



ATLAS

DE ALMACENAMIENTO
GEOLÓGICO DE CO₂
MÉXICO



GOBIERNO
FEDERAL

SENER





ATLAS DE ALMACENAMIENTO GEOLÓGICO DE CO₂, MÉXICO

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

Prólogo

Una de las grandes preocupaciones de nuestro tiempo es la preservación ambiental. Existen razones de peso para que así sea. A partir de los descubrimientos en torno al cambio climático, ha surgido un consenso en torno a la urgencia de reducir las emisiones a la atmósfera de sustancias reconocidas como precursoras del calentamiento global, llamadas “gases de efecto invernadero”.

El bióxido de carbono (CO₂) es el gas de efecto invernadero más abundante en la atmósfera, debido tanto a condiciones naturales como a las actividades humanas. Desde el surgimiento de la revolución industrial, las sociedades modernas queman combustibles fósiles a gran escala para realizar diversas actividades productivas, entre las cuales se encuentra la generación de electricidad. Aunque en todo el mundo se realizan esfuerzos para desarrollar y aprovechar fuentes primarias de energía renovables, es un hecho que todavía existe una fuerte dependencia hacia los hidrocarburos.

En México, el Gobierno del Lic. Felipe Calderón ha puesto en primer plano el impulso a las energías alternativas, convirtiéndose en una prioridad de la Comisión Federal de Electricidad, que las ha incluido como uno de sus cinco pilares estratégicos. Los avances han sido notables, destacando el establecimiento de un programa eólico gracias al cual la electricidad generada por viento ya es una realidad dentro de un portafolio de fuentes primarias equilibrado y diversificado, que aprovecha opciones como el agua, el gas natural y la geotermia, al tiempo que incorpora gradualmente tecnologías novedosas como la biomasa y las mareas.

Las energías alternativas están cada día más desarrolladas y su crecimiento permite ser optimistas. Sin embargo, aún no están disponibles en cantidad suficiente para sustituir de inmediato a los hidrocarburos, lo cual se dará paulatinamente a mediano y largo plazo. Eso quiere decir que se tiene que convivir con los hidrocarburos durante un tiempo considerable, por lo que mitigar sus efectos es una prioridad del sector energético. La más prometedora de las opciones es la captura de carbono, consistente en recuperar las emisiones de esas partículas, producto de la combustión de hidrocarburos, justo antes de que se esparzan por la atmósfera. El objetivo es confinarlas en la tierra, como una manera de retrasar por muchos años su incremento y mantener un equilibrio que reduzca, o cuando menos retrase, la sobre abundancia de carbono en la biósfera.

Por tal motivo, 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 fijas como centrales de generación eléctrica, refinerías, industria siderúrgica y cementera, entre otras, mientras se prescinde del carbono como el energético más importante.

La captura de CO₂ está en marcha desde los años ochenta del siglo anterior. Actualmente, hay más de un centenar de instalaciones en el mundo y se espera que para el año 2030 haya más de 800 y más de 3,500 para el año 2050, constituyendo la solución que más ayude a la mitigación de gases de efecto invernadero. La experiencia mexicana en la captura de CO₂ data de agosto de 2009, cuando en la Cumbre de Líderes de Norteamérica, celebrada en Guadalajara, Jalisco, los Presidentes de México y Estados Unidos y el Primer Ministro de Canadá se comprometieron a desarrollar dicha tecnología como fórmula para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero en la región. La importancia de esta herramienta la ha llevado a formar parte de la Estrategia Nacional de Energía.

Ese contexto, el sector energético mexicano se complace en presentar este “Atlas de Almacenamiento Geológico de CO₂, México”, que expone sus principios básicos, buscando que sectores más amplios de la sociedad mexicana conozcan esta importante opción que el país adopta en aras de continuar su desarrollo de manera sostenible.

Mtro. Antonio Vivanco Casamadrid
Director General
Comisión Federal de Electricidad

CONTENIDO

Introducción

- 2 Economía de la energía en México
- 6 Sustentabilidad y uso eficiente de los recursos
- 8 La ruta tecnológica del almacenamiento geológico de CO₂ en México
- 10 Captura, uso y almacenamiento de CO₂ en la política energética mexicana
- 12 La tecnología de almacenamiento geológico de CO₂

El Bióxido de Carbono en México

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

Almacenamiento Geológico

- 21 Almacenamiento geológico de CO₂
- 23 Almacenamiento de CO₂ asociado a yacimientos de hidrocarburos

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

Capacidades de Almacenamiento Geológico de CO₂ en México

- 32 Potencial de almacenamiento geológico de CO₂ en México
- 36 Capacidad teórica de almacenamiento de CO₂ en acuíferos salinos Profundos
- 37 Comentarios finales
- 38 Referencias
- 39 Glosario
- 40 Créditos de fotografías e imágenes
- 40 Agradecimientos



INTRODUCCIÓN



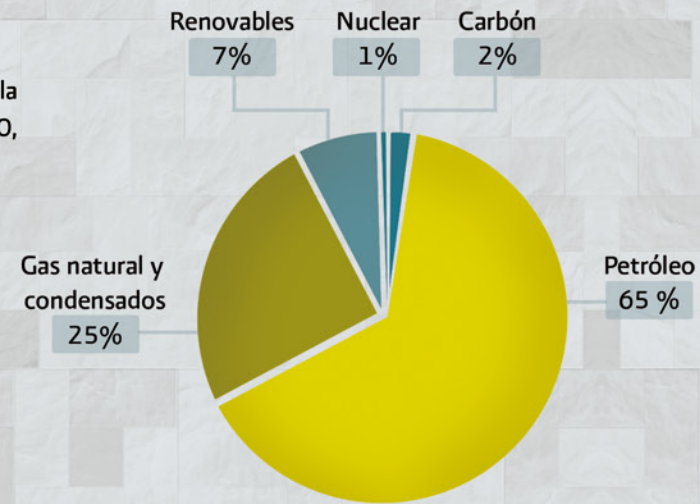
El crecimiento de las empresas, la creación de fuentes de trabajo y las condiciones de vida de las familias, están directamente relacionadas con la capacidad de una economía para ofrecer combustibles y electricidad en condiciones y precios que permitan a las empresas competir con sus similares en otros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

La producción y aprovechamiento de la energía están determinados por un entorno económico y social en transformación, que facilitan o limitan el uso y desarrollo de tecnologías apropiadas, y que inciden en la posibilidad de alcanzar los niveles óptimos de producción 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 el agua, uranio, y fuentes renovables de energía como la geotermia, el viento y el sol.

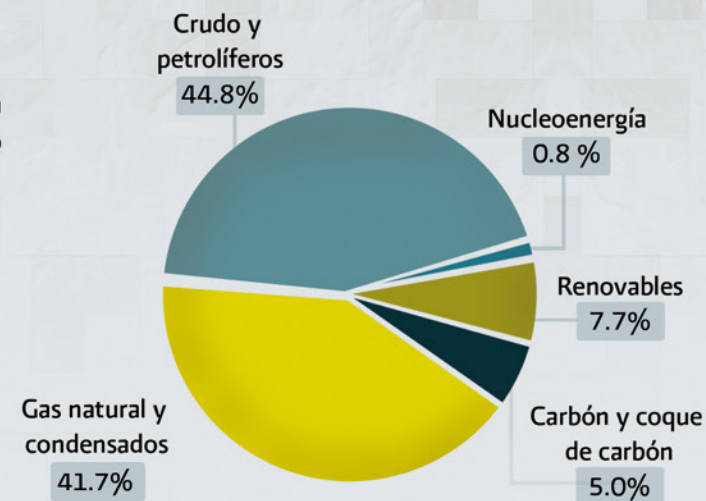


Figura 1 - Estructura de la producción primaria 2010, 9,250.7PJ (1)



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. 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 importante 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 bióxido de carbono (CO₂) prácticamente nulos, como la captura de CO₂. A estas tecnologías se les denomina “nueva generación limpia”. El aumento en el uso del carbón a partir del 2020, se condicionará al empleo de tecnologías de generación limpia, permitiendo aprovechar las reservas minerales sin afectar el desempeño ambiental del sector.

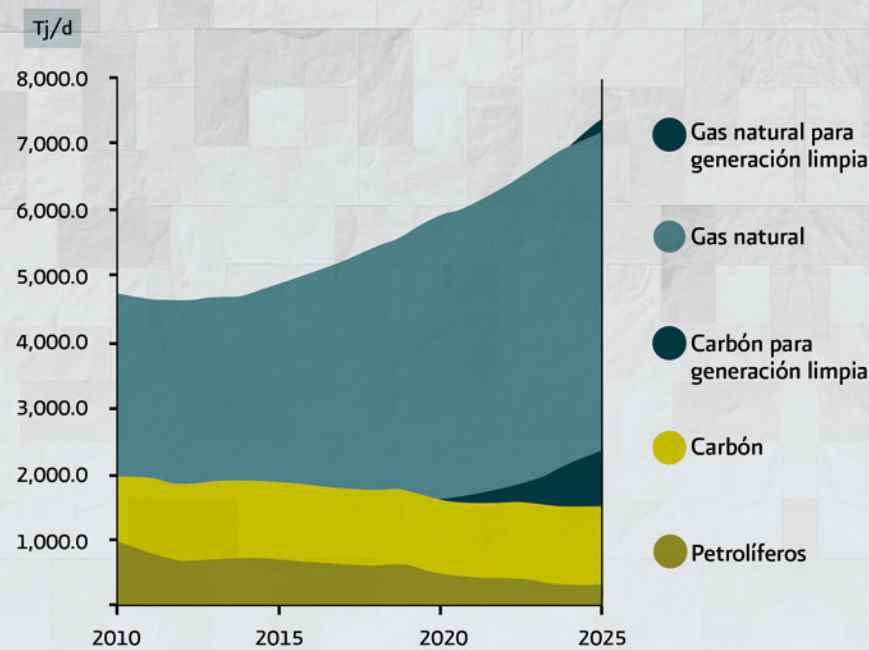


Figura 3 - Prospectiva de la participación de combustibles fósiles en la generación de electricidad (2010-2025) (3)

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)

Debido a las características de la producción y distribución de los energéticos, 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 CO₂ es un gas de efecto invernadero (GEI) que se encuentra naturalmente en la atmósfera, sin embargo 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 de 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% 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, destacando las fuentes estacionarias como la generación de electricidad que contribuyó con 28 %, la industria generadora de energía (extracción, refinación, etc.) con 10 %, y el resto de la industria el 15 % (Figura 4).

