalizados, entre otros.

La Agencia Internacional de Energía (5) ha documentado algunas de las fallas en el mercado energético, y en especial respecto al aprovechamiento de combustibles fósiles como el carbón, los petrolíferos y el gas, y la utilización de tecnologías de generación limpia. Aquí se presenta una selección:

- **Externalidades** (6): Las emisiones de CO₂ a la atmósfera contribuyen a la concentración de gases de efecto invernadero y, por tanto, al calentamiento global, pero los costos y volúmenes de producción y consumo de combustibles fósiles no incorporan ese impacto.
- **Bienes Públicos** (7): El desarrollo tecnológico y de experiencia de algunas empresas que son pioneras en un sector o en el uso de un método puede ser aprovechado posteriormente por otros dentro del sector en forma de conocimiento, aunque esto es benéfico para un sector, las empresas no cuentan con incentivos para ser pioneras.
- **Información asimétrica e incompleta** (8): Los costos y el desempeño de la captura y el almacenamiento de CO₂ depende del sitio específico, por lo que el mercado de capital tenderá a reducir la oferta financiera si no tiene elementos para evaluar el riesgo de los proyectos.
- **Mercados complementarios** (9): Los carbonoductos, los sitios de almacenamiento y las plantas de captura forman la cadena de valor en el mercado de CO₂, si hay diferentes propietarios en cada segmento, las decisiones de inversión dependerán de las acciones de terceros, por lo que de no coordinarse, pueden causar que el desarrollo de esta industria sea menor a la necesaria y sus costos mayores.

El bióxido de carbono es un gas de efecto invernadero (GEI) que se encuentra naturalmente en la atmósfera. Las actividades humanas, como la quema de combustibles fósiles, cambio de uso de suelo, deforestación, entre otros, aumentan significativamente su concentración en la atmósfera contribuyendo al calentamiento global.

El consumo de combustibles fósiles es la principal fuente de emisiones de GEI por actividades humanas. A nivel mundial el sector energético contribuye con el 64% de las emisiones de GEI, y 84% de las emisiones CO₂. (10) De acuerdo con la Cuarta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC) presentada por México, en nuestro país, la producción de combustibles fósiles y su uso genera poco más del 60% del total de emisiones de GEI, y 75.01% de las emisiones de CO₂.

El CO₂ liberado a la atmósfera por el consumo de energía proviene de todo tipo de actividades económicas, incluidos el transporte, el sector agropecuario, el comercio, el consumo del sector público y el doméstico, las actividades de generación de electricidad, de extracción de hidrocarburos, de refinación y otras actividades industriales. En 2010 el total de emisiones de CO₂ por consumo energético fue de 407.3 Mega toneladas. La generación de electricidad contribuyó con 28.2 %, la industria generadora de energía (extracción, refinación, etc.) con 10.4 %, y el resto de la industria el 14.8 % (Figura 4).

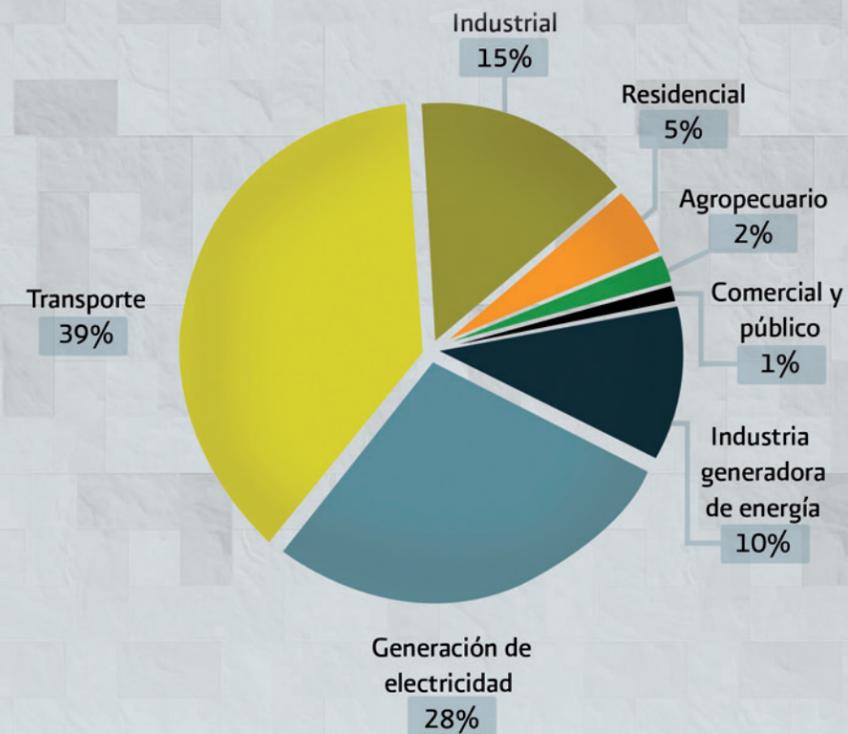


Figura 4 - Estructura de emisiones de CO₂ del consumo energético por sector en 2010 (405.3 Mt de CO₂) (11)



Las emisiones de CO₂ por el consumo de combustibles fósiles representan una externalidad negativa debido a su impacto en el calentamiento global, el cual ha sido documentado por diversos estudios de carácter internacional. (12) Esto ha favorecido el desarrollo de propuestas para mitigar las emisiones de CO₂ y otros gases de efecto invernadero, además de reconocer a nivel internacional la responsabilidad común, pero de manera diferenciada, de acuerdo con el nivel de desarrollo de los países.

El CO₂ liberado a la atmósfera también significa un costo de oportunidad, debido a que el compuesto puede ser utilizado como insumo en diferentes procesos industriales y productivos. Uno de sus usos principales es para la recuperación de hidrocarburos, mediante la inyección de CO₂ en yacimientos de petróleo y gas; una tecnología madura y comercial, que es utilizada mundialmente y tiene el potencial de aumentar la eficiencia operativa en la extracción de recursos y reducir las emisiones de CO₂ a la atmósfera. El CO₂ también puede ser utilizado en otros procesos industriales que podrían apoyar el desarrollo de mercados, por ejemplo, biocombustibles, el CO₂ puede ser utilizado como alimento de algas verdeazuladas, cuyo metabolismo produce materia combustible.

La inversión en infraestructura para la captura, el transporte y el uso de CO₂, en los diferentes sectores económicos, especialmente en el sector energético, requerirá de mecanismos robustos de coordinación entre los diferentes mercados necesarios para que sea económicamente viable. La planeación respecto a volúmenes y condiciones de captura, transporte y uso corresponden a diferentes actores y por lo tanto se requiere el desarrollo de instrumentos que faciliten la comunicación y coordinación.



México ha comprometido una reducción del 20% de sus emisiones de GEI para el año 2020 y de 50% para el año 2050 (13). De acuerdo a la Agencia Internacional de Energía, el 19% de la mitigación de GEI debe provenir de la tecnología de Captura y Almacenamiento de CO₂ (CCS) y más específicamente, el 10% deberá disminuirse en la generación de energía eléctrica (14). Esto en principio significa que el Sector Eléctrico Mexicano reduzca por este medio, del orden de 20 Mt CO₂ anualmente, lo cual es difícil dado el estado de esta técnica en México. Un camino más realista pretende que se desarrollen al menos dos proyectos con un ritmo de captura y almacenamiento importante asociando la generación eléctrica a recuperación mejorada de hidrocarburos; deseablemente con inyecciones superiores a 1 Mt de gas cada año a partir del año 2018. Para ser congruentes en este objetivo, se ha establecido la Estrategia Nacional de Energía en Materia de Captura, Uso y Almacenamiento de CO₂ del que se desprende el Mapa de Ruta Tecnológica de CCS en México que en forma resumida se esquematiza en la figura 5.

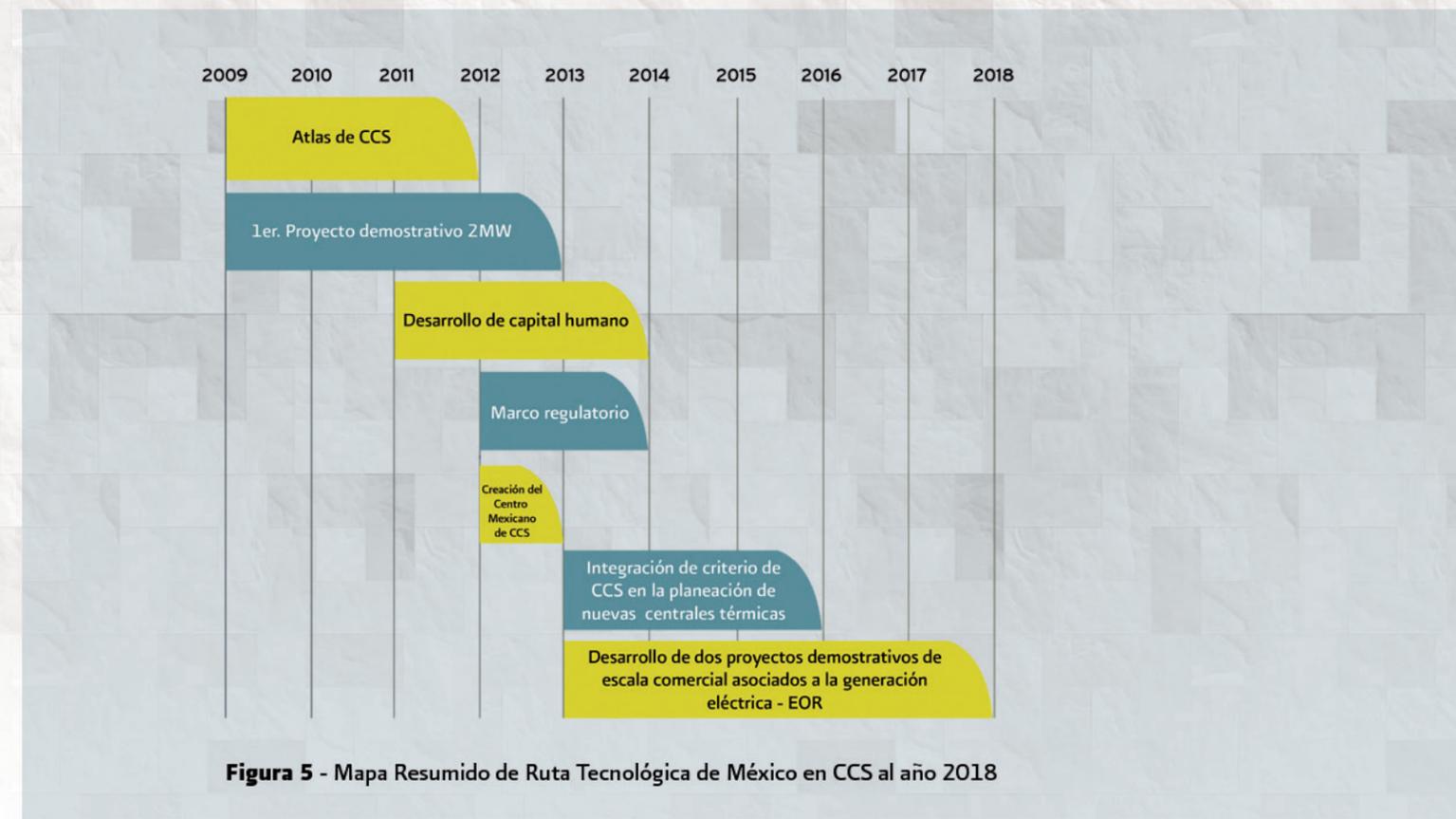
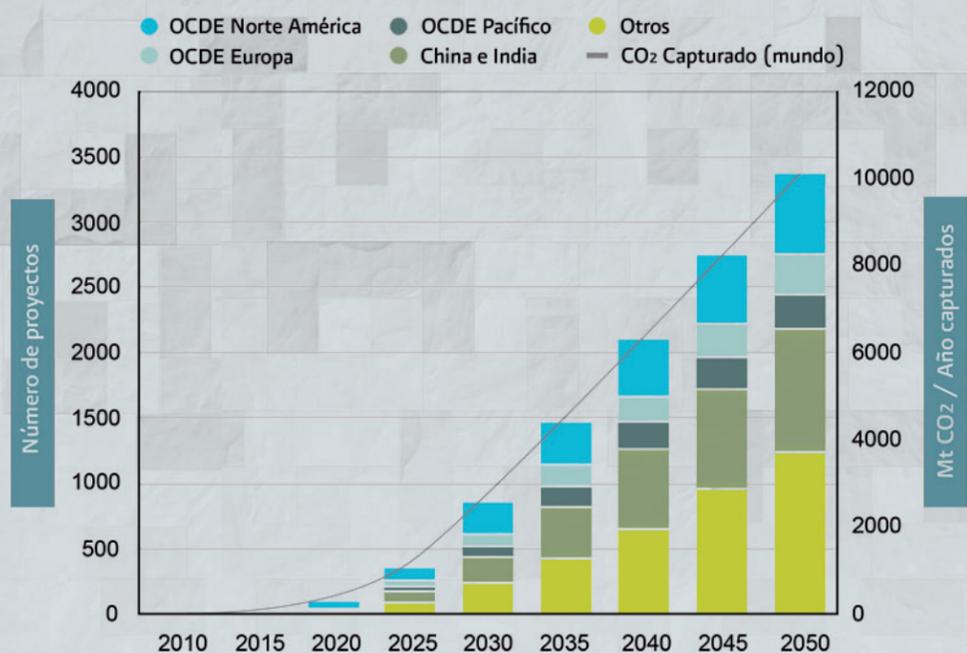


Figura 5 - Mapa Resumido de Ruta Tecnológica de México en CCS al año 2018



En el mundo actualmente existen sólo 5 proyectos integrados a gran escala que en conjunto permiten el almacenamiento de 5 Mt CO₂ al año. Existen además una centena de proyectos de similar importancia planeados y actualmente en diferentes etapas de su consecución para entrar en operación al año 2020. La figura 6 ilustra la ubicación por región (15) y una perspectiva para el año 2050.



	Número de Proyectos en 2020	Número de Proyectos en 2050	Costo Adicional 2010-2020 (USD bn)*	Costo Adicional 2010-2050 (USD bn)*	Total Inversión 2010-2020 (USD bn)**	Total Inversión 2010-2050 (USD bn)**
OCDE NA	29	590	23.6	1635	61.7	1130
OCDE Europa	14	320	6.8	590	15.8	475
OCDE Pacífico	7	280	5.9	645	14.1	530
China e India	21	950	7.6	1315	19.0	1170
No OCDE	29	1260	9.7	1625	19.8	1765
Mundo	100	3400	54	5810	130	5070

* Incluye costo de transporte y almacenamiento
 ** No incluye inversión en transporte y almacenamiento

Nota: OCDE NA = USA, Canadá y México; OCDE Europa = Austria, Bélgica, República Checa, Dinamarca, Finlandia, Francia, Alemania, Grecia, Hungría, Islandia, Irlanda, Italia, Luxemburgo, Holanda, Noruega, Polonia, Portugal, Eslovaquia, España, Suecia, Suiza, Turquía, UK; OCDE Pacífico = Australia, Japón, Nueva Zelanda, Corea del Sur; No OCDE = Resto del mundo

Figura 6 - Proyectos de CCS planeados para entrar en operación al 2020 y 2050 por región. AIE, 2010.

El impulso para utilizar tecnologías de captura, uso y almacenamiento de CO₂ (CCUS) en México se explica principalmente por dos razones. La primera, para aumentar la recuperación mejorada de hidrocarburos a partir de CO₂ (las primeras pruebas se realizaron hace más de una década); y la segunda, para mitigar el cambio climático.

El gobierno federal reconociendo el potencial en materia ambiental del desarrollo e implementación de las tecnologías de CCUS en México, las incorporó en la Estrategia Nacional de Cambio Climático en 2007 y en el Programa Especial de Cambio Climático 2009-2012. En este último, en el Objetivo 2.1.10 para fortalecer las capacidades nacionales en esta materia en el sector energético, se fijaron dos metas:

Elaborar un estudio sobre el estado del arte de CCUS y la viabilidad de las mismas en el contexto de México, a publicarse durante 2008-2012 (Meta M.22).

Elaborar un análisis de una central termoeléctrica o de ciclo combinado y sus sinergias con proyectos que puedan utilizar las emisiones de bióxido de carbono para acelerar procesos fotosintéticos y producir materiales o combustibles alternativos (Meta M.23).

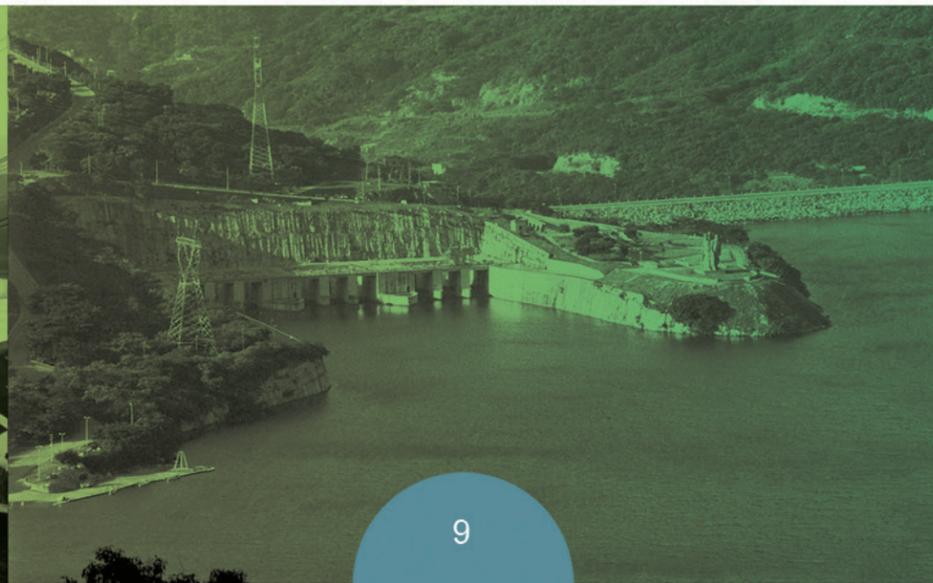
Posteriormente, en 2012, el gobierno federal incorporó el tema de Captura, Uso y Almacenamiento de CO₂ en la Estrategia Nacional de Energía, por su potencial para mejorar el desempeño operativo y ambiental de la industria, con tareas y metas específicas, los cuales incluyen:

Definir la cartera de proyectos de mitigación de gases de efecto invernadero (GEI).

Establecer el marco de referencia y regulatorio para el desarrollo nacional de la captura, transporte, uso y almacenamiento de CO₂.

Desarrollar programas de control de emisiones, secuestro y captura de carbono, partículas suspendidas y desechos producidos durante los procesos productivos.

Aprovechar las oportunidades económicas de abatimiento de emisiones de GEI (metano, CO₂, óxidos de nitrógeno y CFCs) en los procesos del sector energético.





A nivel internacional, consolidando la posición de México en materia de sustentabilidad y cambio climático se ha favorecido la participación de México en diversas iniciativas.

En agosto de 2009, en la Cumbre de Líderes de América del Norte, los mandatarios de Canadá, Estados Unidos y México decidieron elaborar un atlas norteamericano sobre almacenamiento geológico de CO₂.

De esta forma, México forma parte de la Alianza para el Atlas Norteamericano de Almacenamiento de Carbono (NACSAP, por sus siglas en inglés), En abril de 2012 se publicará la primera edición del atlas con información de los tres países. El trabajo conjunto ha facilitado alcanzar tres objetivos:

Integrar un sistema para facilitar el intercambio de información sobre fuentes emisoras de carbono y sitios potenciales de almacenamiento con el objetivo de crear un sistema de información geográfica, el cual será usado para la elaboración de mapas. Este servirá como una base de datos descentralizada, en la que los datos de los estados, provincias u organizaciones puedan ser consultados a través de un portal común con un formato similar.

Crear un consenso sobre la metodología para estimar la capacidad de los diferentes tipos de sistemas de almacenamiento de CO₂ en América del Norte. Esto será particularmente relevante para el almacenamiento transfronterizo, a fin de eliminar las “líneas de falla” internacionales y asegurar la compatibilidad en las estimaciones de capacidad de almacenamiento en América del Norte.

Promover la colaboración potencial en Investigación, Desarrollo Tecnológico y Despliegue relacionada con la captura y almacenamiento de carbono. Esto incluye compartir esfuerzos para evaluar los usos alternativos de CCUS, tales como la recuperación mejorada de crudo o de gas grisú.

México también ha destacado por participar en otros mecanismos de colaboración, por ejemplo, como miembro fundador del Instituto Global de Captura y Almacenamiento de Carbono (Global CCS Institute, por sus siglas en inglés), y mediante su participación en el Foro de Liderazgo en Almacenamiento de Carbono (CSLF, por sus siglas en inglés) y en el Grupo de Acción sobre Captura, Uso y Almacenamiento de Carbono de la Cumbre Ministerial de Energía Limpia (CEM, por sus siglas en inglés).

En todos estos casos el gobierno mexicano trabaja para promover avances en tres ámbitos esenciales: capacidades tecnológicas, de regulación, y para la cooperación internacional y la colaboración entre los sectores público y privado.

A nivel nacional es fundamental que las entidades del gobierno federal, instituciones de educación superior e investigación y el sector privado participen en estas iniciativas. La publicación de una versión de divulgación del Atlas Mexicano de Almacenamiento CO₂, representa una oportunidad para expandir el conocimiento que se tiene en México sobre las tecnologías y oportunidades que ofrece la captura, uso y almacenamiento de CO₂, y enfrentar las fallas de mercado para el desarrollo óptimo del sector energético desde la perspectiva económica y ambiental.

El conjunto de procesos que incluyen capturar, separar, transportar y almacenar el CO₂ que proviene de una emisión industrial fue definido por el IPCC 2005 como Secuestro Geológico de Carbono (16). A este proceso se le conoce como CCS siglas provenientes de *carbon capture and sequestration*. Aunque teóricamente el objetivo se puede alcanzar de varias formas diferentes al secuestro finalmente geológico, por su predominancia cuantitativa a la fecha, esta modalidad se ha adueñado del término CCS. Los requerimientos físicos para sitios que sean geológicamente adecuados para el almacenamiento por muy largos períodos de tiempo, por evitar decir para siempre (lo cual es imposible de demostrar hablando de escalas geológicas del tiempo), incluyen horizontes pétreos permeables y porosos que permitan la inyección del bióxido de carbono. Es requisito que al horizonte reservorio le sobreyazca un mecanismo de trampa. Típicamente éste es un horizonte suficientemente impermeable como para confinarlo impidiendo su resurgencia a la atmósfera.

El Atlas que se presenta cobra una importancia significativa al ser el primer intento en consignar las regiones que tienen potencial para almacenar en el subsuelo el CO₂ proveniente de las fuentes estacionarias más importantes del país. Sin embargo, esta versión es sólo con fines de divulgación y por si misma es insuficiente para conocer con detalle, las características y limitantes de cada sitio en particular. En la figura 7 se presenta un esquema que muestra los componentes esenciales de la captura y almacenamiento geológico de CO₂.

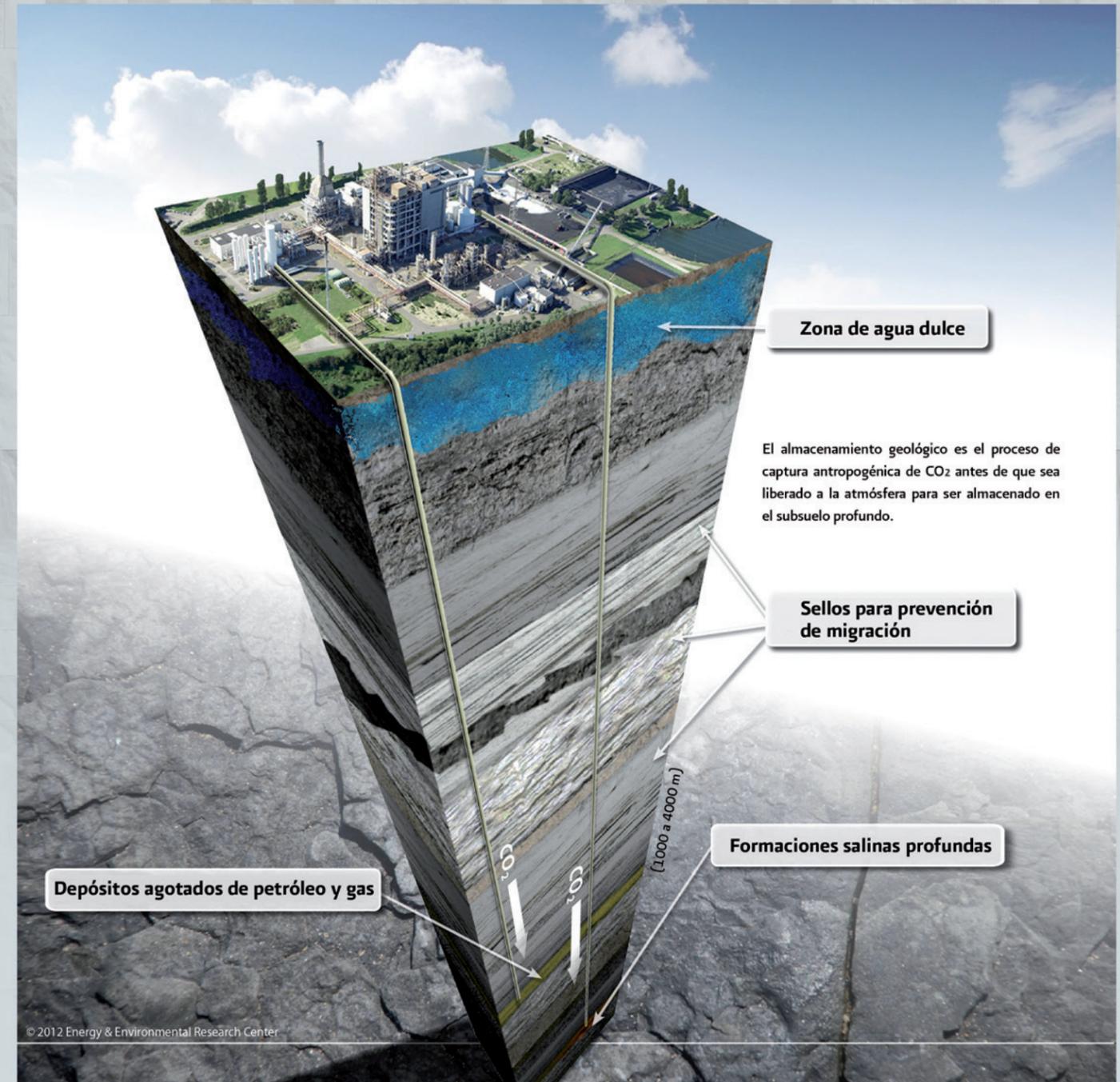


Figura 7 - Almacenamiento geológico de CO₂

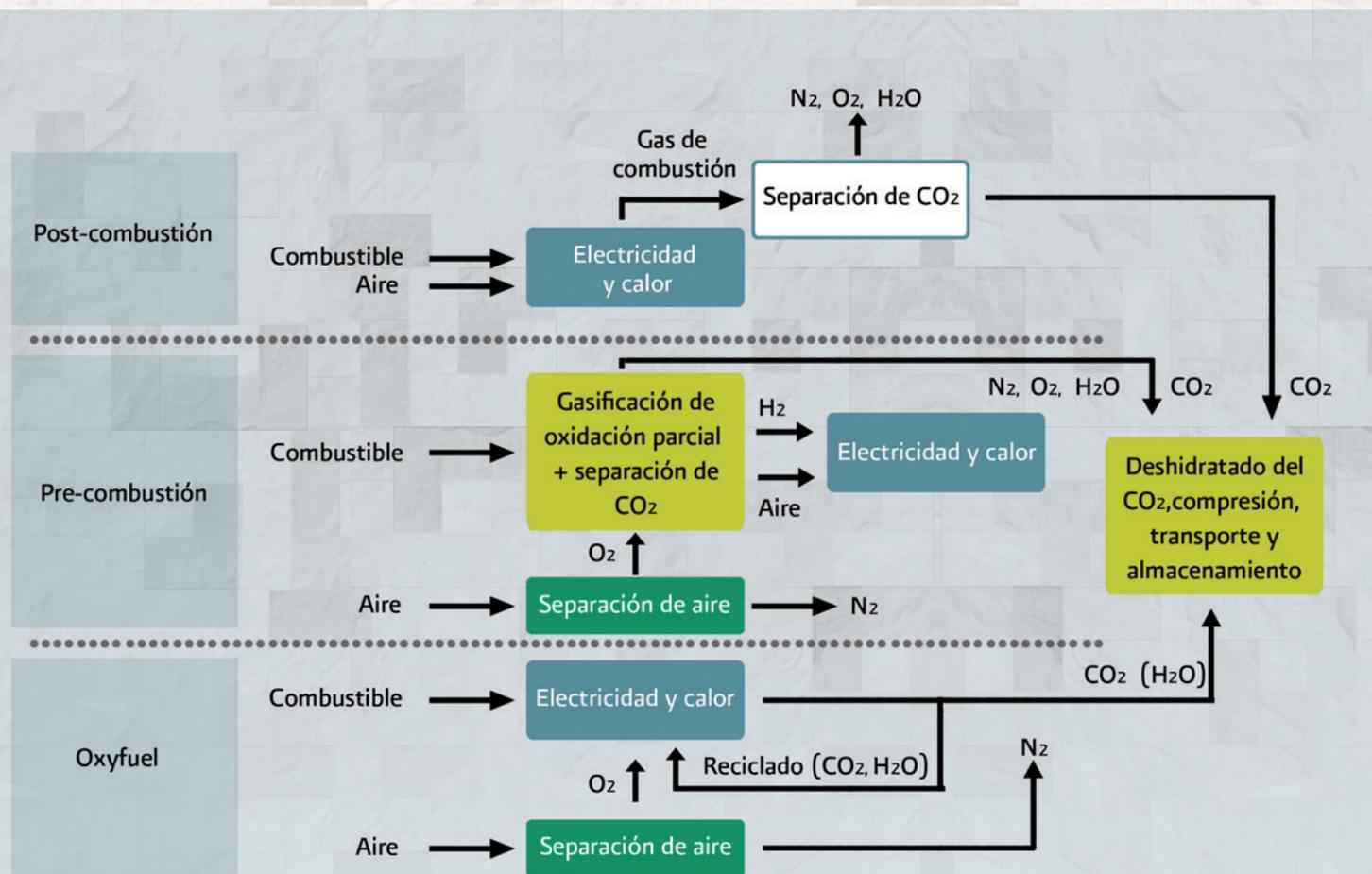


Figura 8 - Técnicas disponibles para la captura y separación del CO₂ (17).