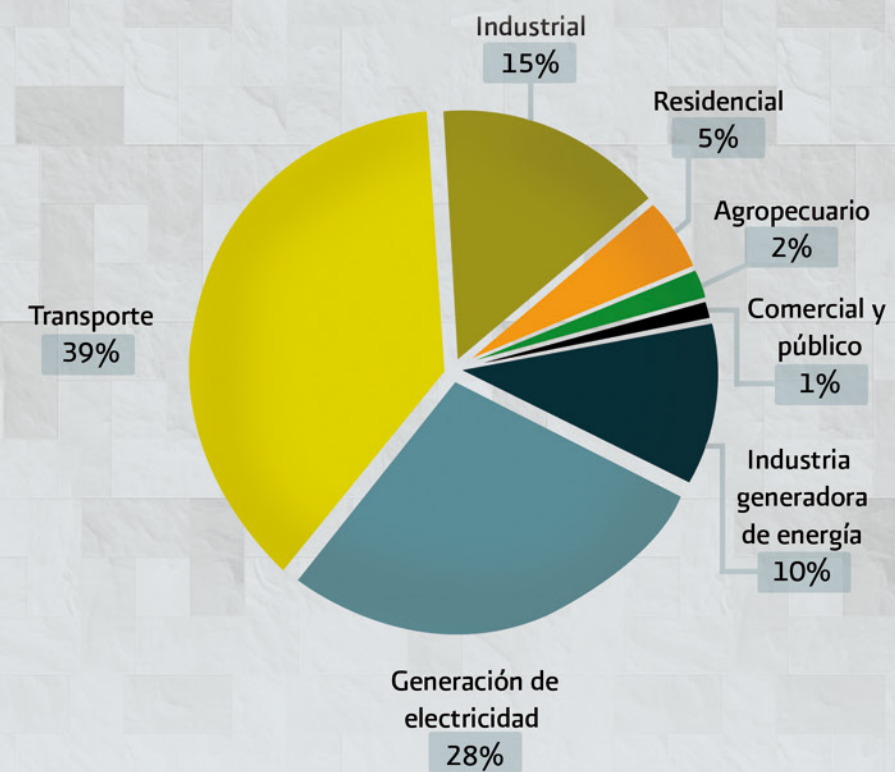
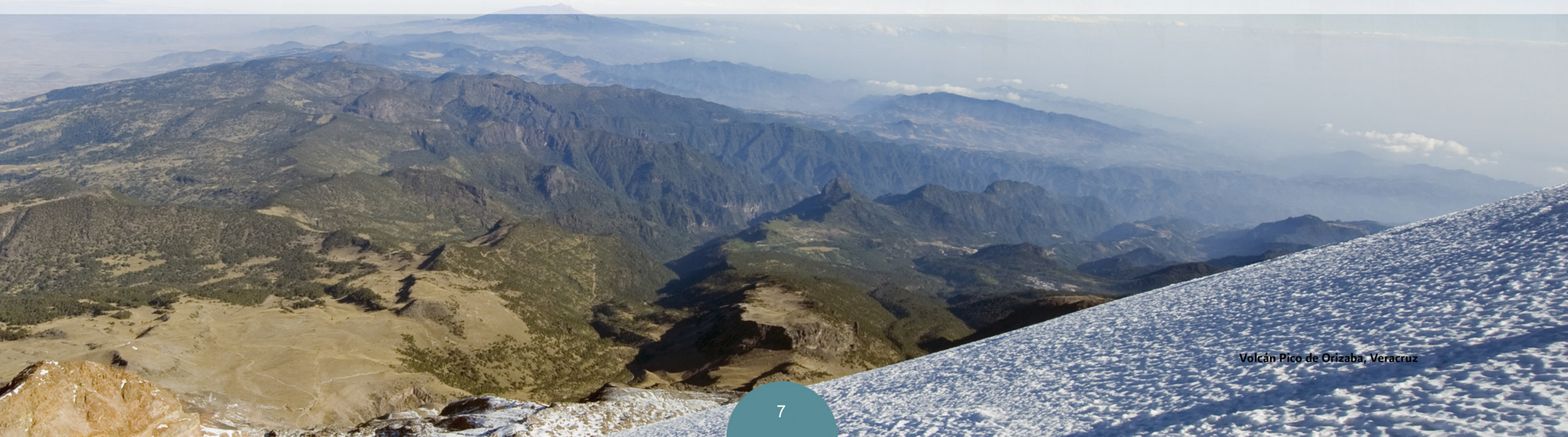


Figura 4 - Estructura de emisiones de CO₂ del consumo energético por sector en 2010 (407.3 Mt de CO₂) (11)

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 exhaustos 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, 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 significa que el sector eléctrico tendría que reducir, por este medio, 20 Mt de CO₂ anualmente, lo cual representa un reto dadas las condiciones de la tecnología en México. Para lo cual es necesario establecer la ruta tecnológica que incluya la evaluación del potencial de almacenamiento de CO₂ y un marco regulatorio que permita desarrollar una planta piloto y un proyecto demostrativo de captura asociado a recuperación mejorada de petróleo. Estos objetivos son parte de la Estrategia Nacional de Energía en Materia de Captura, Uso y Almacenamiento de CO₂ de la cual se desprende el Mapa de Ruta Tecnológica de CCS en México que en forma resumida se esquematiza en la figura 5.

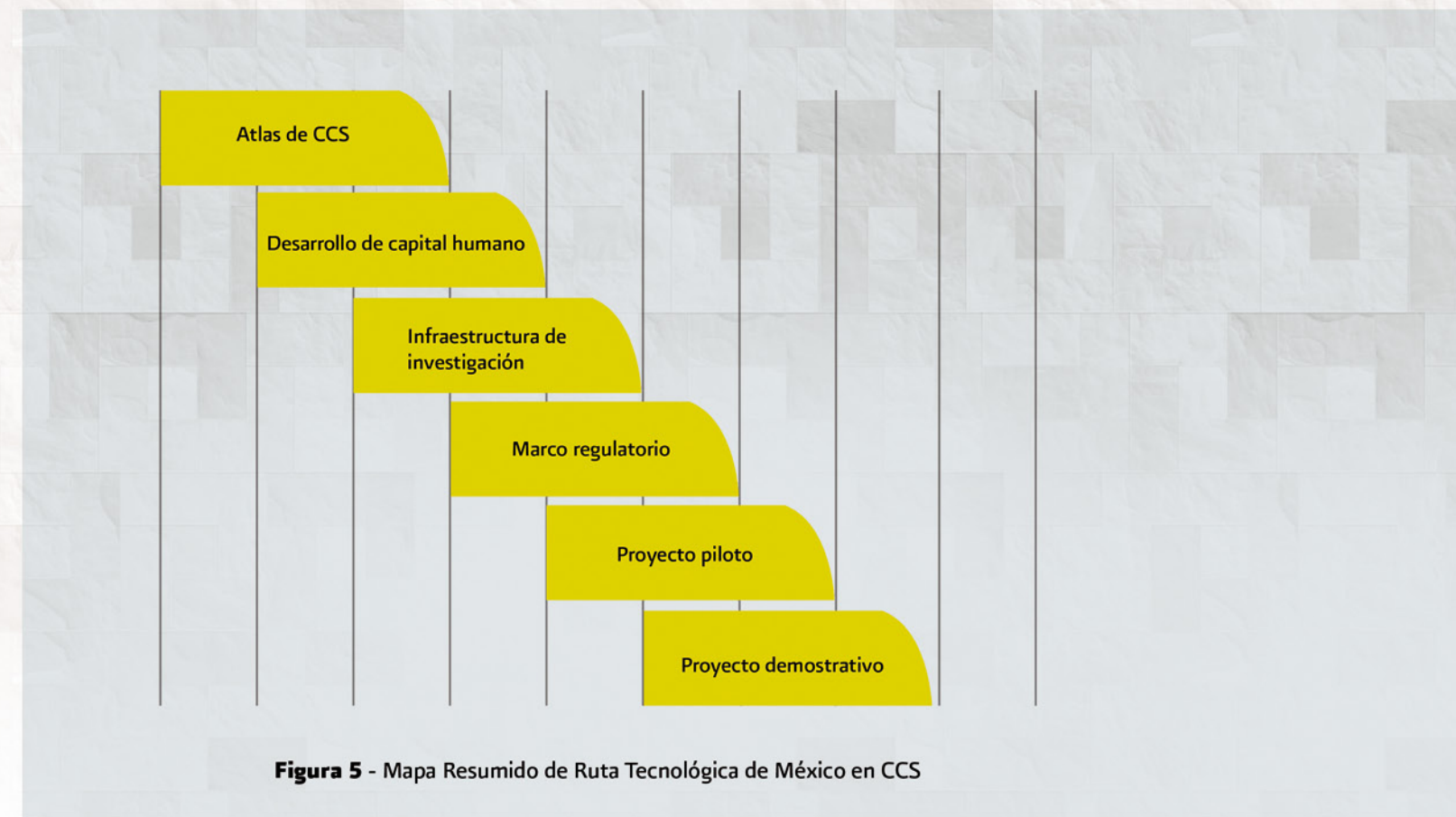
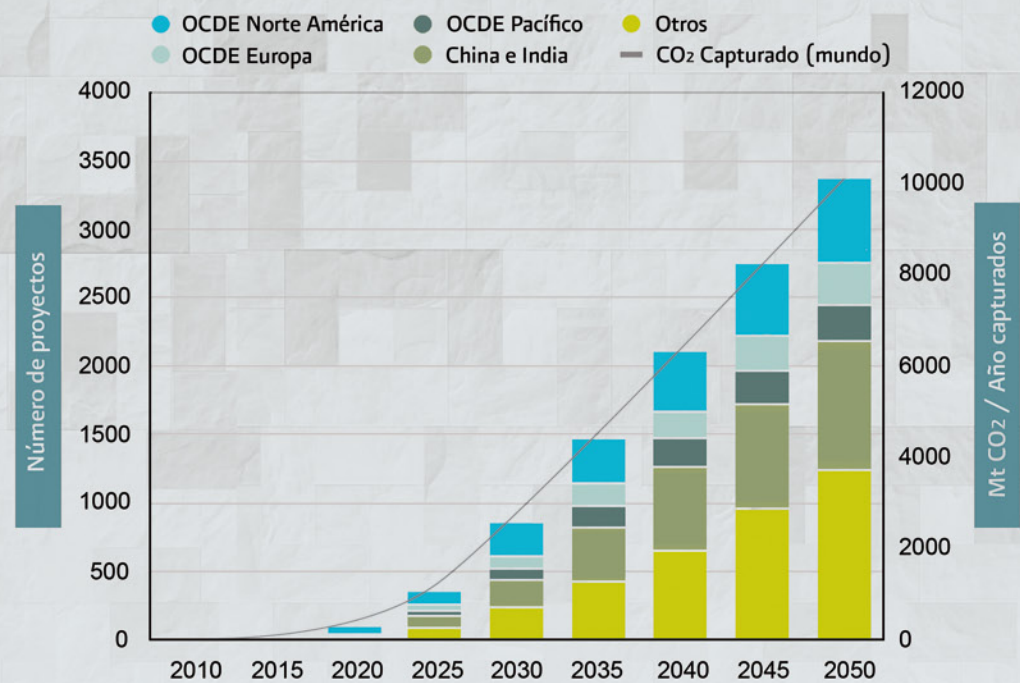


Figura 5 - Mapa Resumido de Ruta Tecnológica de México en CCS



En el mundo actualmente existen sólo 5 proyectos integrados a gran escala que en conjunto permiten el almacenamiento de 5 Mt de CO₂ al año. Además existen planes de una centena de proyectos de similar importancia y en diferentes etapas para entrar en operación hacia el 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, Canada 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 hacia el 2020 y 2050, por región (15).

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 la inyección 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, para fortalecer las capacidades nacionales en esta materia en el sector energético, en el objetivo 2.1.10 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 GEI.

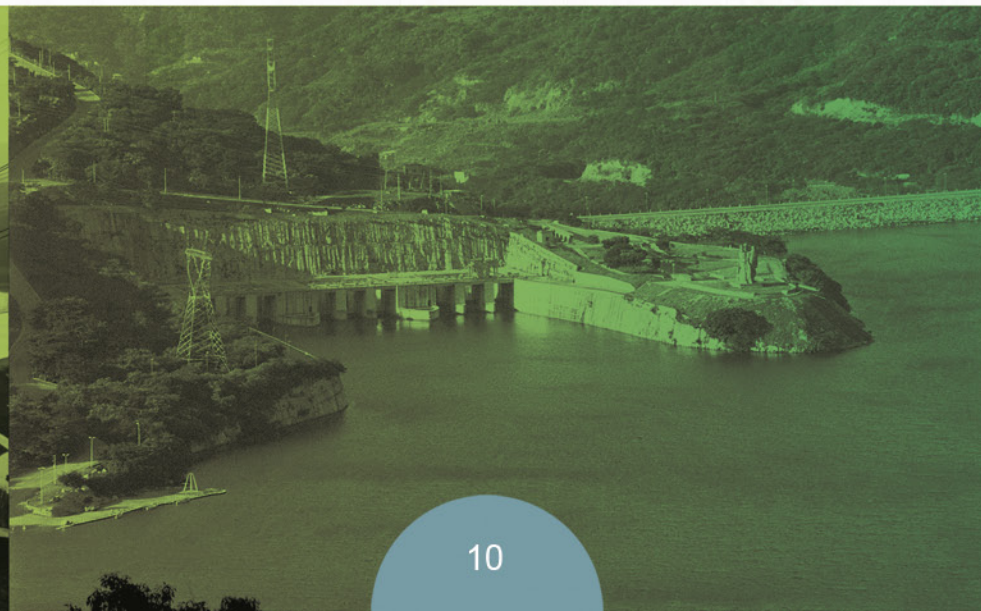
Establecer el marco de referencia y regulatorio para el desarrollo nacional de la captura, transporte, uso y almacenamiento de CO₂.

Elaborar el Atlas de Almacenamiento de CO₂.

Ligar el aprovechamiento de CO₂ a los programas de recuperación de hidrocarburos.

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.



Captura, Uso y Almacenamiento de CO₂ en la Política Energética Mexicana



Central Hidroeléctrica El Cajón

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:

1.- Integrar un procedimiento 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 sistema 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.

2.- 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.

3.- 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 se 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), mediante sus participaciones 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 esta versión de divulgación del Atlas de almacenamiento geológico de 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, 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 formas diferentes al secuestro geológico, a esta modalidad se le ha asignado el término CCS. Las condiciones para que un sitio sea geológicamente adecuado para el almacenamiento por muy largos períodos de tiempo, debe incluir horizontes pétreos permeables y porosos que permitan la inyección del bióxido de carbono. Además el reservorio debe conformar un mecanismo de trampa en el cual se incluya un horizonte impermeable que lo confine e impida la resurgencia del CO₂ 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.

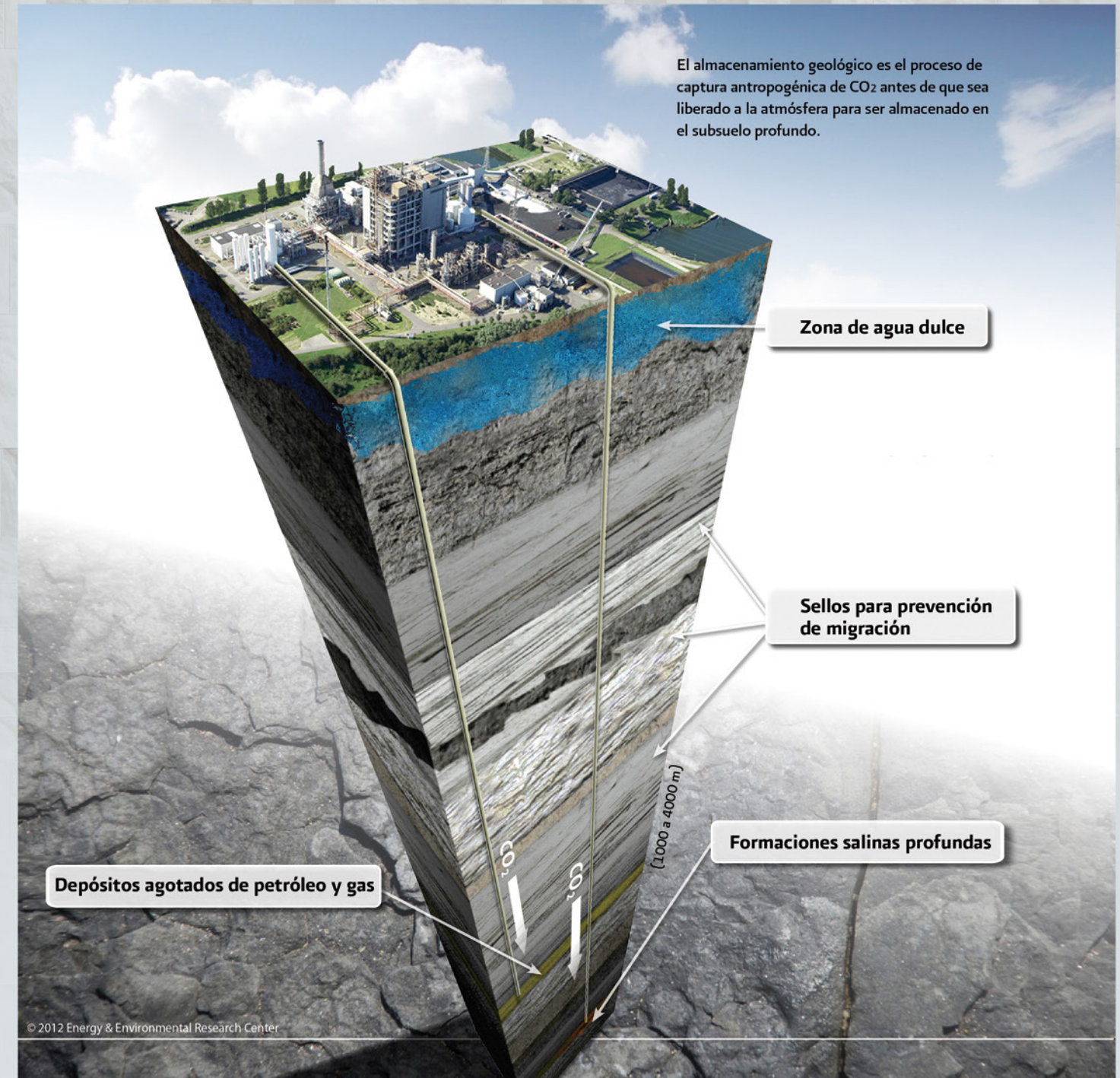


Figura 7 - Almacenamiento geológico de CO₂

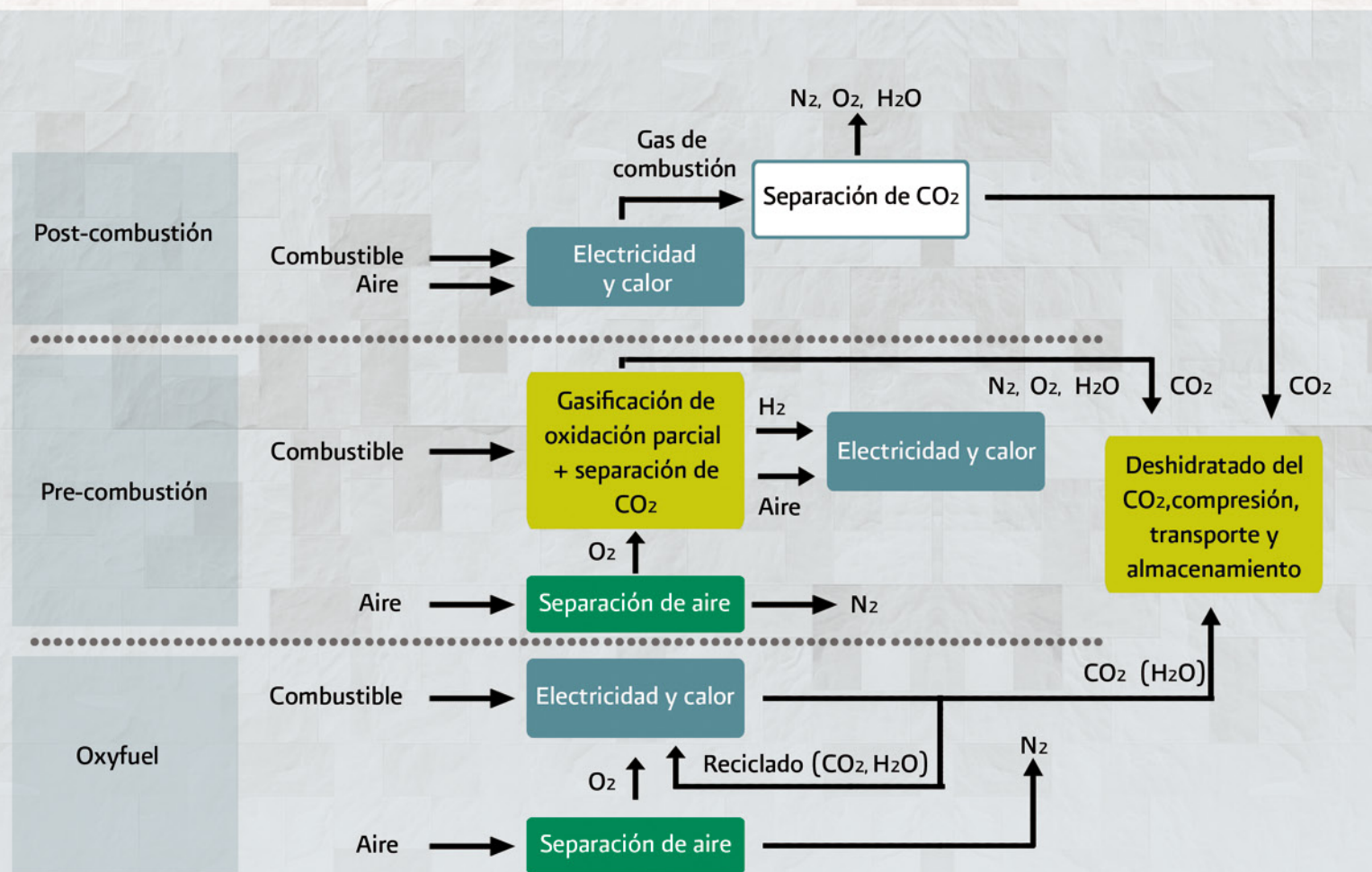


Figura 8 - Técnicas disponibles para la captura y separación del CO₂ (17).

Las tecnologías disponibles más comunes se muestran en la figura 8. La captura consiste en la separación del bióxido de carbono del resto de los gases que resultan de un proceso industrial (generación de electricidad, refinерías, fabricación de hierro y acero, cemento, química, etc.). De las anteriores la más utilizada es la de post-combustión

Una vez separado el CO₂ se comprime y se transporta por gasoductos, pipas o buques hasta el sitio seleccionado en el subsuelo. Posteriormente, se lleva a cabo la inyección del CO₂ hasta alcanzar una formación rocosa de características específicas y ubicación profunda.



**EL BIÓXIDO DE
CARBONO EN
MÉXICO**

México contribuye con el 1.67 % del total de las emisiones anuales de gases de efecto invernadero a nivel mundial (18). Ocupa el undécimo 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.

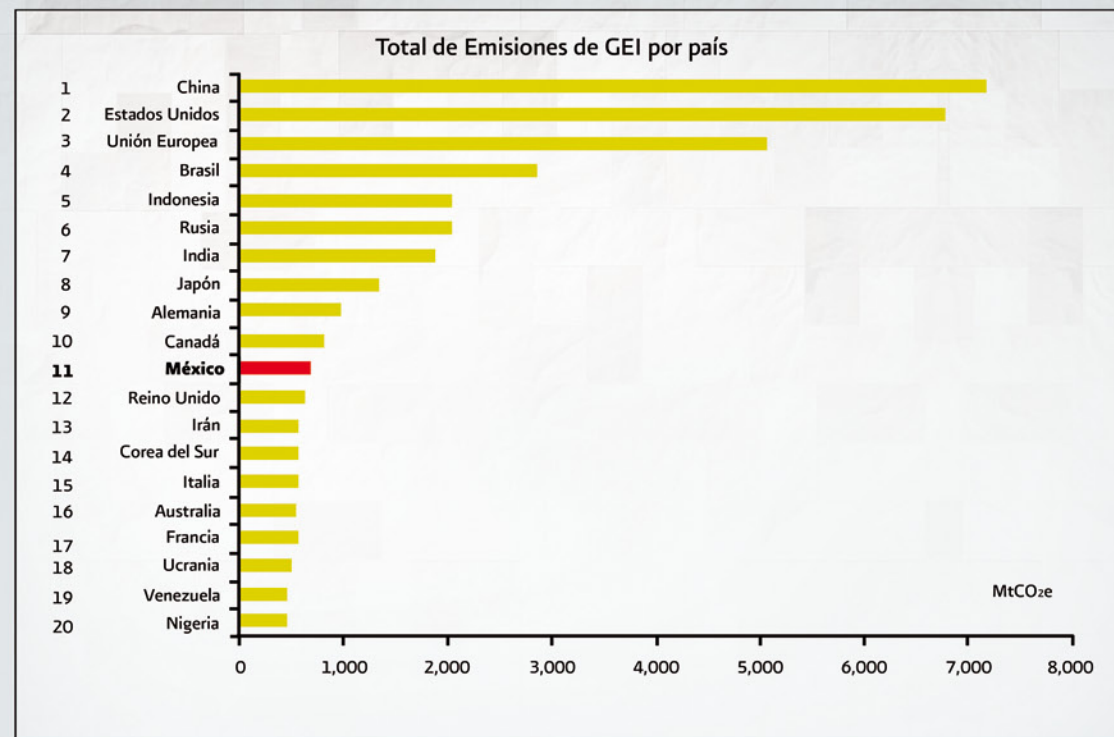


Figura 9 - Principales países con mayor volumen de emisiones anuales de GEI a nivel mundial (19).