Las etapas principales de este grupo de procesos comienzan con la captura. Esta consiste en la separación del bióxido de carbono del resto de los gases que resultan de un proceso industrial (generación de electricidad, refinerías, fabricación de hierro y acero, cemento, química, etc.). Los medios más comunes para lograr esta parte del sistema se muestran en la figura 8. De los cuales actualmente el más utilizado es el de post-combustión.

En seguida el proceso del transporte. Una vez separado el CO₂ se comprime y conduce por gasoductos, pipas o buques hasta el sitio en el que se vaya inyectar al subsuelo. Posteriormente tiene lugar el almacenamiento que se lleva a cabo inyectando el CO₂ suficientemente profundo hasta alcanzar una formación rocosa de características específicas.



**EL BIÓXIDO DE
CARBONO EN
MÉXICO**

Cascadas de Tamul, San Luis Potosí

México contribuye con el 1.67 % del total de las emisiones anuales de gases de efecto invernadero a nivel mundial (18). Ocupa el onceavo lugar entre los países con mayores emisiones, sin embargo, en comparación con los países industrializados sus emisiones son relativamente bajas como se aprecia en la figura 9.

Los gases de efecto invernadero tienen características diversas y su potencial de calentamiento global varía considerablemente, por lo tanto para fines comparativos, se ha incorporado el criterio de medir los diferentes gases en unidades de CO₂ equivalente (CO₂e) considerando el potencial de calentamiento global en un periodo de 100 años.

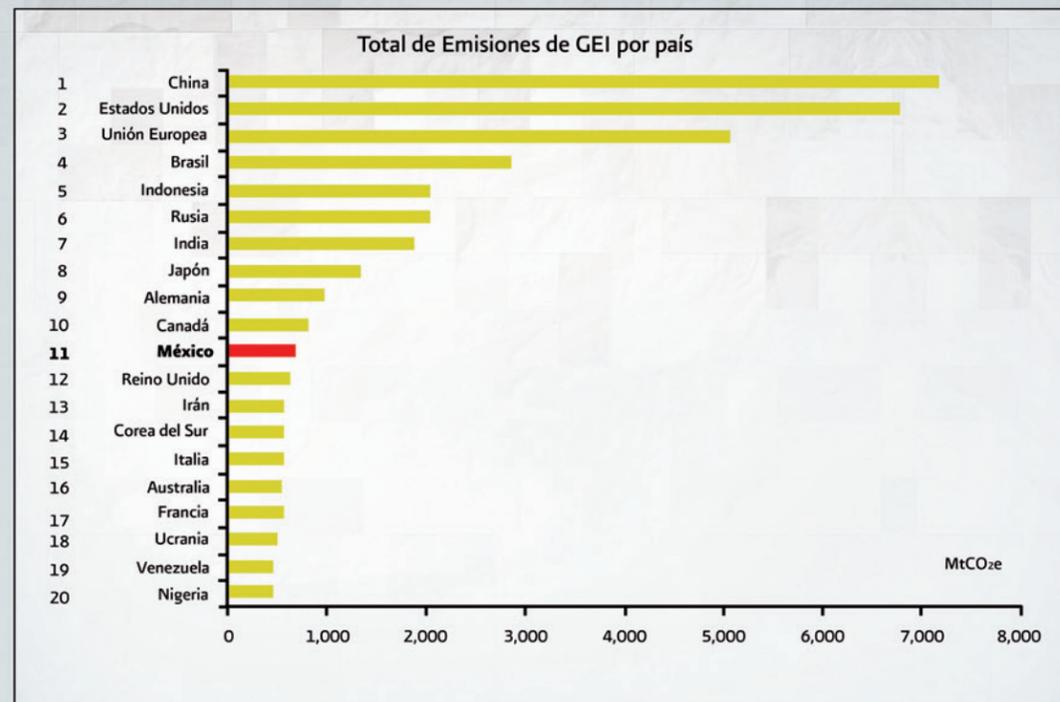


Figura 9 - Principales países con mayor volumen de emisiones anuales de GEI a nivel mundial. (19)

Fórmula Química	Gas de Efectivo Invernadero	Potencial de calentamiento Global
CO ₂	Bióxido de Carbono	1
CH ₄	Metano	21
N ₂ O	Óxido Nitroso	310
HFCs	Hidrofluorocarbonos	140 (C ₂ H ₄ F ₂) a 11700 (CHF ₃)
PFCs	Perfluorocarbonos	5700 (CF ₄) a 11900 (C ₂ F ₆)
SF ₆	Hexafloruro de Azufre	23900

Figura 10 - Potencial de Calentamiento Global de los gases de efecto invernadero. (20)

Considerando las equivalencias expresadas en la tabla anterior, en México las emisiones de gases de efecto invernadero presentan una distribución como la que se observa en la figura 11. Siendo el bióxido de carbono el gas de efecto invernadero más abundante y en el que mayor efecto tiene la actividad humana.

El total de emisiones de gases de efecto invernadero en México son 709 millones de toneladas de CO₂e, de las cuales 493 millones de toneladas corresponden a CO₂.

El almacenamiento geológico de CO₂ se puede aplicar únicamente en fuentes estacionarias, por lo tanto es importante diferenciar el origen de las emisiones para identificar el volumen de emisiones con potencial de almacenamiento.

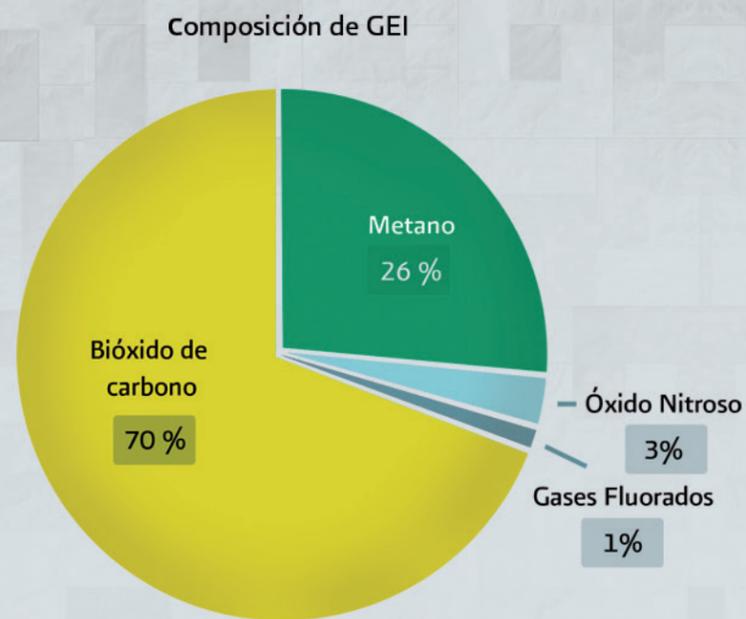


Figura 11 - Emisiones de gases de efecto invernadero por tipo de gas en México. (21)



Figura 12 - Emisiones de CO₂ por tipo de fuente en México (22)



Toma satelital de Centroamérica

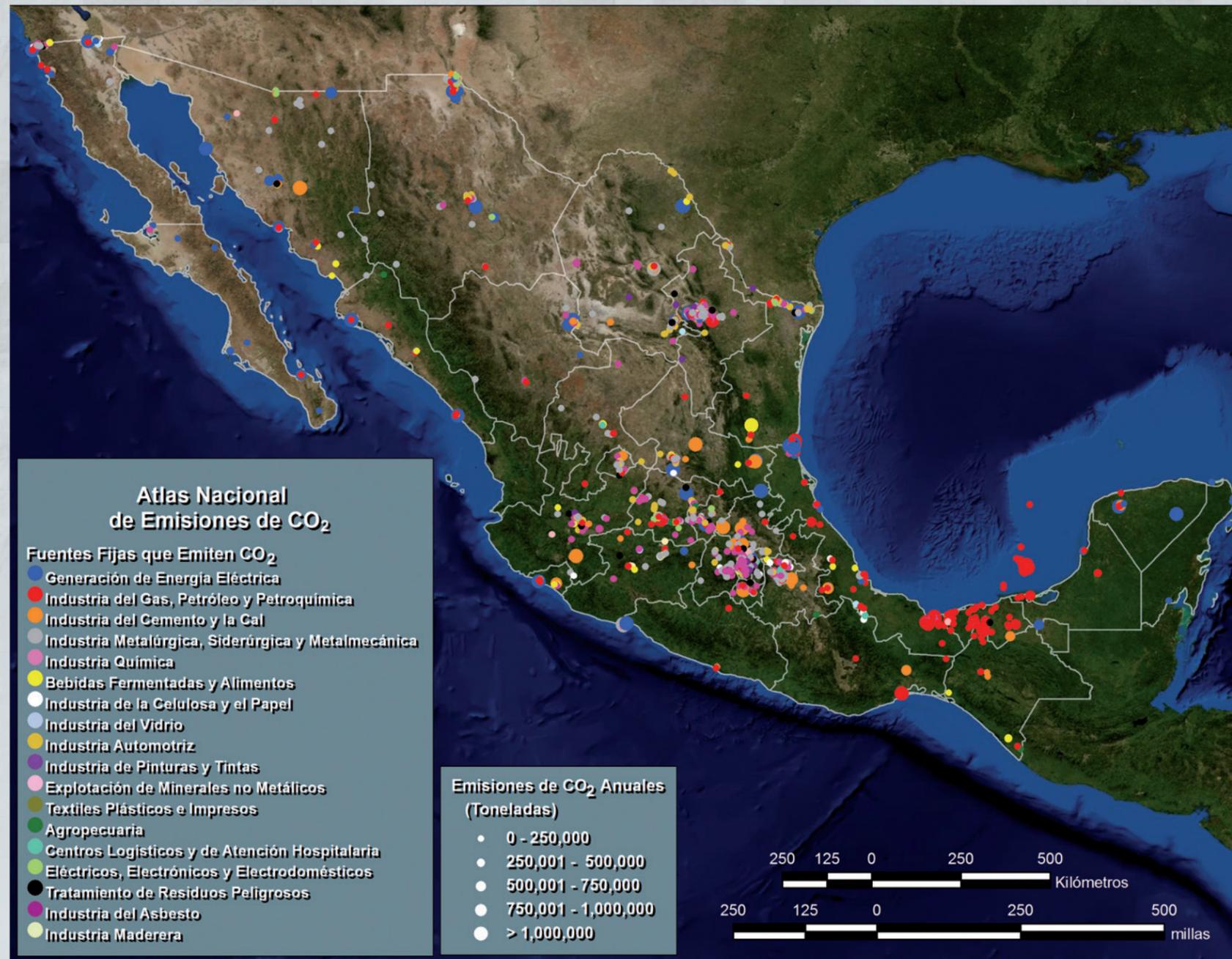


Figura 13 - Ubicación y magnitud relativa de las fuentes estacionarias que emiten CO₂. (23)

Si bien, en la CMNUCC se calculan emisiones provenientes de fuentes estacionarias por un total de 258 millones de toneladas, en el reporte correspondiente al 2010 del Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes (RETC) emitido por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), se identificaron 1935 fuentes estacionarias de los diversos sectores industriales que reportaron la emisión de 196 millones de toneladas de CO₂. La diferencia entre ambas cifras obedece principalmente a que esta última cantidad incluye únicamente a empresas de jurisdicción federal que están obligadas a reportar sus emisiones mediante el RETC.

La ubicación geográfica y la magnitud de las emisiones de los diversos sectores industriales se muestran en la figura 13. En los círculos, cada color representa un tipo diferente de fuente de emisión por giro de actividad y el área relativa de su circunferencia representa la magnitud de las emisiones de CO₂ asociadas.

Emisiones estacionarias de CO₂ por sector industrial.



En lo que respecta a los sectores industriales destacan 4 que por su gran cantidad de emisiones se convierten en los principales prospectos para estudiar la posibilidad de capturar y almacenar el CO₂ que emiten. La industria de la generación de Energía Eléctrica, Industria del Gas, Petróleo y Petroquímica, la Industria del Cemento y la Cal, finalmente la industria de la siderurgia y metalurgia.

Estos sectores son los que mayor cantidad de emisiones de CO₂ transfieren al ambiente con el menor número de fuentes emisoras, lo cual permite identificarlos como los principales prospectos para la aplicación de las tecnologías de almacenamiento geológico.