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	Hexafluoruro 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 alrededor de 709 millones de toneladas de CO₂e, de las cuales 493 millones de toneladas corresponden a CO₂.

El CO₂ proveniente de fuentes estacionarias es el único que puede ser almacenado geológicamente, por lo tanto es importante diferenciar el origen de las emisiones y conocer su volumen de almacenamiento potencial.

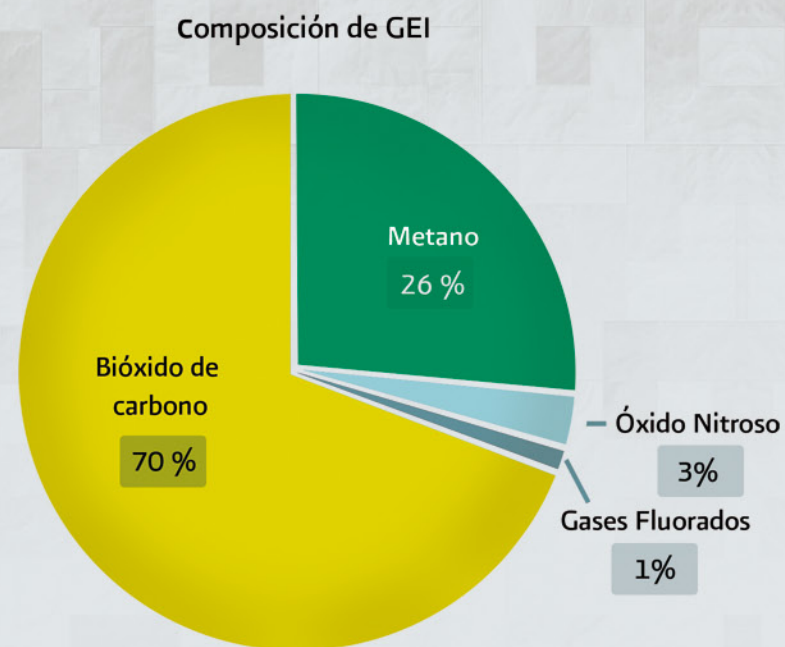


Figura 11 - Emisiones de gases de efecto invernadero por tipo de gas en México (21).

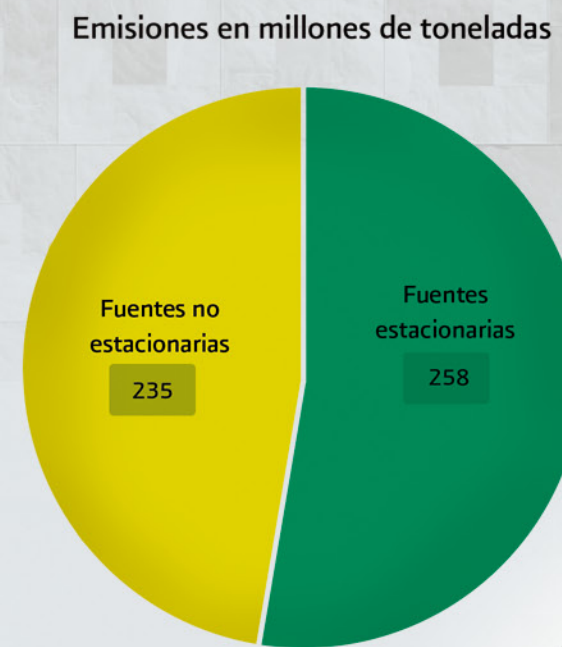


Figura 12 - Emisiones de CO₂ por tipo de fuente en México (22).



Toma satelital de Centroamérica

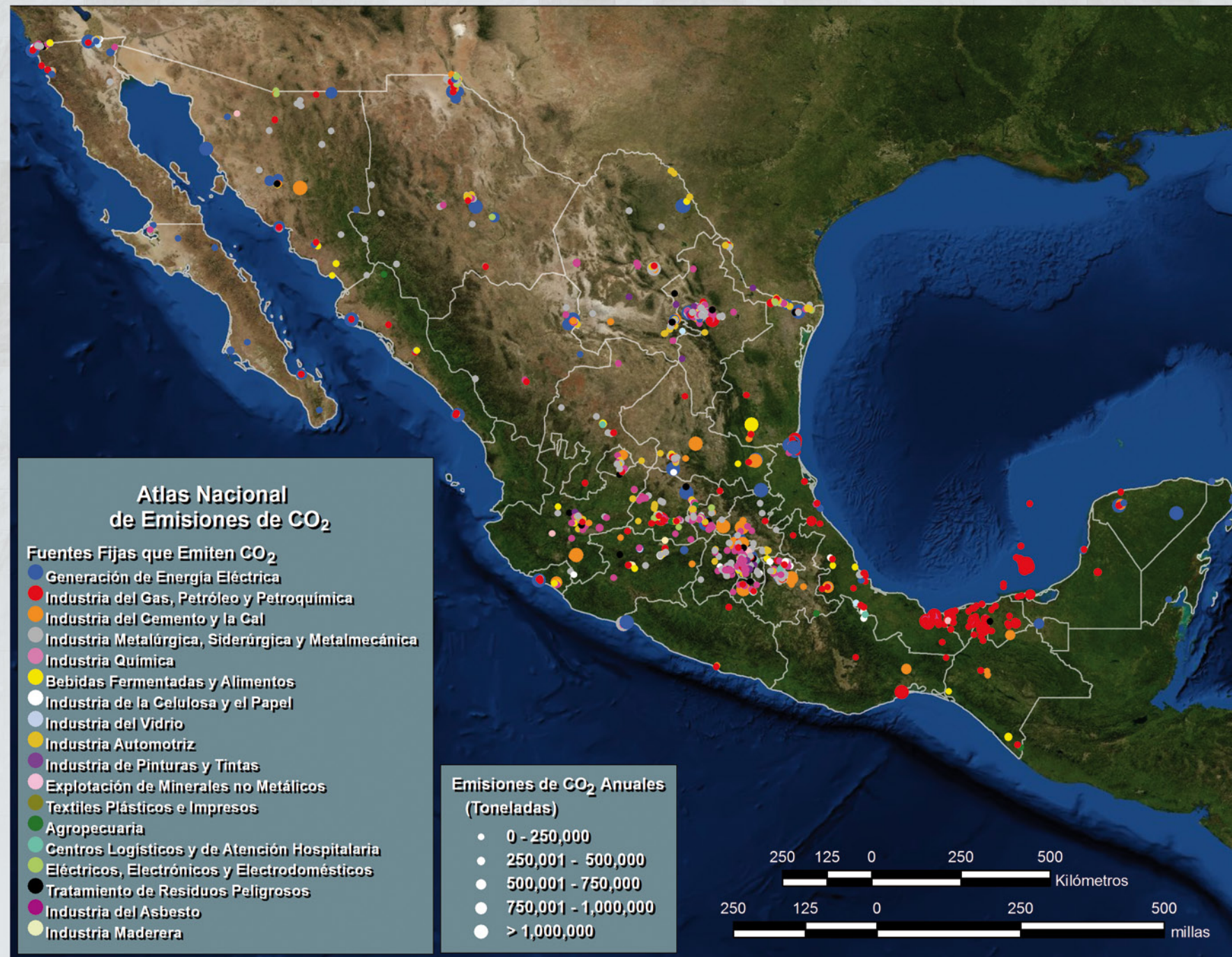


Figura 13 - Ubicación y magnitud relativa de las fuentes estacionarias que emiten CO₂ (23).

Si bien, en la CMNUCC se calculan emisiones provenientes de fuentes estacionarias por un total de 258 millones de toneladas, la información reportada en la base de datos del Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes (RETC) correspondiente al 2010, por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), que está próxima a publicarse, fue procesada y se identificaron los establecimientos con las emisiones más representativas de bióxido de carbono, encontrándose 1936 fuentes estacionarias de los diversos sectores industriales que reportaron la emisión de 207 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 obligas 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 cuatro 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. Dichos sectores son las industrias: 1) generación de energía eléctrica, 2) gas, petróleo y petroquímica, 3) cemento y cal y 4) 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 las principales opciones para la aplicación de las tecnologías de almacenamiento geológico.

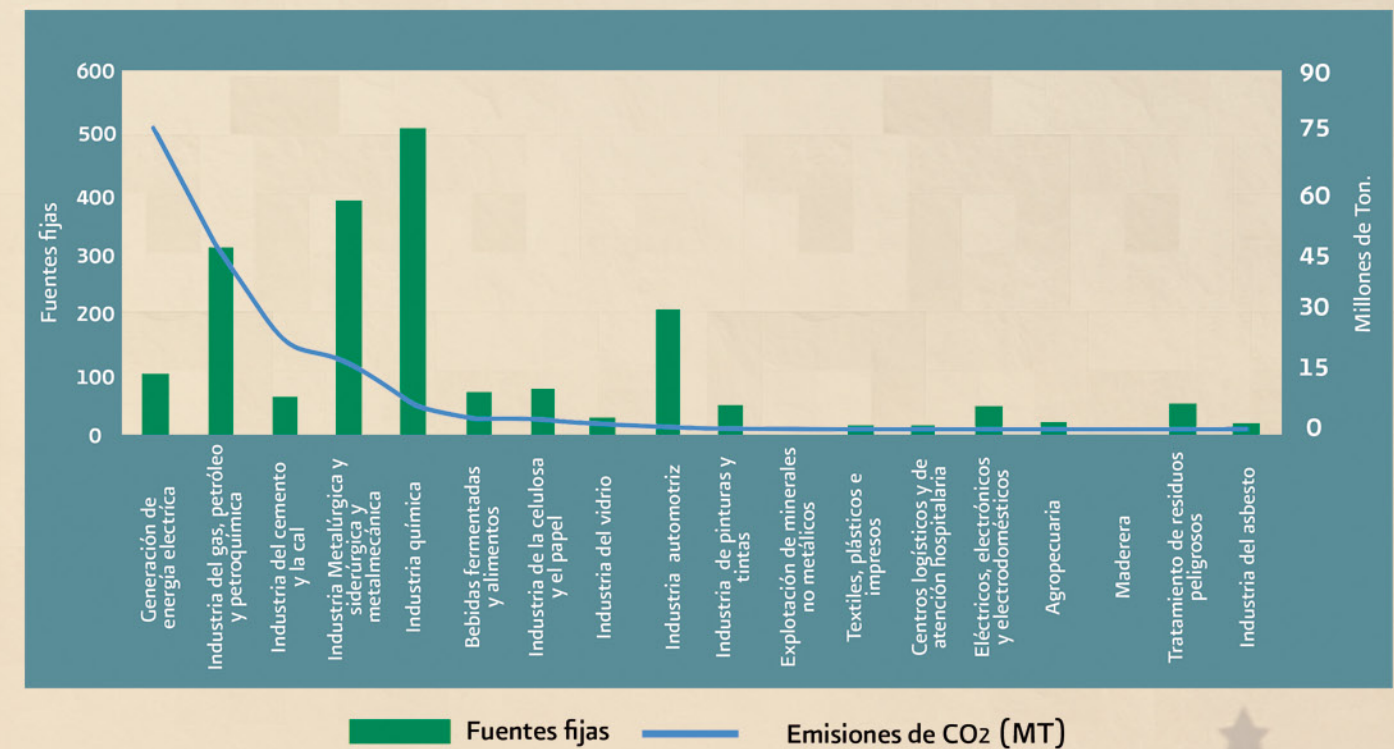
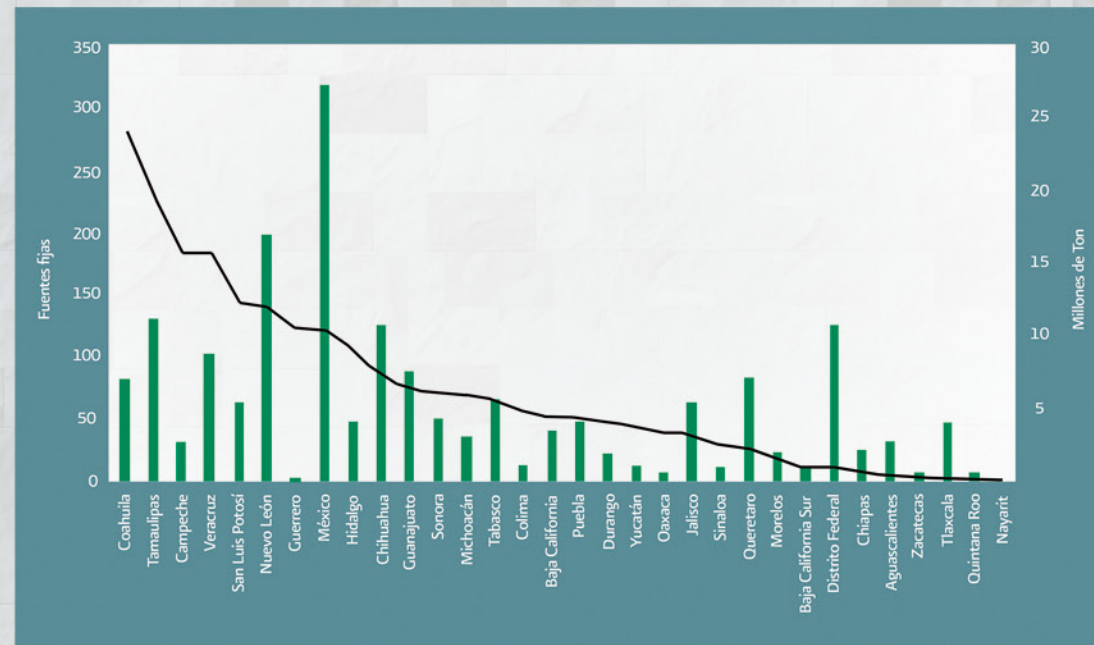