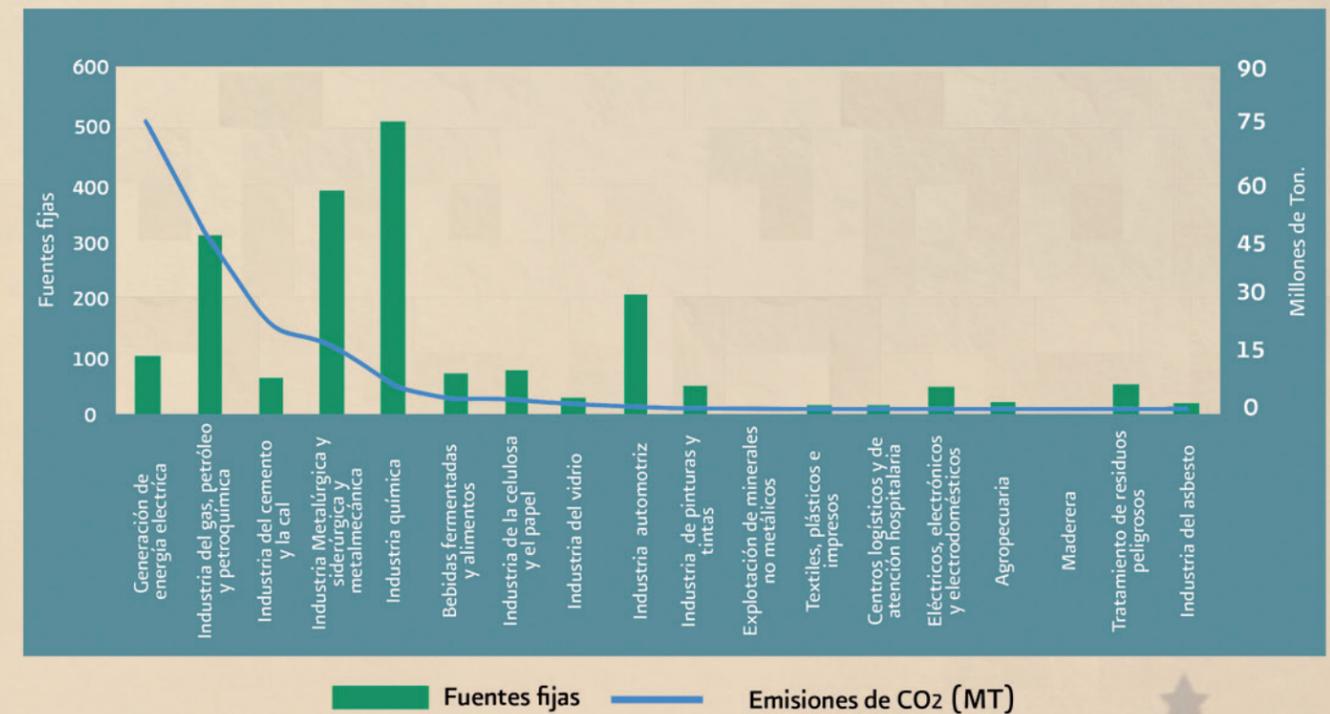


Figura 14 - Asociación de número de fuentes y cantidad de emisiones de CO₂ por sector industrial. (24)

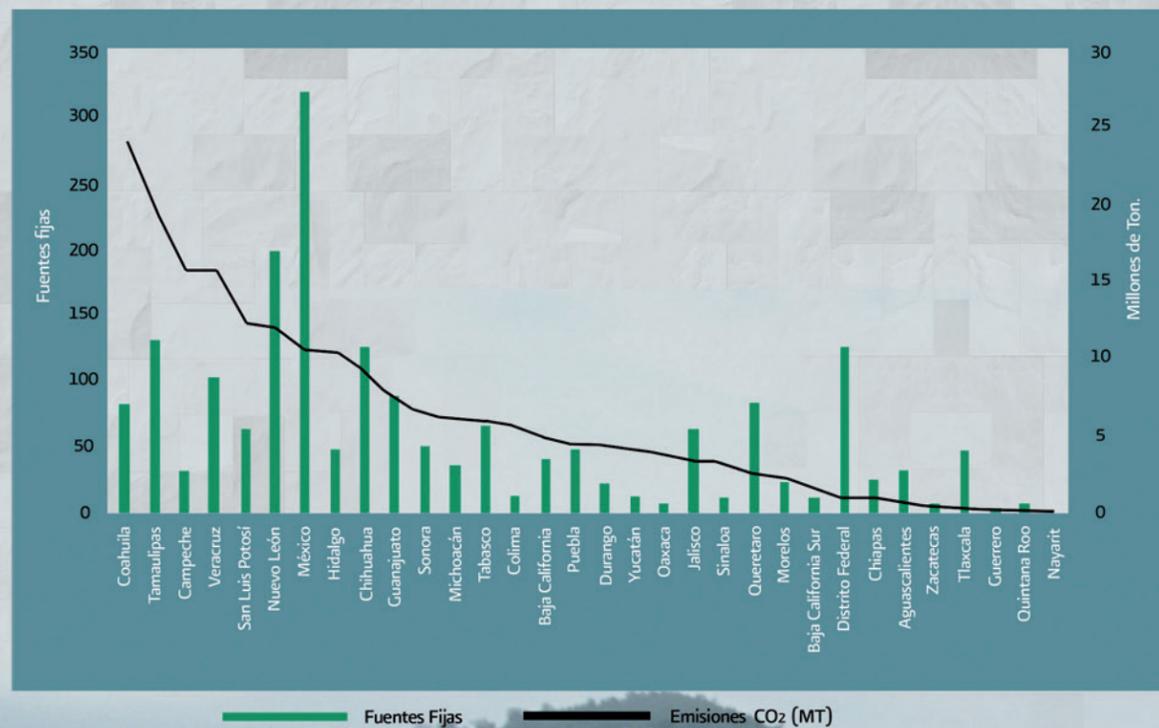
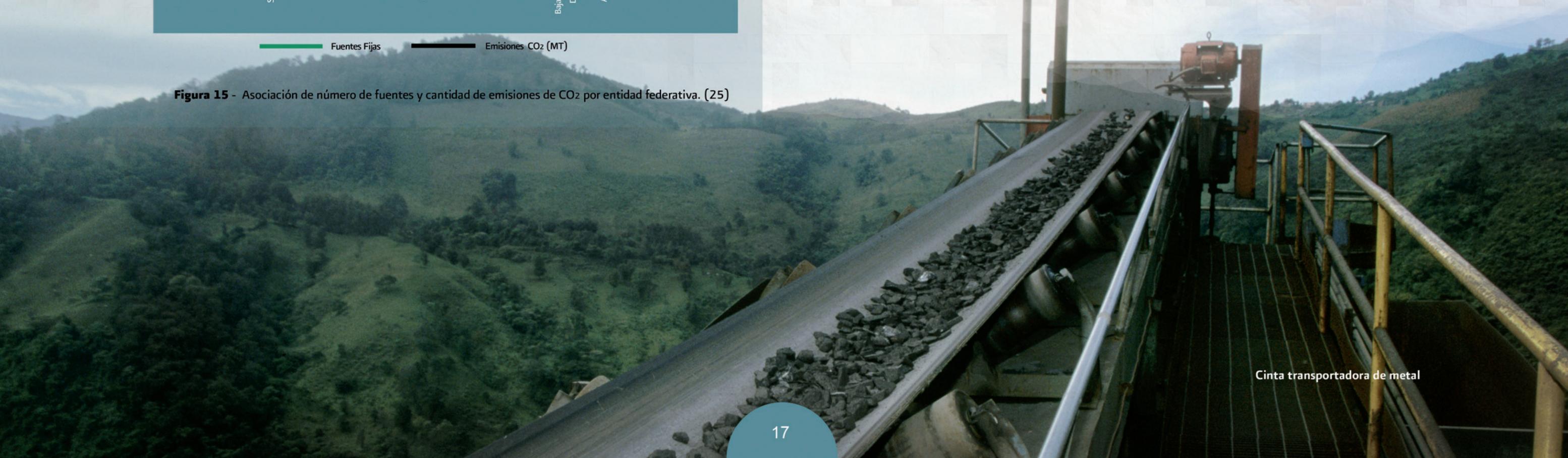


Figura 15 - Asociación de número de fuentes y cantidad de emisiones de CO2 por entidad federativa. (25)

La Entidad Federativa que mayores emisiones reporta es Coahuila con un total de 24 millones de toneladas de CO2, lo que se asocia principalmente a que es sede de dos plantas generadoras de energía eléctrica por carbón y una planta siderúrgica.

Entre los estados que siguen a Coahuila en la generación de emisiones de CO2 destaca Tamaulipas con una aportación del orden de 19 millones, y a éstas le siguen las de Campeche y Veracruz, ambas del orden de 15.5 millones de toneladas de CO2 respectivamente.

Debe hacerse notar el hecho de que estos tres estados, Tamaulipas, Veracruz y Campeche conforman prácticamente todo el litoral del Golfo de México, zona de alta explotación petrolera y por ende con un alto potencial de aprovechamiento de CO2 para recuperación mejorada de crudo.



Cinta transportadora de metal



**ALMACENAMIENTO
GEOLÓGICO
DE CO₂**

El almacenamiento geológico de CO₂ proveniente de fuentes emisoras estacionarias implica su inyección a profundidad suficiente para disminuir al máximo posible su flotabilidad. Los reservorios utilizados, además de porosos y permeables, deben asegurar la estabilidad permanentemente. Usualmente se manejan profundidades superiores a los 800 m dado que a esa profundidad el bióxido de carbono alcanza una densidad suficientemente alta y permanece más o menos constante de ahí hacia abajo. En la figura 16 se esquematiza el comportamiento de volumen y densidad del CO₂ con la profundidad.

El mecanismo de retención en subsuelo más frecuente es el que provee la estructura geológica misma. Lo más usual es que se utilice una trampa estratigráfica que por su baja permeabilidad ofrezca suficiente resistencia al ascenso del CO₂. Otros mecanismos que también intervienen pero que demoran lapsos muy grandes de tiempo para entrar en acción, son la retención residual – burbujas en el líquido anfitrión –, la disolución en los líquidos en este mismo líquido y la reacción con los minerales del lecho rocoso que sirve de almacén. En la figura 17 se representan estos fenómenos y la escala del tiempo en que teóricamente se presentarían.

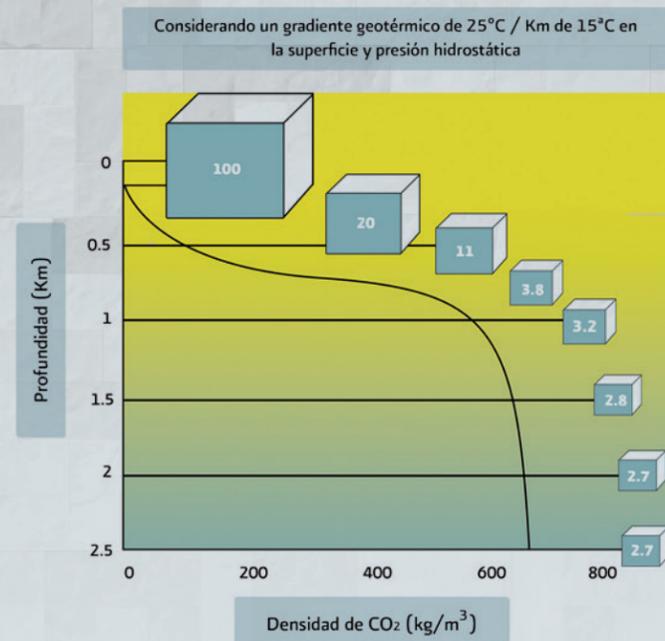


Figura 16 - Densidad y volumen relativo del CO₂ a diferentes profundidades (26).

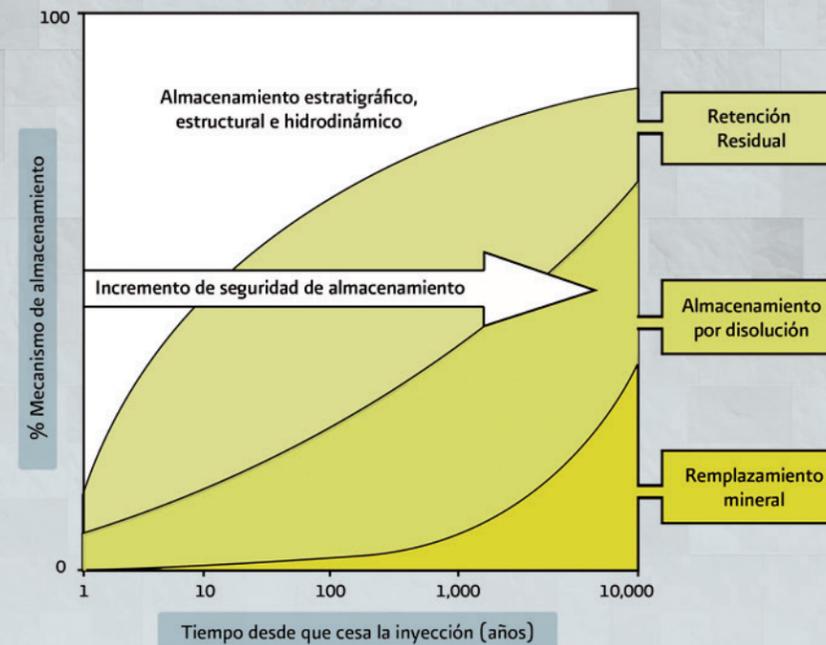


Figura 17 - Fenómenos de retención que tiene lugar en las diferentes etapas de retención (27).

Almacenar fluidos en el subsuelo no es una tecnología nueva, se ha utilizado por muchos años en la industria petrolera sobre todo. En la actualidad, se aprovecha este conocimiento con el fin de mitigar el efecto del CO₂ en el ambiente. Para estos fines se han utilizado hasta ahora tres tipos de depósitos. El más utilizado es precisamente el que tiene su origen en los campos de hidrocarburos del cual se desprenden dos variantes: el que se genera a través del espacio que ha dejado el gas o aceite en los campos exhaustos de uno y otro fluido. La segunda variante de este tipo es la que se ha llamado recuperación mejorada de hidrocarburo o EOR por sus siglas en inglés – Enhanced Oil Recovery – el cual consiste en términos generales en introducir CO₂ aumentando la presión del yacimiento que ya se encuentra en sus últimas etapas de producción, con lo cual se obtiene un poco más de gas o aceite. Por el producto obtenido de este proceso, que tiene un valor económico importante, esta opción es con mucho, la más utilizada a la fecha.

El segundo tipo de depósito es el que tiene lugar en los mantos de carbón sin explotación económica. En estos sitios se suele inyectar el bióxido de carbono reemplazando al metano siempre presente en este tipo de yacimiento permitiendo que el carbón, que tiene una mayor afinidad con el CO₂, lo atrape y permita su aislamiento de la atmósfera.

El tercer tipo se refiere a guardar el gas en acuíferos que por su salinidad no tengan posibilidades de utilizarse por el hombre. Guardar el bióxido de carbono en esta modalidad si bien no ofrece un subproducto con valor económico como en los casos anteriores, es el que más potencial tiene por su importante capacidad de almacenamiento en la corteza terrestre. En la figura 18 se aprecia un esquema de las formas de almacenamiento descritas anteriormente.

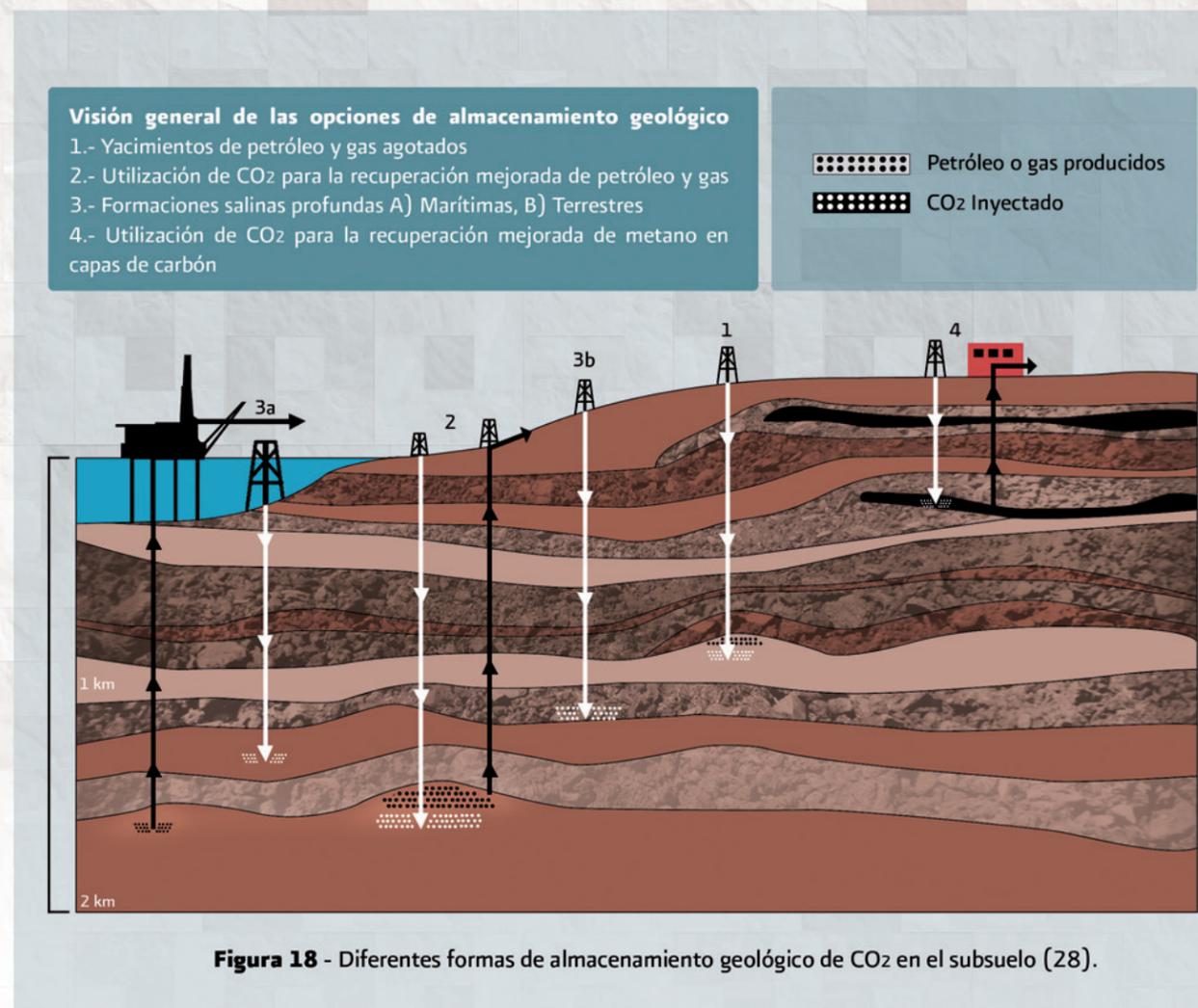


Figura 18 - Diferentes formas de almacenamiento geológico de CO₂ en el subsuelo (28).

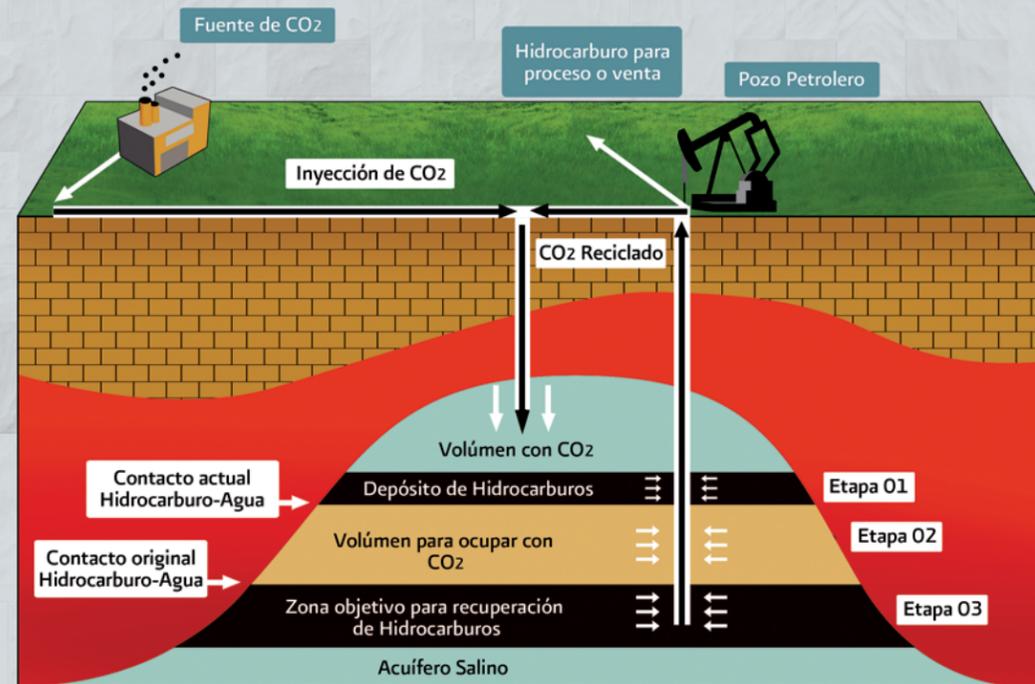


Figura 19 - Esquema simplificado de los componentes de un sistema de almacenamiento de CO₂ en la recuperación mejorada de hidrocarburos (30).

Almacenar CO₂ en sitios que antes fueron ocupados por hidrocarburos tiene sus orígenes al inicio de la década de los setenta en la Cuenca Pérmica de oeste de Texas (29). Originalmente el bióxido de carbono utilizado era de origen natural, principalmente de la producción de gas natural, no de emisiones de instalaciones estacionarias producto de la combustión antropogénica de combustibles fósiles, como se hace hoy en día. Por definición, las formaciones en que se encontraron yacimientos exhaustos de hidrocarburos cuentan con mecanismos de entrapamiento, lo cual constituye la primera de sus ventajas. Por ello constituyen atractivos almacenamientos con pocas probabilidades de fugas. Otra de sus ventajas es que al utilizar el CO₂ como fluido presurizante habilita la posibilidad de obtener remanentes económicos de hidrocarburos que pueden hacer rentable el proceso de captura, separación, transporte e inyección de este gas.

En la figura 19 se aprecia un esquema general de este proceso. Por otra parte, las limitantes de este tipo de almacenamiento son en primer lugar, que la estimación de su capacidad es considerablemente menor que la que puede ofrecer la variante de acuíferos salinos y por otra, válida en particular para los depósitos tipo EOR, que *a priori*, es difícil establecer la capacidad de almacenamiento dado que una fracción importante del gas inyectado retorna en el proceso de recuperación por lo que la parte realmente alojada en el depósito se conoce sólo hasta cesar el proceso de inyección.

Al ser la generación de energía eléctrica la principal fuente estacionaria de emisiones de CO₂ en el mundo, la asociación de plantas térmicas, particularmente termoeléctricas hace atractivo el esquema de almacenamiento de sus gases con el uso en esquemas de EOR, pues el hidrocarburo recuperado puede pagar el costo de los procesos de captura, compresión, transporte e inyección, que de otra forma deberán ser adicionados al costo de producción del kWh generado. No obstante, hasta la fecha no existen esquemas de escala comercial de este tipo, aunque hay algunos planeados o en construcción, y existen operando solamente proyectos piloto. Los grandes proyectos de escala comercial operando en el mundo obtienen el CO₂ de fuentes naturales, de la quema de lignito para la obtención de gas de síntesis o como subproductos de la industria petrolera.



Planta petroquímica en el Golfo de México

Acordes con la proporción mundial, las centrales termoeléctricas son grandes fuentes industriales de CO₂ en México. Algunas localizadas cerca de los campos productivos de petróleo y de las cuencas con potencial de almacenamiento. A la fecha ya se han iniciado los estudios para lograr la captura del CO₂ en algunas instalaciones de generación de electricidad localizadas en el Golfo de México, a partir del año 2017. Desde el 2009, la CFE en conjunto con PEMEX y otras instituciones están diseñando un proyecto demostrativo para generar energía eléctrica libre de emisiones. El objetivo es analizar la viabilidad de capturar el CO₂ de una central termoeléctrica y utilizarlo para recuperación mejorada de petróleo en el Activo Integral Aceite Terciario del Golfo.

El plan de trabajo incluye el estudio de la ruta tecnológica de la captura y el almacenamiento de CO₂ en México, el estudio de factibilidad para la aplicación de esta tecnología, el plan de financiamiento y un anteproyecto para un sitio específico donde se ubicará el proyecto demostrativo. En 2012 deberá iniciar la operación de una planta piloto en donde se capture el CO₂ emitido por una unidad de generación eléctrica de 2 MW con fines de inyectarlo en estructuras geológicas.

En Pemex ya se ha considerado este proceso a partir de CO₂, entre otras opciones para mejorar la eficiencia en la extracción de aceite y gas y ha realizado las pruebas experimentales en el Campo Artesa en el año 2000, localizado en el Activo Cinco Presidentes, con un volumen de inyección de CO₂ promedio de 25 MMPCD y cuatro pozos productores. En el Campo Sitio Grande en el 2005, con un volumen de inyección de CO₂ de 24 MMPCD. En estos dos sitios se estimó que se pueden producir del orden de 950 millones de barriles con EOR (31).

Actualmente, PEMEX está desarrollando dos proyectos de Recuperación Mejorada de Petróleo y tiene en fase de diseño de una prueba piloto para inyectar CO₂ en el Campo Ogarrio. El campo se sitúa en el Activo Cinco Presidentes; se encuentra en fase de diseño y se espera inyectar CO₂ proveniente del Complejo Petroquímico de Cosoleacaque. También se ha llevado a cabo la prueba piloto para inyectar CO₂ en el Activo Integral Aceite Terciario del Golfo. En 2008 se iniciaron los primeros análisis y los resultados observados confirman la compatibilidad de los fluidos e impermeabilidad de la roca sello (32).



Figura 20 - Ubicación aproximada de las principales cuencas carboníferas en México (34).



Los yacimientos de carbón investigados para servir como almacenes definitivos de CO₂ deben tener la característica de no ser minables. Esto quiere decir que deben carecer de atractivo económico para explotarse con fines energéticos y que esta posibilidad perdure en el tiempo. Esta es una condición difícil de sostener por siempre pues los avances tecnológicos puede hacer rentable la explotación de un cierto manto que de momento no lo es. Un buen ejemplo es el que se deriva de la explotación UCG – *underground coal gasification* – que significa obtener la energía del carbón *in situ* por medio de gasificarlo, extrayendo únicamente el gas a superficie. Esta es una forma de explotación todavía no muy desarrollada pero ya conocida.

El caso de México en lo que a cuencas carboníferas se refiere hace que de momento no se visualice esta modalidad como opción de almacenamiento geológico. En el país se sabe de tres regiones carboníferas suficientemente estudiadas y en ningún caso estas cumplen con los criterios de almacenamiento vigentes (33).

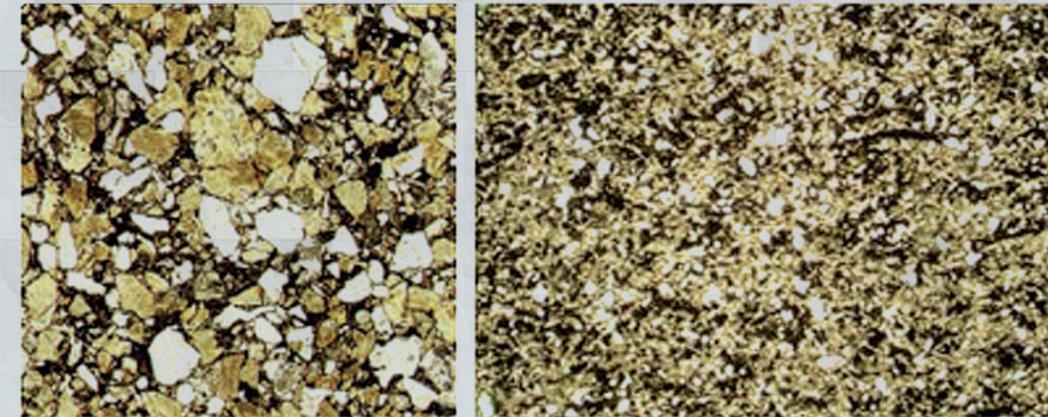
La mejor conocida es la del noreste del país. Aquí se localizan las cuencas de Fuentes-Río Escondido, Terciaria del Golfo y Sabinas –Monclova. Todas ellas están actualmente en explotación o tienen planes para estarlo. Son además la base de las reservas de energía calorífica para alimentar a la industria siderúrgica nacional y dos de las tres plantas carboeléctricas que tiene el país. Su rentabilidad económica y utilidad como fuente de recursos energéticos las excluye en los objetivos de CCS. Ver la Figura 20.

Las dos regiones restantes se localizan en los estados de Sonora y Oaxaca. En este caso la razón que hay para no considerarlas como posibles repositorios de CO₂ es que su estructura geológica es bastante compleja. Las zonas en las que se localizan han estado sometidas en varias ocasiones a esfuerzos tectónicos lo que las ha deformado y fallado haciendo de sus mantos rocosos y de carbón por lo tanto, cuerpos grandemente disectados y discontinuos lo que hace difícil asegurar la integridad de los posibles almacenes. Esta misma razón ha hecho que aunque se ha estimado que sus reservas energéticas son importantes, el desarrollo de planes de explotación minera no es económicamente atractivo.

Para guardar bióxido de carbono en un acuífero salino es necesario disponer de un lecho rocoso de suficiente permeabilidad, saturado parcialmente de agua de alta salinidad (como mínimo del orden de 10,000 ppm STD (35)) que garantice que no tiene posibilidades de usarse para fines de consumo humano. Típicamente, se utilizan formaciones de areniscas, arenas o calizas cársticas yaciendo a suficiente profundidad cubiertas con algún estrato potente de sedimentos arcillosos que garanticen el confinamiento del depósito. Se prefieren estos tipos de rocas porque suelen tener suficientes espacios vacíos para alojar CO₂. En la fotografía 1 y 2 se aprecian afloramientos de areniscas como pueden ser vistos en muchos lugares del campo mexicano y de los que existen innumerables formaciones sepultadas por miles de metros de otros tipos de rocas. Este tipo de formaciones es uno de los principales objetivos en la búsqueda de sitios apropiados para el almacenamiento de CO₂ en México y el mundo tanto por su permeabilidad (capacidad para permitir el paso de fluidos) como por su porosidad (espacios vacíos entre los granos). En las fotografías 3 y 4 se aprecian tomas al microscopio de areniscas y lutitas de formaciones geológicas mexicanas.