Figura 14 - Asociación de número de fuentes y cantidad de emisiones de CO₂ por sector industrial (24).

Emisiones estacionarias de CO2 por Entidad Federativa



La entidad federativa que mayores emisiones reporta es Coahuila con un total de 24 millones de toneladas de CO2, lo que se explica porque es sede de dos plantas generadoras de energía eléctrica por carbón y una planta siderúrgica.

El segundo lugar lo ocupa Tamaulipas con una aportación del orden de 19 millones, le siguen Campeche y Veracruz, ambas del orden de 15.5 millones de toneladas de CO2 respectivamente.

Debe hacerse notar el hecho de que 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.

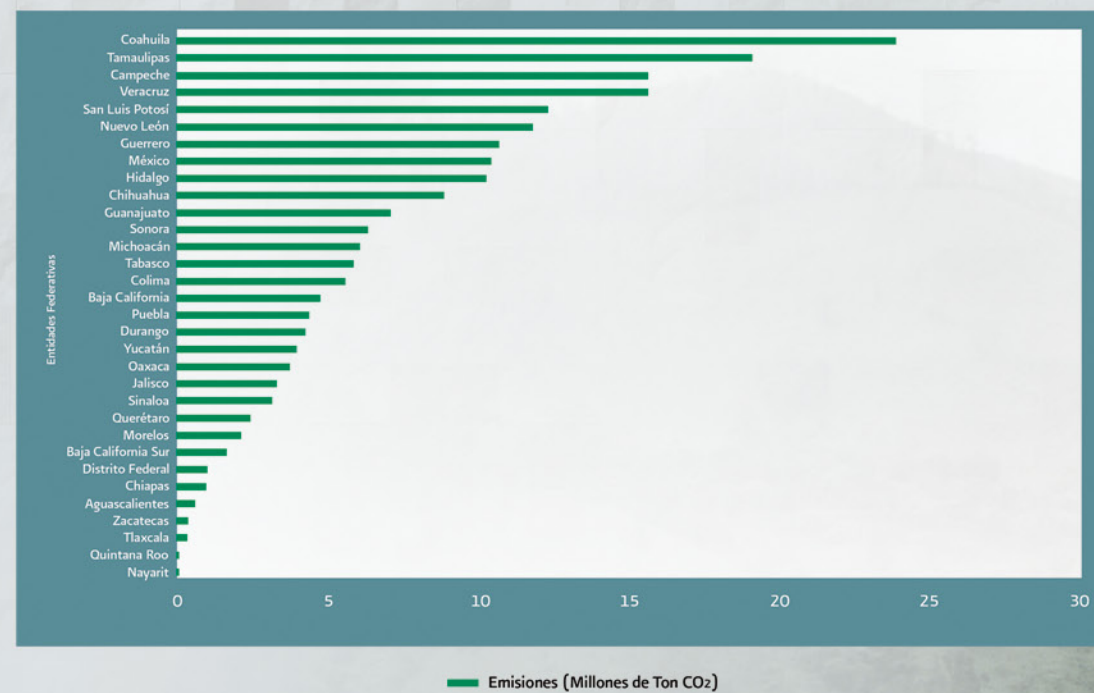
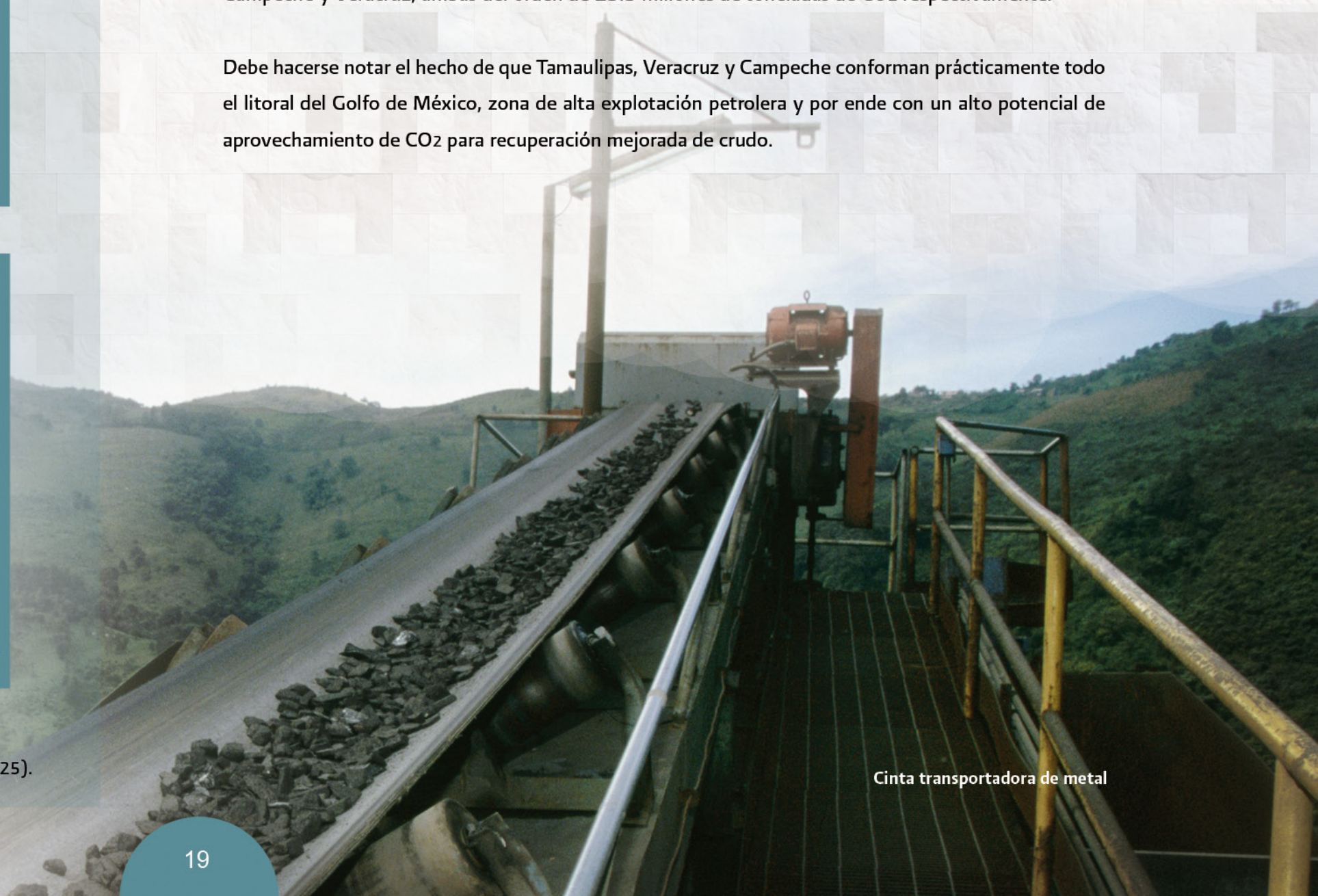


Figura 15 - Asociación de número de fuentes y cantidad de emisiones de CO2 por entidad federativa (25).



Cinta transportadora de metal



**ALMACENAMIENTO
GEOLÓGICO
DE CO₂**

Los reservorios para almacenar CO₂ deben tener una porosidad, permeabilidad y una profundidad adecuadas para retener al compuesto permanentemente. Generalmente se buscan formaciones asociadas con una capa impermeable en la parte superior que impida la fuga de CO₂. El comportamiento de CO₂ varía con respecto a la profundidad, a partir de los 800 metros en adelante se comporta como un líquido, manteniendo su volumen y densidad constantes, como se muestra en la figura 16.

Una vez inyectado el bióxido de carbono es retenido por diferentes procesos. El primero depende de la trampa geológica, el segundo de la retención residual que consiste en la asimilación de burbujas de CO₂ en el fluido pre existente, en el tercero se lleva a cabo una disolución formándose una mezcla homogénea y en el último se produce una reacción química donde el CO₂ se combina y forma un mineral. En la figura 17 se representan estos fenómenos y la escala del tiempo en que teóricamente se presentarían.

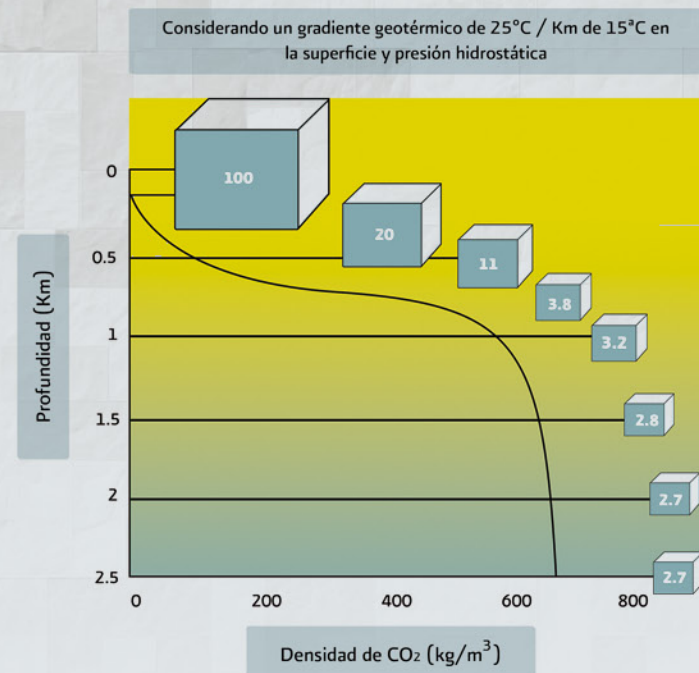


Figura 16 - Densidad y volumen relativo del CO₂ a diferentes profundidades (26).

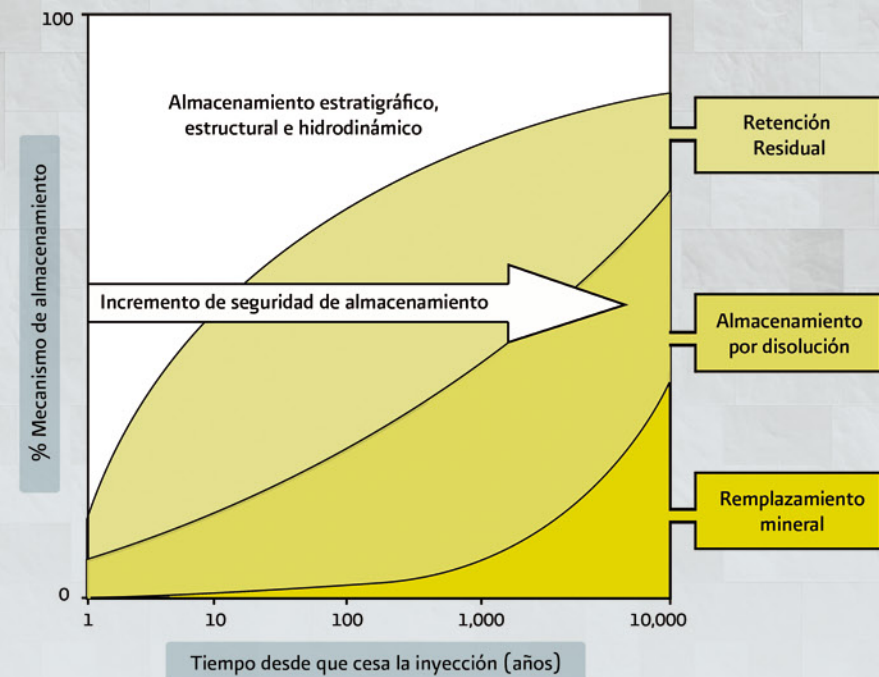


Figura 17 - Procesos que tienen lugar en las diferentes etapas de retención (27).

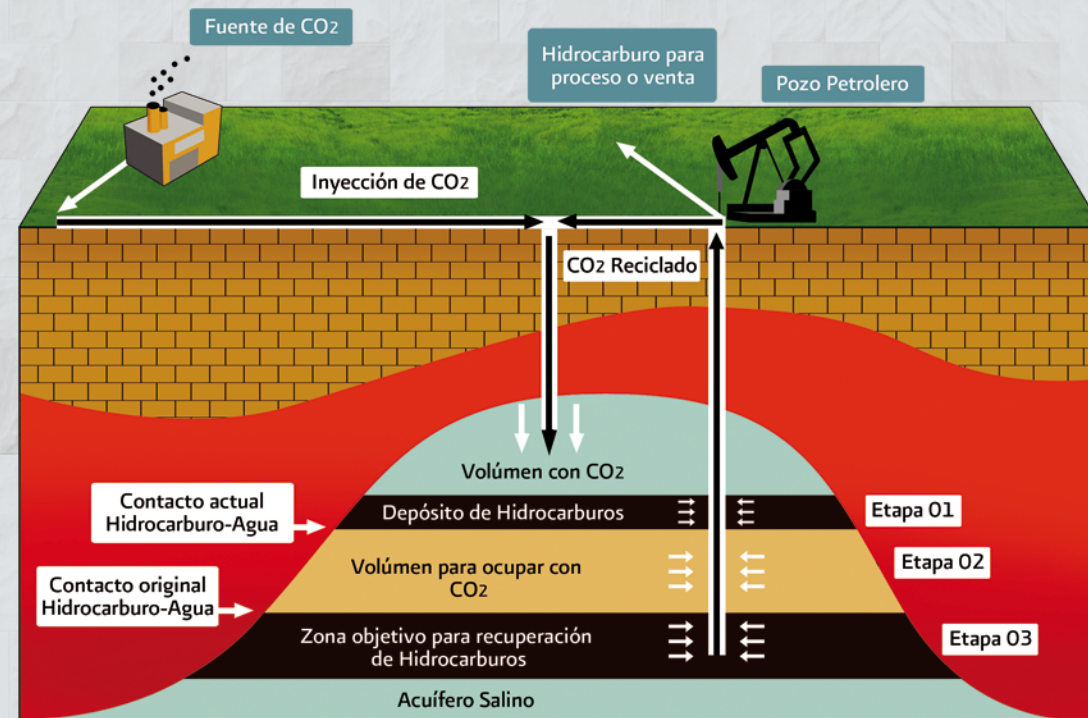


Figura 19 - Esquema simplificado de los componentes de un sistema de utilización de CO₂ en la recuperación mejorada de hidrocarburos (30).

Uno de los fluidos utilizados para la recuperación mejorada de hidrocarburos es el CO₂, cuyo uso se inicia a principios de la década de los años setenta, en la Cuenca Pérmica del Oeste de Texas (29). El CO₂ utilizado era de origen natural y provenía principalmente de la producción de gas natural y no de las emisiones generadas por la combustión antropogénica de combustibles fósiles, como sucede hoy en día.

El aprovechamiento de CO₂ en yacimientos exhaustos de hidrocarburos tiene varias ventajas. Una de ellas es que por definición los yacimientos de hidrocarburos que se generan en las formaciones de roca, tienen características geológicas de entrapamiento, es decir que los hidrocarburos quedan atrapados en ellas. Por lo mismo, constituyen atractivos almacenamientos con pocas posibilidades de fugas. Otras de sus ventajas es que al utilizar el CO₂ como fluido presurizante posibilita obtener remanentes de crudo con valor económico que hacen rentables los procesos de captura, separación, transporte e inyección de este gas. En la figura 19 se aprecia un esquema general de estos procesos.

Por otra parte, los yacimientos de hidrocarburos exhaustos se consideran como lugares apropiados para almacenar CO₂ antropogénico. Sin embargo, su capacidad de almacenamiento es considerablemente menor que la que puede ofrecer la variante de acuíferos salinos. Así mismo es difícil saber la capacidad real de almacenamiento dado que una fracción importante del gas 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.

La generación de energía eléctrica es la principal fuente estacionaria de emisiones de CO₂ en el mundo, lo que convierte a esta industria en un objetivo importante para la aplicación de la tecnología de CCS principalmente asociada a esquemas de EOR, ya que los beneficios que se obtengan por el hidrocarburo excedente recuperado pueden pagar los costos de los procesos de captura, compresión, transporte e inyección de CO₂, que de otra forma incrementarían el costo de producción del Kwh. En la actualidad no existen este tipo de proyectos aplicadas a la industria eléctrica a escala comercial, únicamente a nivel piloto.



En México, como a nivel mundial, las centrales termoeléctricas son grandes fuentes industriales de CO₂. Algunas de ellas están localizadas cerca de los campos productivos de petróleo y de las cuencas sedimentarias con potencial de almacenamiento. Actualmente se han iniciado los estudios para lograr la captura del CO₂, la cual se espera se logre a partir del año 2017 en algunas instalaciones de generación de electricidad localizadas en el Golfo de México. Desde el año 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 área denominada “Activo Integral Aceite Terciario del Golfo”.

El plan de trabajo para un sitio específico donde se ubicará el proyecto demostrativo incluye el estudio de la ruta tecnológica de la captura y el almacenamiento de CO₂, el análisis de factibilidad para la aplicación de esta tecnología y un plan de financiamiento. Se espera que durante el año 2012 se inicie la operación de la 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.

Por su parte, Pemex ha iniciado desde el año 2000 la captura e inyección de CO₂ para mejorar la eficiencia en la extracción de aceite y gas, realizando pruebas experimentales en campos petroleros conocidos. En el “Campo Artesa” localizado en el área del “Activo Cinco Presidentes”, han inyectado un volumen promedio de 25 MMPCD de CO₂ a través de cuatro pozos productores, mientras que en el “Campo Sitio Grande” durante 2005 se inyectaron 24 MMPCD de CO₂. En estos dos sitios se estimó que se pueden producir aproximadamente 950 millones de barriles con el proceso EOR (31).

Así mismo, PEMEX está desarrollando actualmente dos proyectos más de Recuperación Mejorada de Petróleo. En uno de ellos en fase de diseño y prueba piloto pretende inyectar CO₂ en el “Campo Ogarrio” que se sitúa en el “Activo Cinco Presidentes” y donde se espera que el CO₂ provenga del Complejo Petroquímico de Cosoleacaque. En el segundo se ha llevado a cabo la prueba piloto para inyectar CO₂ en el área del “Activo Integral Aceite Terciario del Golfo”. En ambos casos y de acuerdo a los primeros análisis y resultados observados se confirma 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 que pueden considerarse como almacenes potenciales de CO₂ deben carecer de atractivo económico para explotarse con fines energéticos y que esta característica perdure en el tiempo, condición difícil de sostener a largo plazo, pues los avances tecnológicos pueden hacer rentable la explotación de ciertos yacimientos que de momento no lo son.

Un buen ejemplo de avance tecnológico es la explotación UCG –Underground Coal Gasification- en la cual se obtiene la energía del carbón por medio de su gasificación y después extrayendo la mezcla de gas que retorna a la superficie. Este es un proceso todavía no muy desarrollado pero ya conocido.

En México existen tres regiones carboníferas suficientemente estudiadas (33). Una de ellas corresponde a las cuencas carboníferas localizadas en el noreste del país donde se localizan las cuencas “Fuentes-Río Escondido”, “Terciaria del Golfo” y “Sabinas Monclova” (véase figura 20). Estas cuencas están actualmente en explotación o tienen planes para estarlo, y son la base de las reservas de energía calorífica para abastecer a la industria siderúrgica nacional y a dos de las tres plantas carboeléctricas que tiene el país.

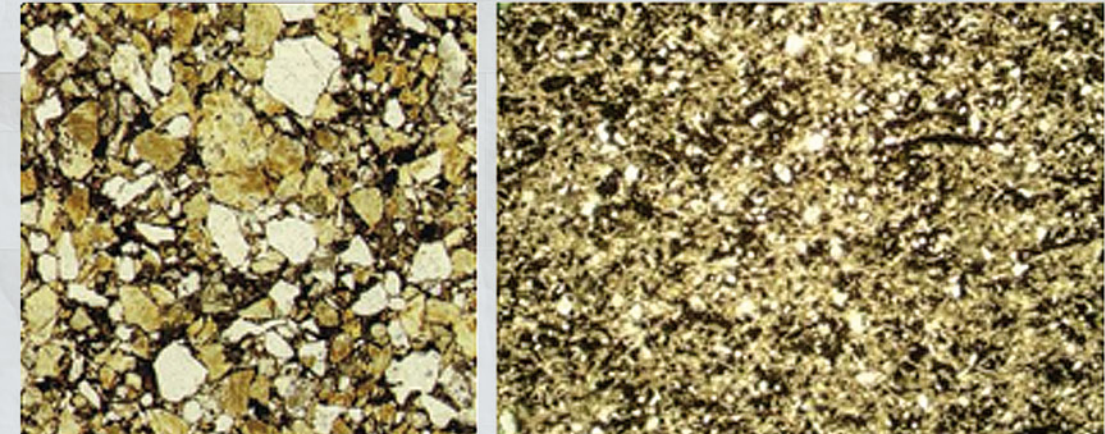
En las dos últimas regiones localizadas en los estados de Sonora y Oaxaca, existen cuencas caracterizadas por cuerpos rocosos y mantos de carbón formando estructuras disectadas y discontinuas debido a los esfuerzos tectónicos generados en el pasado geológico. Tales características reflejan su complejidad geológica y hace difícil asegurar que se puedan convertirse en almacenes geológicos. Por otra parte y aunque se ha estimado que sus reservas energéticas son importantes, por el momento el desarrollo de su explotación minera no es económicamente atractivo.

En resumen, ninguna de estas regiones carboníferas cumplen con los criterios de almacenamiento vigentes, por lo que en la actualidad, esta modalidad no se visualiza como opción de almacenamiento geológico.

Para almacenar bióxido de carbono en un acuífero salino, que no tiene posibilidades de usarse para fines de consumo humano, es necesario disponer de una formación rocosa con suficiente permeabilidad y saturada de agua con grandes concentraciones de sales (mínimamente del orden de 10,000 ppm STD (35)). Es así como se utilizan formaciones de areniscas, arenas o calizas cársticas, las cuales se encuentran a profundidades mayores a los 800 metros y cubiertas con rocas o sedimentos arcillosos que garantizan el confinamiento del depósito. En la fotografía 1 y 2 se aprecian afloramientos de areniscas que son muy frecuentes tanto en la superficie como en el subsuelo del territorio mexicano. Este tipo de formaciones es uno de los principales objetivos en la búsqueda de sitios apropiados para el almacenamiento de CO₂ en México debido a su permeabilidad (capacidad para permitir el paso de fluidos) y a su porosidad (espacios vacíos entre los granos). En las fotografías 3 y 4 se aprecian microfotografías de areniscas y lutitas de formaciones geológicas mexicanas.