Fotografía 1 y 2 - Se muestran dos afloramientos; areniscas de la Formación Matzitzi de edad paleozóica (izquierda) (36) y areniscas y conglomerados de la Formación Tilapa de edad eocénica (derecha) (37). Esta forma de ocurrencia es típica en diversos puntos de la geografía mexicana, por fortuna para los fines de almacenamiento geológico en acuíferos salinos profundos.



Fotografía 3 y 4 - A la izquierda se muestra una microfotografía ampliada 20 veces de una arenisca vista a la luz natural (38). Nótese la posibilidad de espacios vacíos que se pueden formar por el acomodamiento que existen entre granos y la relación del tamaño de los espacios respecto a éstos. A la derecha una microfotografía de una lutita (39) (roca formada de laminillas de arcilla) con la misma escala de ampliación en donde se puede apreciar la mayor ocurrencia de porosidad, pero en donde los espacios son mucho más reducidos y su tamaño con respecto a los granos igualmente menor, lo que hace que los poros no tengan continuidad con la consecuente disminución de permeabilidad.

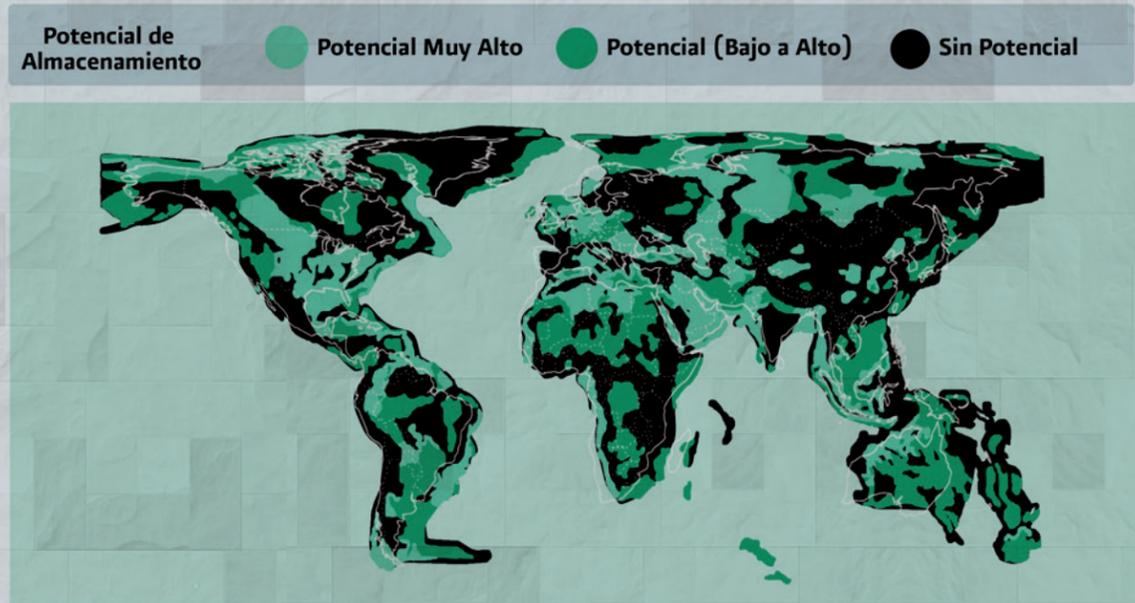


Figura 21 - Zonas continentales en donde se estima que existe potencial de almacenamiento de CO₂ en acuíferos salinos profundos (40).

La forma de almacenamiento en acuíferos salinos profundos, es la más prometedora de las formas de almacenamiento geológico de CO₂ como medida de mitigación definitiva en cuanto a secuestro del CO₂. La principal razón es que existen prácticamente bajo casi todos los continentes y océanos y su capacidad es mucho mayor que la necesaria para almacenar todo el gas por emitir mientras existe la necesidad de seguir quemando combustibles fósiles. En la figura 21 se aprecia un panorama mundial de las regiones continentales en las que podría almacenarse CO₂. En la Figura 22 se presenta en forma esquemática un estimado de la capacidad mundial contra la demanda que puede tener este tipo de almacenamiento.

Sin embargo, de momento la modalidad más demandada en materia de almacenamiento de CO₂ no es la de acuífero salino profundo sino la asociada a EOR debido a que esta ofrece la posibilidad de obtener

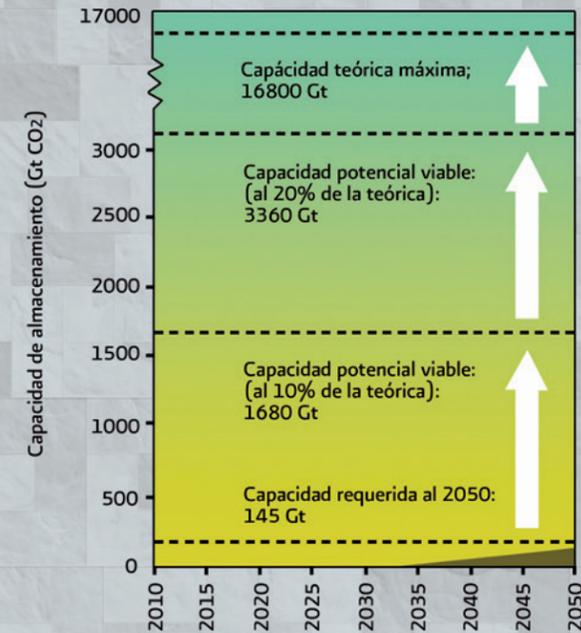


Figura 22 - Esquema donde se muestra que las necesidades mundiales de almacenamiento de CO₂ al año 2050 constituyen aproximadamente el 1% de la capacidad teórica de almacenamiento en acuífero salino (41).

un subproducto de valor económico. No obstante, se espera que el almacenamiento en acuífero salino cobre relevancia al bajar el costo de la tecnología ahora en desarrollo y se reconozca la importancia que le da su enorme capacidad en la medida que persista la necesidad de quemar combustibles fósiles y el aumento del efecto invernadero.

En el siguiente capítulo se expondrá lo hecho hasta ahora para cuantificar la capacidad de la geología del país para almacenar CO₂ en su subsuelo. Se verá que aunque este conocimiento está en una etapa primaria, se aprecia que existe potencial suficiente. También se notará que lo estudiado hasta ahora se refiere únicamente a depósitos del tipo de acuífero salino profundo y se espera que en breve se inicie también la cuantificación de almacenamiento asociado a campos de hidrocarburos exhaustos y EOR.



Central Termoeléctrica Petacalco, Michoacán

La existencia del CO₂ en las concentraciones naturales en la atmósfera del planeta no sólo no es causa de riesgo para las especies que lo habitan, sino necesario. Estas han variado a lo largo de su historia pero se acepta que un poco menos del 0,04% es adecuada para mantener en equilibrio los procesos en los que interviene (efecto natural de invernadero y fotosíntesis principalmente) y hacer de La Tierra un planeta habitable.

Sin embargo, al ser más pesado que el aire (1,8 kg/m³) (42) en caso de escapar de un depósito geológico se mantendría en niveles atmosféricos bajos habitados por la biodiversidad, lo cual constituye su principal riesgo. No obstante, recientemente se ha demostrado que en sitios en donde existen emanaciones naturales muy significativas de CO₂ a causa de la actividad volcánica (particularmente en Italia) las posibilidades de envenenamiento o asfixia son muy remotas. En estos territorios la convivencia humana con el fenómeno es milenaria y existen raros casos documentados de muertes por esta causa (43). La selección de sitios seguros para la inyección de CO₂ al subsuelo comienza por descartar zonas que no garanticen estabilidad sísmica, volcánica y geológica. Es decir, desde las primeras etapas del proceso de selección de sitios, se debe garantizar que los lugares escogidos estén libres de sismicidad importante, lejos de volcanes activos y que no estén disectados por fallas activas o fracturas en la corteza que permitan la fuga del gas ahí almacenado.

Para el caso de México, esta etapa del proceso de selección exigió eliminar con estos criterios, prácticamente toda la vertiente occidental en donde se encuentra la zona de subducción del Pacífico y la parte central de la República Mexicana en donde se encuentra la Faja Neovolcánica.

En cambio, se escogieron para llevarse a etapas más avanzadas de valoración, las regiones sureste y oriental del país y la Península de Yucatán, sin que esto quiera decir que cualquier sitio de estas regiones es adecuada para alojar de CO₂ en el subsuelo. Lo cual es motivo de investigaciones más detalladas, escrupulosas y por ende, de mucho mayor costo.

Aun así, un sitio escogido y una vez construido un almacén de CO₂, deberá someterse permanentemente a un escrutinio riguroso denominado MMV por sus siglas en inglés (Measuring, Monitoring and Verification). Y serán los parámetros que este proceso continuo arroje los que permitan la ratificación del sitio como almacén geológico de bióxido de carbono. Desde luego esta es una condición que constituye un compromiso serio que requiere recursos técnicos y económicos no fáciles de conseguir, pero obligatorios para lograr la factibilidad y licenciamiento de un sitio.

Además de la obligación de MMV en los proyectos productivos existen algunos otros diseñados exclusivamente para investigar el comportamiento del CO₂ en subsuelo y conocer sus posibilidades de fuga a la atmósfera. Un ejemplo muy reciente y de resultados alentadores es el llevado a efecto en Nirranda South en el sudoeste de Australia en donde se localiza el proyecto CO₂ CRC Otway (44). En este sitio se ha almacenado bióxido de carbono desde abril de 2008 en cantidades importantes a dos kilómetros de profundidad en un campo exhausto de gas, a la vez que se ha generado gran cantidad de información científica que servirá expofeso para conocer la eficiencia de este tipo de almacenes y los riesgos reales que en este caso han demostrado ser suficientemente confiables. Uno de los rubros más importantes que en el corto plazo México debe llevar a cabo, es el de las regulaciones tanto para la validación de sitios futuros con fines de CCS como para normar las actividades de MMV durante la operación de los mismos.

Grados de Resolución en la Cuantificación de Capacidades

La selección de sitios adecuados para almacenar CO₂ en volúmenes significativos requiere de evaluaciones de varios tipos, pero sobre todo geológicas progresivas con grados de detalle cada vez mayores en resolución y costo y que abarquen físicamente un espacio cada vez menor. Las diferentes escalas de estudios van desde las de carácter regional que pueden incluso incluir a todo un país, hasta las de caracterización específica de un sitio para perforar un pozo de inyección. Cada uno de estos estudios va reduciendo el nivel de incertidumbre con respecto al paso que le antecede y disminuye en la capacidad para almacenamiento que había sido calculada en el nivel precedente. Además, cada siguiente nivel de detalle rumbo a la caracterización de un sitio requiere de un esfuerzo mayor en términos tecnológicos, de tiempo y finalmente económicos.

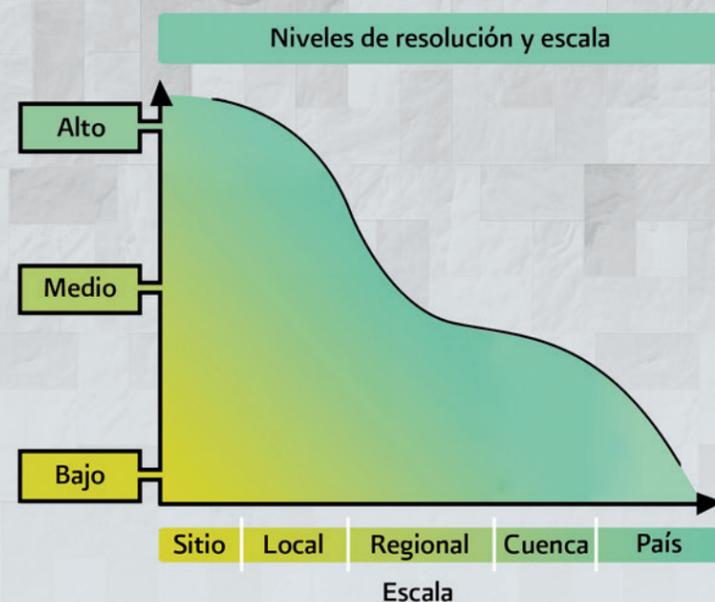


Figura 23 - Niveles de resolución y escala para estimación de capacidades en estudios de almacenamiento geológico de CO₂ (45).

La figura 23 muestra un modelo generalmente aceptado respecto a las diferentes escalas de evaluación de sitios para almacenar geológicamente CO₂. La información que este Atlas presenta en el capítulo siguiente, en el que se aborda propiamente la estimación de capacidad de almacenamiento con que cuenta el país, incluye los niveles que en este modelo corresponden a país y cuenca en el tipo de depósito de acuífero salino profundo. Actualmente se están llevando a cabo esfuerzos para determinar el potencial de almacenamiento a nivel regional en algunas zonas específicas de México, al igual en lo que se refiere al los tipos de depósito que tienen que ver con hidrocarburos (campos exhaustos y EOR) pero sus resultados deseablemente se incorporarán en una siguiente versión.

Las capacidades que se pueden ir estimando a partir de estudios que aumentan su grado de resolución con uso de la metodología, pueden a su vez dividirse en cuatro grados de certidumbre: capacidad teórica, capacidad efectiva, capacidad práctica y capacidad factible. Estos cuatro tipos de precisión de las estimaciones se pueden ver en la figura 24 en donde la forma anidada representa solamente lo circunscrito que resulta un nivel con respecto a su nivel antecedente, de ninguna forma el área de uno y otro tienen que ver con la realidad.

La **capacidad teórica** que es la que actualmente se ha estimado en los inventarios mexicanos y que se consignan en este Atlas. Considera idealmente que todo el espacio físico disponible en un repositorio, está accesible al fluido inyectado.

La **capacidad efectiva** abarca sólo una parte de la capacidad teórica y representa aquella que se obtiene de aplicar criterios limitantes tanto geológicos como ingenieriles.

La **capacidad práctica** es una fracción de la capacidad efectiva y es la que considera limitantes técnicas, legales, de infraestructura, económicas y regulatorias para su uso.

Por su parte la **capacidad factible** es la parte de la capacidad práctica que se obtiene de enfrentar los sitios de almacenamiento seleccionados con los puntos de emisión que se necesitan concentrar y que son adecuados en términos de cantidad y características apropiadas del gas finalmente obtenido del proceso de captura, separación y transporte. Este nivel de certidumbre corresponde a lo que para fines de explotación de recursos minerales, comúnmente se denomina reservas probadas.



Figura 24 - Diferentes niveles de certidumbre que se manejan en las evaluaciones para estimar capacidad de almacenamiento geológico de CO₂ (46).



**CAPACIDADES DE
ALMACENAMIENTO
GEOLÓGICO DE
CO₂ EN
MÉXICO**

CO-173/4

Tubería en Central Eléctrica



Figura 25 - Zonas de inclusión y exclusión con potencial o no de almacenar geológicamente CO₂ antropogénico en la República Mexicana (48).

Considerando que los acuíferos salinos profundos son una de las mejores opciones para almacenar CO₂ en el subsuelo, se han realizado diferentes análisis de la información geológica disponible públicamente para delimitar extensiones del territorio mexicano que cuenten con la capacidad de almacenar geológicamente CO₂ de origen antropogénico. Los análisis de información han adaptado la metodología propuesta por Bachu et al (2007) en la cual varían tanto la escala como el detalle de los estudios, de tal manera que el objetivo final es llegar a determinar un sitio en particular o varios de ellos, donde exista un reservorio al interior del cual sea posible inyectar CO₂. De esta manera, en México, se han iniciado estudios cuya escala considera todo el territorio nacional, además del análisis de provincias geológicas o cuencas sedimentarias donde el nivel de resolución requerido es bajo. En dichas provincias geológicas se han realizado cálculos teóricos que indican de forma general su capacidad de almacenamiento de CO₂ en acuíferos salinos profundos.

Zonas de Inclusión y Exclusión para almacenamiento geológico de CO₂

Sobre la base de análisis geológicos de las actividades geotérmica, sísmica, tectónica y volcánica recientes, ligados a la presencia de rasgos mayores geológico estructurales y tipos de rocas que afloran en México, se delimitaron zonas de inclusión y zonas de exclusión (47). En las zonas de inclusión es factible encontrar acuíferos salinos profundos con potencial de recibir grandes cantidades de CO₂ (Figura 25). Por el contrario, en las zonas de exclusión, no se considera conveniente, por el momento, localizar reservorios de agua salada para almacenar CO₂, hasta que no se realicen estudios de tipo geológico, geofísico y geoquímico, que tomen en cuenta principalmente el punto de vista del riesgo geológico. Lo anterior debido a que actualmente no se garantiza la permanencia del CO₂ en el subsuelo durante largos periodos de tiempo.



Figura 26 - Provincias geológicas con posibilidades de almacenar CO₂ antropogénico.



Figura 27 - Zonas con presencia en el subsuelo de acuíferos salinos profundos alrededor del Golfo de México.

Provincias Geológicas

El análisis geológico de las zonas de inclusión realizado en mayor detalle y con mejor resolución de estudio, ha permitido identificar once provincias geológicas, también conocidas como cuencas sedimentarias, con potencial de contener acuíferos salinos en profundidades mayores a los 800 metros. Las provincias geológicas son: Baja California, Sonora-Sinaloa, Chihuahua, Coahuila, Central, Burgos, Tampico-Misantla, Veracruz, Sureste, Yucatán y Chiapas (Figura 26). Todas ellas tienen alta probabilidad de contener en su interior acuíferos salinos profundos en condiciones geológicas adecuadas para inyectar en ellos importantes cantidades de CO₂ antropogénico (Figura 27). Así mismo, al interior de algunas provincias se han identificado sectores constituidos de secuencias de rocas sedimentarias asociadas con acuíferos salinos. Una primera aproximación de estudio en cinco de las provincias presentes alrededor del Golfo de México (Burgos, Tampico-Misantla, Veracruz, Sureste, Yucatán y Chiapas) indica condiciones geológicas favorables para almacenar el total de las actuales emisiones anuales de CO₂ generadas por el sector eléctrico (49).

Un ejemplo de sector analizado

En cada una de las provincias geológicas identificadas en el territorio mexicano se han realizado interpretaciones a partir de la información geológica del subsuelo disponible públicamente. Un ejemplo de los datos analizados se puede ver en la figura 28. Entre los parámetros principales que han sido, hasta el momento tomados en cuenta, están: tipos y espesores de secuencias sedimentarias, fallas geológicas, unidades tectónicas mayores, así como propiedades petrofísicas de las unidades de roca objetivo, tales como porosidad, permeabilidad y saturación de agua (Figuras 28, 29, 30, 31).

Con este tipo de información se han realizado cálculos teóricos para obtener el potencial de almacenamiento en cada una de las provincias, para posteriormente relacionarlo con la ubicación y tipos de fuentes fijas de emisión de CO₂.

Ejemplo de la información pública utilizada en el cálculo de la capacidad teórica de almacenamiento de CO₂ para la Provincia geológica de Veracruz.

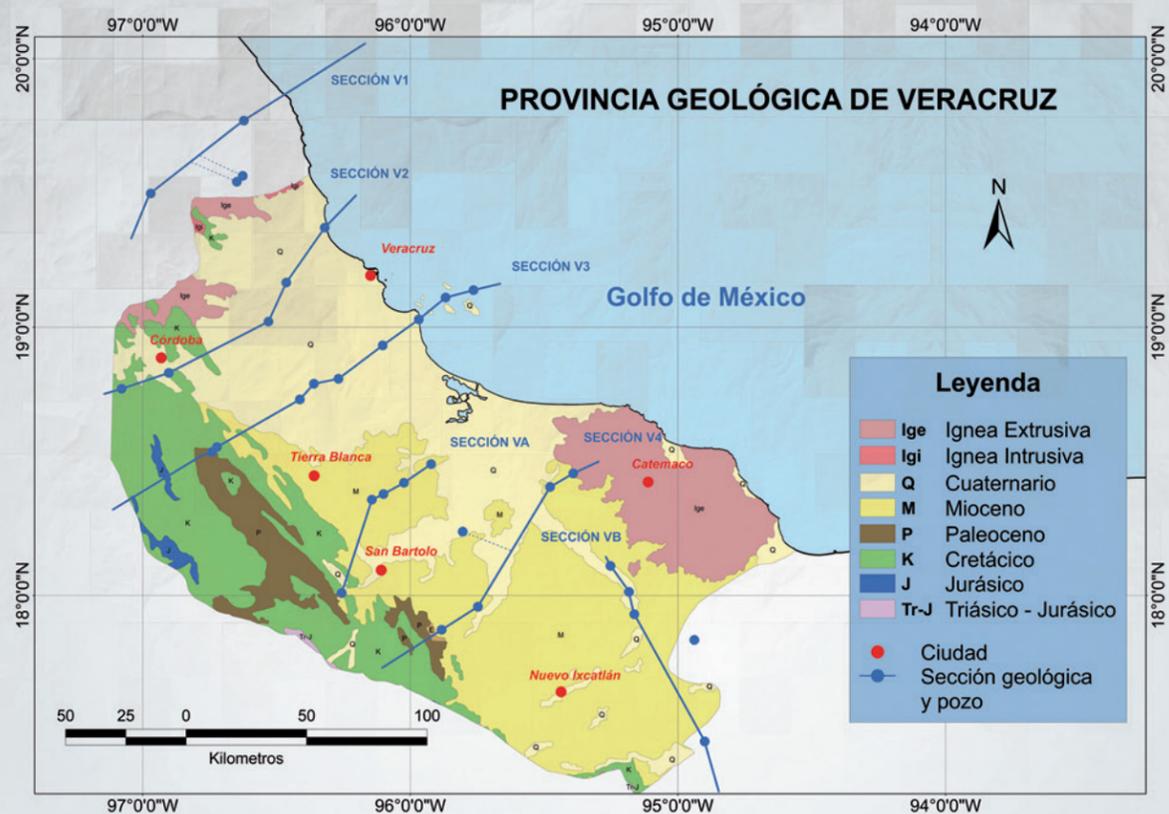


Figura 28 - Límites de la provincia geológica de Veracruz.

DATOS PETROFÍSICOS

PROFUNDIDAD (MTS.)	SISTEMA	EDAD	SIMBOLOGÍA	ESPESOR (MTS.)	REGISTRO ELÉCTRICO	TIPO	CÓDIGO CRONO-ESTRATIGRÁFICO AMBIENTAL	FORMACIÓN	LITOLOGÍA	AMBIENTE DE DEPÓSITO	DATOS PETROFÍSICOS				
											VCL (%)	PHle (%)	SW _i (%)	K _{int} (md)	NETO TOTAL (Frac.)
500	TERCIARIO	MIOCENO SUPERIOR		420				Fm. Encanto	Lutita gris, suave en partes bentonítica; escasa lutita gris verdoso, con material piritizado, ligeramente arenosa, aislados restos de conchas. Escasa arenisca gris-gris claro, de grano fino a medio, bien cementada.	Cuenca (Abanico submarino)	LUT <90 ARE <15	0 <10	<100 <50	0 <30	<0.10
1000		MIOCENO MEDIO		600				Fm. Depósito	Lutita gris verdoso, suave, ligeramente arenosa en partes bentonítica, escasa arenisca calcárea, gris de grano fino. Ocasionales fragmentos de mudstone (caliza) café, ligeramente arcillosa.	Cuenca (Abanico submarino)	LUT <90 ARE <15	0 <10	<100 <50	0 <30	<0.20
2000	MIOCENO INFERIOR			965				Fm. La Laja	Lutita gris claro y gris verdoso, bentonítica, delatizable y bentonita verde. Conglomerado constituido por fragmentos de caliza arcillosa gris oscuro-negro, café grisáceo, caliza café claro y crema, de bioclastos recristalizado, con fracturas selladas por calcita; trazas de pedernal ámbar, arenisca de grano grueso a conglomerática, lutita bentonita gris verde.	Cuenca (Abanico submarino)	LUT <90 CG <10	0 <12	100 <20	0 <300	<0.75

Profundidad Total 4230 mbmr

RG: Rayos Gamma; RT: Resistividad Verdadera; VCL: Volumen de Arcilla; PHle: Porosidad Efectiva; SW_i: Saturación de Agua Irreducible; K_{int}: Permeabilidad Intrínseca; NETO/TOTAL: Relación entre espesor neto almacenante y espesor total; LUT: Lutita; ARE: Arenisca; CG Conglomerado.

Figura 29 - Características petrofísicas evaluadas: contenido de arcillas, porosidad, saturación de agua y permeabilidad de las secuencias de rocas sedimentarias encontradas en el subsuelo.

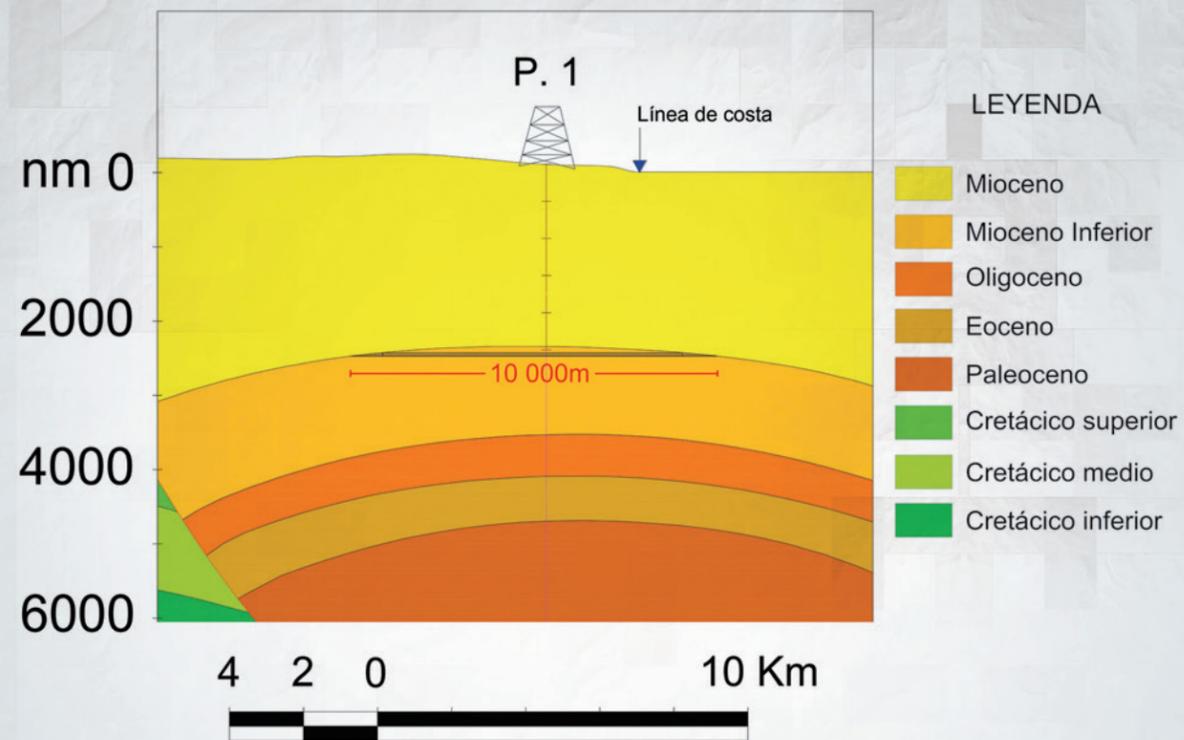


Figura 30 - Sección esquemática donde se propone un sector favorable para el almacenamiento de CO₂ en una secuencia de rocas terrígenas del periodo Mioceno Inferior, las cuales están cubiertas, a su vez, por otra secuencia de rocas del periodo Mioceno que sirven como un sello que impediría la salida del CO₂ a la superficie.