Fotografía 1 y 2 - Se muestran dos afloramientos: areniscas de la "Formación Matzitzi" del Paleozóico (izquierda) (36) y areniscas y conglomerados de la "Formación Tilapa" del Eoceno (derecha) (37). Este tipo de afloramientos son típicos en diversos puntos de la geografía mexicana adecuados 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 (38). Nótese la posibilidad de espacios vacíos que se pueden formar por el tamaño de grano y su relación con respecto a los espacios vacíos. 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 que los espacios y los granos son más reducidos.

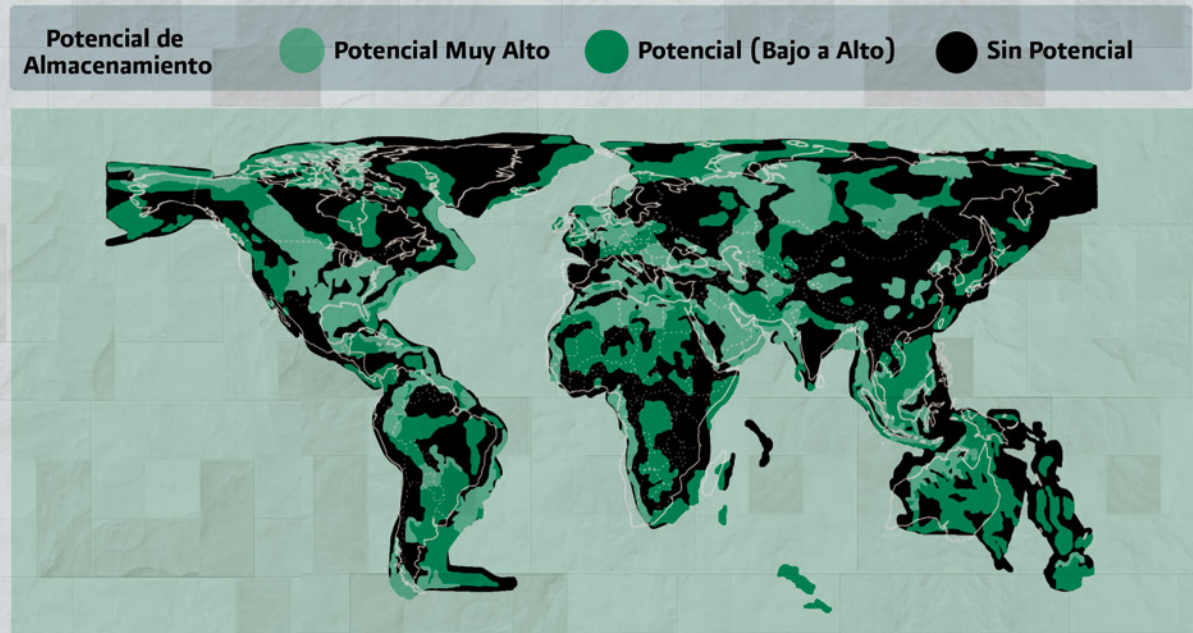


Figura 21 - Zonas continentales en donde se estima que existe potencial de almacenamiento de CO₂ en acuíferos salinos profundos (40).

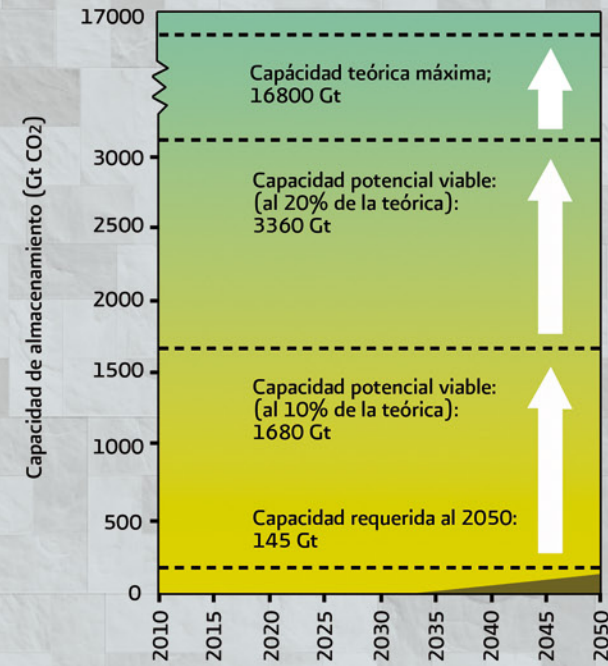


Figura 22 - Esquema donde se muestra que las necesidades mundiales de almacenamiento de CO₂ para el año 2050 constituyen aproximadamente el 1% de la capacidad teórica de almacenamiento en acuíferos salinos (41).

Los acuíferos salinos profundos son la opción con mayor potencial de almacenamiento geológico de CO₂, la razón principal es que los acuíferos salinos existen prácticamente en todos los continentes y océanos. En la figura 21 se aprecia un panorama mundial en las que podría almacenarse CO₂. En la figura 22 se presenta de forma esquemática un estimado entre la capacidad mundial y la demanda que puede tener este tipo de almacenamiento.

Sin embargo, esta modalidad de almacenamiento geológico de CO₂ es de menor relevancia con respecto a la de EOR debido a que esta ofrece la posibilidad de obtener un subproducto de valor económico. No obstante se espera que el almacenamiento en acuíferos salinos aumente su relevancia al bajar el costo de la tecnología ahora en desarrollo y se reconozca la importancia de su enorme capacidad de almacenamiento.

En el siguiente capítulo se expondrán los resultados de los estudios realizados para cuantificar teóricamente la capacidad de almacenamiento de CO₂ en el subsuelo mexicano en acuíferos salinos profundos. Se notará que aunque este conocimiento geológico se encuentra en una etapa primaria es posible identificar áreas donde existen condiciones favorables.

Central Termoeléctrica Petacalco, Michoacán



La concentración natural de CO₂ en la atmósfera ha variado a lo largo de la historia del planeta. Actualmente se acepta que una concentración menor a 0.04% es adecuada para mantener el equilibrio en procesos naturales como la fotosíntesis (42).

El incremento en la concentración de CO₂ puede deberse a emanaciones naturales muy significativas como por ejemplo las causadas por la actividad volcánica. Sin embargo las posibilidades de envenenamiento o asfixia por las altas concentraciones son muy remotas y solo existen casos raros de muertes documentadas (43).

Un riesgo mayor puede estar representado por la fuga de CO₂ de un almacén geológico. De ahí que la selección de sitios para almacenarlo requiere que se garantice la estabilidad geológica del lugar. Es decir, desde las primeras etapas del proceso de selección de sitios geológicos para almacenamiento 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 terrestre que permitan la fuga del gas 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.

Por otra parte es necesario llevar a cabo estudios en regiones y áreas de menor tamaño que permitan alojar el CO₂ en el subsuelo. En consecuencia es muy importante realizar investigaciones geológicas más detalladas, incluyendo análisis de riesgo, todo lo cual implica un mayor costo en los estudios.

Una vez escogido el sitio y el lugar donde construir instalaciones para el almacenamiento geológico de CO₂, toda el área deberá someterse de forma permanente a campañas rigurosas de monitoreo y verificación sobre la posible fuga de CO₂ a la superficie. Estos estudios se conocen como MMV (Measuring, Monitoring and Verification). Los parámetros que arroje este proceso permitirán la ratificación del sitio como un almacén geológico de CO₂ definitivo. Desde luego, esto implica un compromiso serio que requiere para su éxito recursos técnicos y económicos no fáciles de conseguir, pero que son obligatorios para lograr la factibilidad y obtener la licencia de funcionamiento de un sitio.

Además de la obligación de MMV en los proyectos productivos existen otros diseñados exclusivamente para investigar el comportamiento del CO₂ en el subsuelo y conocer sus posibilidades de fuga a la atmósfera. Un ejemplo muy reciente y de resultados alentadores es el realizado 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 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.

La selección de sitios adecuados para almacenar CO₂ en volúmenes significativos requiere de evaluaciones geológicas progresivas con grados de detalle mayores en resolución y costo, que abarquen físicamente un espacio cada vez menor. Las diferentes escalas de estudios van desde las de carácter regional que pueden incluir a todo un país, hasta los 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 de 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.

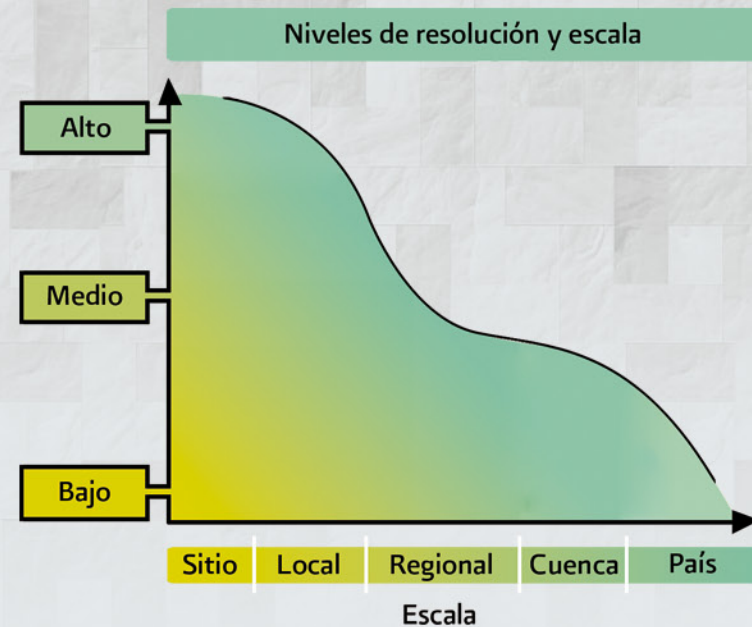


Figura 23 - Niveles de resolución y escala para estimación de capacidades en estudios de almacenamiento geológico de CO₂ (45).

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, aborda propiamente la estimación de capacidad de almacenamiento en los niveles que corresponden a país y cuenca con respecto a la opción de acuíferos salinos profundos. Actualmente se están llevando a cabo estudios a nivel regional en algunas zonas específicas de México, pero sus resultados se incorporarán en una siguiente versión de este Atlas.

Los estudios de las capacidades pueden dividirse en cuatro grados de certidumbre: capacidad teórica, capacidad efectiva, capacidad práctica y capacidad factible. Estos cuatro tipos pueden verse en la figura 24, en donde se representa solamente lo que resulta de un solo nivel respecto a su nivel antecedente y donde no se refiere el tamaño del área real.

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.