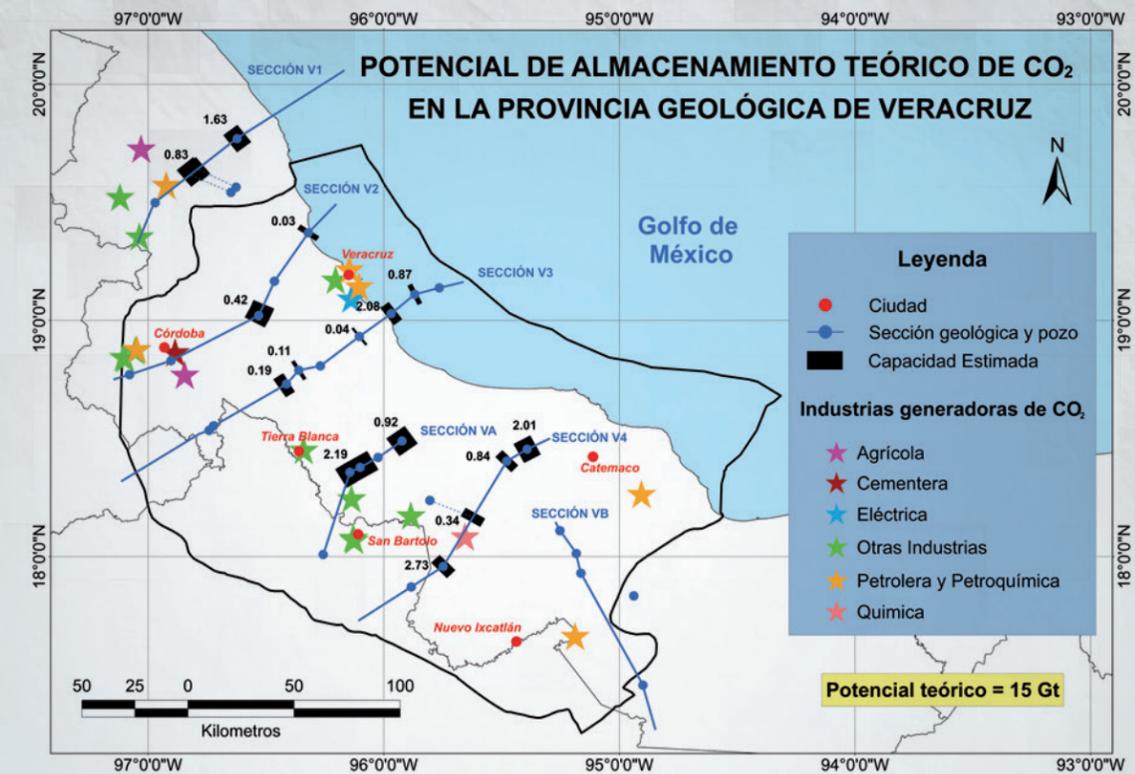


Figura 31 - Localización de sectores propuestos para la Provincia geológica de Veracruz (cuadros negros) y su relación con la ubicación de fuentes emisoras de CO₂ antropogénico.

De las once provincias geológicas delimitadas, en nueve de ellas se han realizado cálculos teóricos sobre su potencial de almacenamiento de CO₂. A partir de dichos cálculos y evaluaciones se han obtenido 111 sectores con posibilidades de almacenar CO₂ en acuíferos salinos profundos. Los sectores evaluados indican un potencial teórico de almacenamiento de aproximadamente 100 Gigatoneladas de CO₂ (figura 32). Si, por parte del sector eléctrico, se mantuviera constante la emisión anual de CO₂ antropogénico habría capacidad de almacenarlo durante los próximos 500 años.

Estimación de la capacidad teórica de almacenamiento de CO ₂ para acuíferos salinos profundos en México		
Provincia	Potencial de almacenamiento teórico de CO ₂ (Gigatoneladas)	Sectores
Chihuahua	<1	5
Coahuila	13	12
Central	<1	1
Burgos	17	31
Tampico-Misantla	9	12
Veracruz	15	21
Sureste	24	17
Yucatán	14	7
Chiapas	6	5
Total	100	111

Figura 32 - Cantidad de CO₂ potencialmente almacenable en acuíferos salinos para las nueve provincias geológicas analizadas, así como el número de sectores propuestos en cada una de ellas.

El presente Atlas ha sido conformado a partir de información disponible públicamente sobre las diferentes disciplinas tratadas dentro de la política energética mexicana. Se trata de un primer intento de poner a disposición del público información sobre las perspectivas e importancia del bióxido de carbono antropogénico y de sus efectos en los ámbitos político, económico, social y ambiental de México. En este contexto, cabe señalar enfáticamente, la necesidad de actualizar constantemente la información debido a que todavía hace falta realizar en detalle numerosos estudios de tipo energético, legal, geológico, ambiental y tecnológico. Dichos estudios permitirán incrementar los alcances de sustentabilidad del país en un futuro cercano. También, y como parte de la “Estrategia nacional de energía en materia de captura, uso y almacenamiento de CO₂” incidirán en las políticas de Cambio Climático Global. De ahí que la continuidad y la actualización del Atlas se convierten en acciones clave para fomentar el desarrollo energético de México en los próximos años.

Por el momento, se ha dado mayor énfasis a los aspectos tecnológicos del almacenamiento geológico del CO₂, y se aportan cifras teóricas sobre el registro y fuentes de emisión, capacidad de almacenamiento en acuíferos salinos profundos, y se proponen regiones geográficas, todas las cuales serán modificadas a partir del resultado de los esfuerzos interinstitucionales, actualización de base de datos, y estudios geológicos detallados tanto de la superficie como del subsuelo mexicano. Con ello se pretende lograr una mejora continua en el aprovechamiento energético del país.



- (1), (2), (11) SENER, Balance Nacional de Energía 2010.
- (3), (4) SENER (2011), Prospectiva del sector eléctrico 2011-2025.
- (5) Agencia Internacional de Energía, A Policy Strategy for Carbon Capture and Storage, Enero 2012.
- (6) La producción o el consumo de un actor económico tiene impactos sobre otros sin que ello sea adecuadamente reflejado, estas pueden ser positivas o negativas.
- (7) Son los bienes cuyo consumo no puede ser restringido a los actores económicos; además, la cantidad de consumidores que en efecto accedan no tiene ningún impacto en el consumo que ellos hagan del bien.
- (8) Un actor económico posee más información, o sencillamente la información no es suficiente para productores y consumidores, de modo que los intercambios en los mercados no reflejan la mejor asignación posible de los recursos.
- (9) Debido a que actores económicos dependen de otros actores para llevar sus productos al mercado, la falta de coordinación y planeación adecuada puede causar menor oferta de capacidad de la necesaria.
- (10) AIE, World Energy Outlook 2009.
- (12) IPCC, Climate Change 2007. The Physical Science Basis, 2007.
- (13) Participación de México en el Foro de Davos, Suiza en Enero de 2010.
- (14) Agencia Internacional de Energía. Energy Technology Perspectives , 2010.
- (15), (16) Agencia Internacional de Energía. Technology RoadMap CCS. 2010.
- (17) Agencia Internacional de Energía. Energy Technology Analysys. CCS. A key carbon abatement option. 2008.
- (18) Climate Analysis Indicator Tool (World Resources Institute).
- (19) Elaboración propia con datos del Climate Analysis Indicator Tool (World Resources Institute) 2005.
- (20) La ciencia del Cambio climático,1995. Resumen para Gobierno y Resumen Técnico de Grupo de Trabajo: UNFCCC.
- (21), (22) Elaboración propia con datos de la CMNUCC 2010.
- (23), (24), (25) Elaboración propia con datos del RETC 2010.
- (26) Solomon, S. Carbon Dioxide Storage: Geological Security and Environmental Issues – a case study on the Sleipner Gas field in Norway. Noruega. 2007.
- (27), (45) Bachu, S., D. Bonijoly, et. al. CO₂ storage capacity estimation: methodology and gaps. Greenhouse Gas Control. Canadá. 2007.
- (28) Panel Intergubernamental para el cambio Climático. Informe especial, La captación y el almacenamiento de dióxido de carbono. Reporte Técnico. ONU. USA.2005.
- (29) Materson Philip M., Moore A. Patricia. From EOR to CCS: The Evolving Legal and Regulatory Framework for Carbon Capture and Storage. Energy Law Journal. USA. 2008.
- (30) Vello A. Kuuskraa. Maximazing Oil Recovery Efficiency and Sequestration of CO₂ with Next Generation CO₂ –EOR Technology. Advanced Resources International. USA. 2009.
- (31), (32) Estrategia Nacional de Energía. SENER. 2011..
- (33), (34) Modificado de Corona Esquivel Rodolfo, Trilla Jordi, Benavidez Muñoz María Elena, Sánchez Piedad Noé, Ferrusquía Villafranca Ismael. Geología, estructura y composición de los principales yacimientos de carbón mineral en México. Sociedad Geológica Mexicana. Tomo LVIII, núm. 1 México.2006.
- (35) Partes por millón de sólidos totales disueltos.
- (36) Centeno García Elena. Revista Mexicana de las Ciencias Geológicas. Vol. 25. SGM. México. 2009.
- (37) Dávalos Álvarez Óscar G. Evolución Tectónica Cenozoica de la Porción Norte de la Falla de Oaxaca. UNAM. 2006.
- (38) Vera Ocampo Miguel. Apuntes de Petrología Sedimentaria UNAM. México. 2011.
- (39) <http://www.geología.uson/academicos/amortijo/detríticas.htm>.
- (40) Agencia Internacional de Energía. CO₂ Captura and Storage. A key carbon abatement option. OCDE. Francia. 2008. After Bradshaw and Dance, 2004.
- (41) Agencia Internacional de Energía. Perspectivas Tecnológicas de Energía. Escenarios y Estrategias al 2050. Francia. 2010.
- (42), (46) Dávila Serrano Moisés. Viabilidad Técnica y Ambiental para el Almacenamiento Geológico de CO₂ en México. Instituto Politécnico Nacional. México. 2011.
- (43) University of Edinburg. Health fears over CO₂ storage are unfounded. Carbon and Capture Journal.Issue 23. U.K. Sept/Oct 2011.
- (44) Cooperative Research Centre for Greenhouse Gas Technologies. Safe Storage and Effective Monitoring of CO₂ in Depleted Gas Fields. National Academy of Sciences . USA. 2011.
- (47), (48) Dávila M., Jiménez O., Arévalo V., Castro R. and Stanley J. A preliminary selection of regions in Mexico with potential for geological carbon storage. International Journal of Physical Science, v.5, n.5, p.408-414, 2010.
- (49) Jiménez O., Dávila M., Arévalo V., Medina E. and Castro R. Geological Carbon Dioxide Storage in Mexico: a first approximation. In, Imran Ahmad Dar and Mithas Ahmad Dar (Editors): Earth and Environmental Sciences, InTech, 2011.

Acuífero Salino: Depósitos subterráneos de agua salada.

Biocombustibles: Combustibles de origen biológico obtenido de manera renovable a partir de restos orgánicos.

Bióxido de Carbono: (CO₂) Gas de efecto invernadero.

CCG: Cambio Climático Global.

CCS: Captura y almacenamiento de CO₂.

CCUS: Tecnologías de captura, uso y almacenamiento de CO₂.

CICC: Comisión Intersecretarial de Cambio Climático.

CMNUCC: Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático.

COA: Cédula de Operación Anual.

Combustibles fósiles: Combustibles derivados del petróleo; principalmente: carbón, petróleo y gas natural.

Combustión Antropogénica: Combustión creada por el hombre.

Combustóleo: Residuo pesado de la refinación del petróleo pudiéndose usar como combustible.

Coque de carbón: Residuo de refinación de petróleo.

ENACC: Estrategia Nacional de Cambio Climático.

Gas de efecto invernadero (GEI): Gases que producen el Efecto Invernadero (vapor de agua – H₂O, dióxido de carbono – CO₂), están presentes en la atmósfera, algunos de ellos, en forma natural.

Gas grisú: Mezcla de varios gases provenientes de minas componiéndose principalmente de metano.

Hidrocarburos: son compuestos orgánicos formados únicamente por átomos de carbono e hidrógeno.

INEGEI: Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero.

Mt: Millón de tonelada

OMi: Oportunidades de Mitigación

PECC: Programa Especial de Cambio Climático.

PICC: Panel de Intergubernamental sobre el Cambio Climático.

PND: Plan Nacional de Desarrollo.

Recuperación Mejorada de Petróleo: ENHANCED OIL RECOVERY (EOR por sus siglas en inglés)

Reservorios: Yacimiento.

RETC: Registro de emisiones y transferencia de contaminantes.

SEMARNAT: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

TonCO₂e: Toneladas de bióxido de carbono equivalente.



Todas las fotografías incluidas en el presente Atlas fueron proporcionadas por La Secretaría de Energía, a excepción de las siguientes:

Introducción: Barranca del Cobre, Chihuahua, México. RHA-733-4756, PhotoStock/AGE Fotostock.

Página 1: Planta Eléctrica en México. MO2-667835, PhotoStock/AGE Fotostock.

Página 6: Volcán Citlaltepetl o Pico de Orizaba, Veracruz © Christian Kober/AGE Fotostock/PhotoStock.

Página 11: Peck, W.D., Buckley, T.D., Battle E.P., and Grove, M.M., compilers and creators, 2012, Plains CO2 Reduction (PCOR) Partnership atlas (4th ed.): Prepared for the U.S. Department of Energy National Energy Technology Laboratory and the PCOR Partnership, Grand Forks, North Dakota, Energy & Environmental Research Center, 124 p.

El Bióxido de carbono en México: Cascada de Tamul, San Luis Potosí. GLM-438108564. PhotoStock/GlowImages.

Página 14: Toma satelital de Centroamérica. UIG-913-03-PO01016. PhotoStock/AGE Fotostock.

Página 16: Tanque de almacenaje; México. FOH-u19699584. PhotoStock/Fotosearch.

Página 17: Cinta transportadora de metal. MO2-470937. PhotoStock/AGE Fotostock

Almacenamiento Geológico: Sierra La Laguna en Baja California Sur. H44-10898058. PhotoStock/Prisma.

Página 21: Planta Petroquímica en el Golfo de México. FOH-U27866202. PhotoStock/Fotosearch.

Página 22: Planta Eléctrica. MO2-667832. PhotoStock/AGE Fotostock

Capacidades de almacenamiento geológico de CO2 en México: Tubería en Central Eléctrica México. MO2-667872. PhotoStock/AGE Fotostock.

Página 32: Sierra Madre Oriental. U01-559538. PhotoStock/AGE Fotostock.

Página 33: Desierto e Baja California, México. XD3-1304733. PhotoStock/AGE Fotostock.

Se le hace un especial reconocimiento a todo el equipo que contribuyó en la realización de este Atlas: Por la Secretaría de Energía; Leonardo Beltrán, Cesar Contreras y José María Valenzuela, por la Comisión Federal de Electricidad; Moisés Dávila, Oscar Jiménez, Vicente Arévalo, Hugo Leyva, Erik Medina, Reyna Castro, Oscar Cuevas, Héctor Ortega, Tanya Orozco y Fernando Pérez.

SECRETARÍA DE ENERGÍA

Secretario:

Jordy Herrera Flores

Subsecretaria de Planeación Energética y Desarrollo:

Verónica Irastorza Trejo

Director General de Información y Estudios Energéticos:

Leonardo Beltrán Rodríguez

COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD

Director General:

Antonio Vivanco Casamadrid

Director de Proyectos de Inversión Financiada:

Eugenio Laris Alanis

Subdirector de Proyectos y Construcción:

Benjamín Granados Domínguez

Gerente de Estudios de Ingeniería Civil:

Gustavo Arvizu Lara

Subgerente de Estudios Geológicos:

Moisés Dávila Serrano