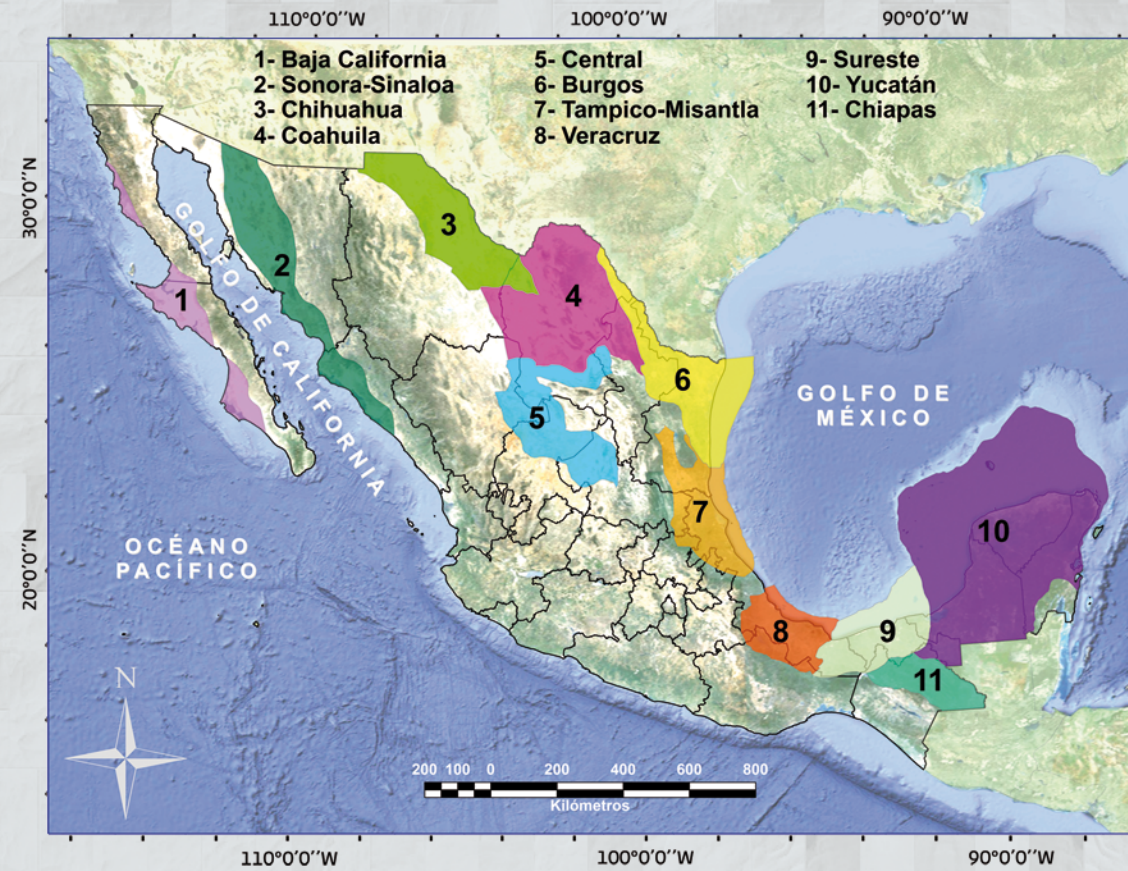


Figura 26 - Provincias geológicas con posibilidades de almacenar CO₂ antropogénico.



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 con mayor detalle y mejor resolución de estudio, ha permitido identificar once provincias potenciales para el almacenamiento de CO₂. Las provincias 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 a profundidades mayores de 800 metros y 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 por gruesas secuencias de rocas sedimentarias con potencial de convertirse en almacenes de CO₂. 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).

Potencial de almacenamiento geológico de CO₂ en México

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.

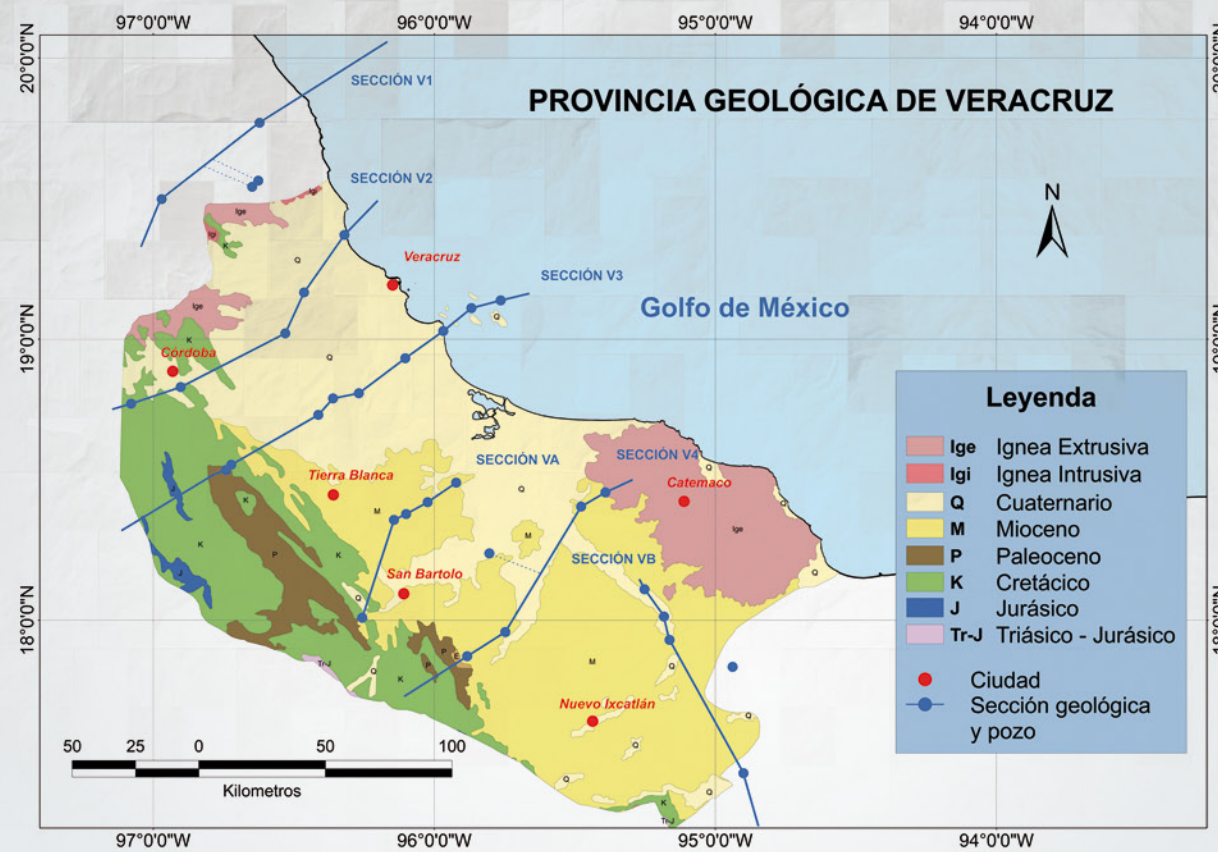


Figura 28 - Ejemplo de la información pública utilizada en el cálculo de la capacidad teórica de almacenamiento de CO₂ para la Provincia geológica de Veracruz.

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
1500		MIOCENO INFERIOR		965				Mi 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.

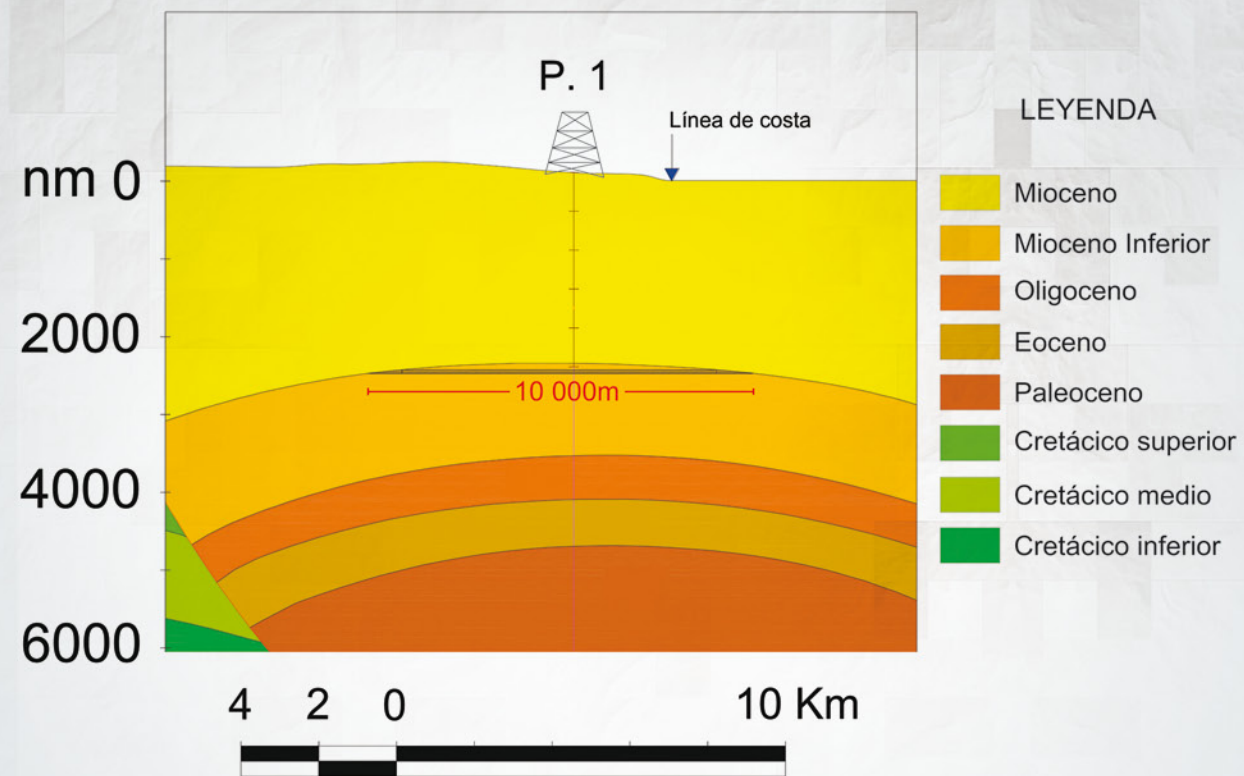


Figura 30 - Sección esquemática donde se propone un sector favorable para el almacenamiento de CO₂ en una secuencia de rocas terrígenas del Mioceno Inferior, las cuales están cubiertas, a su vez, por otra secuencia de rocas del Mioceno que sirven como un sello que impediría la salida del CO₂ a la superficie.

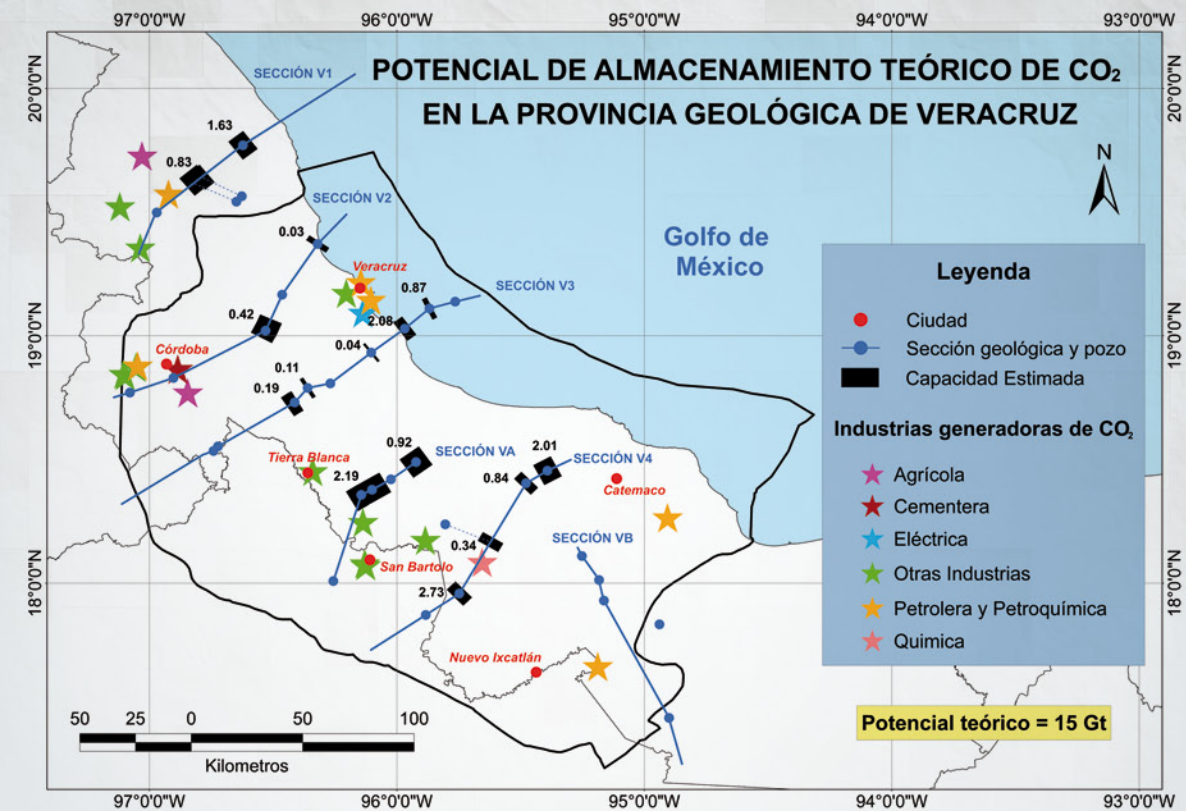
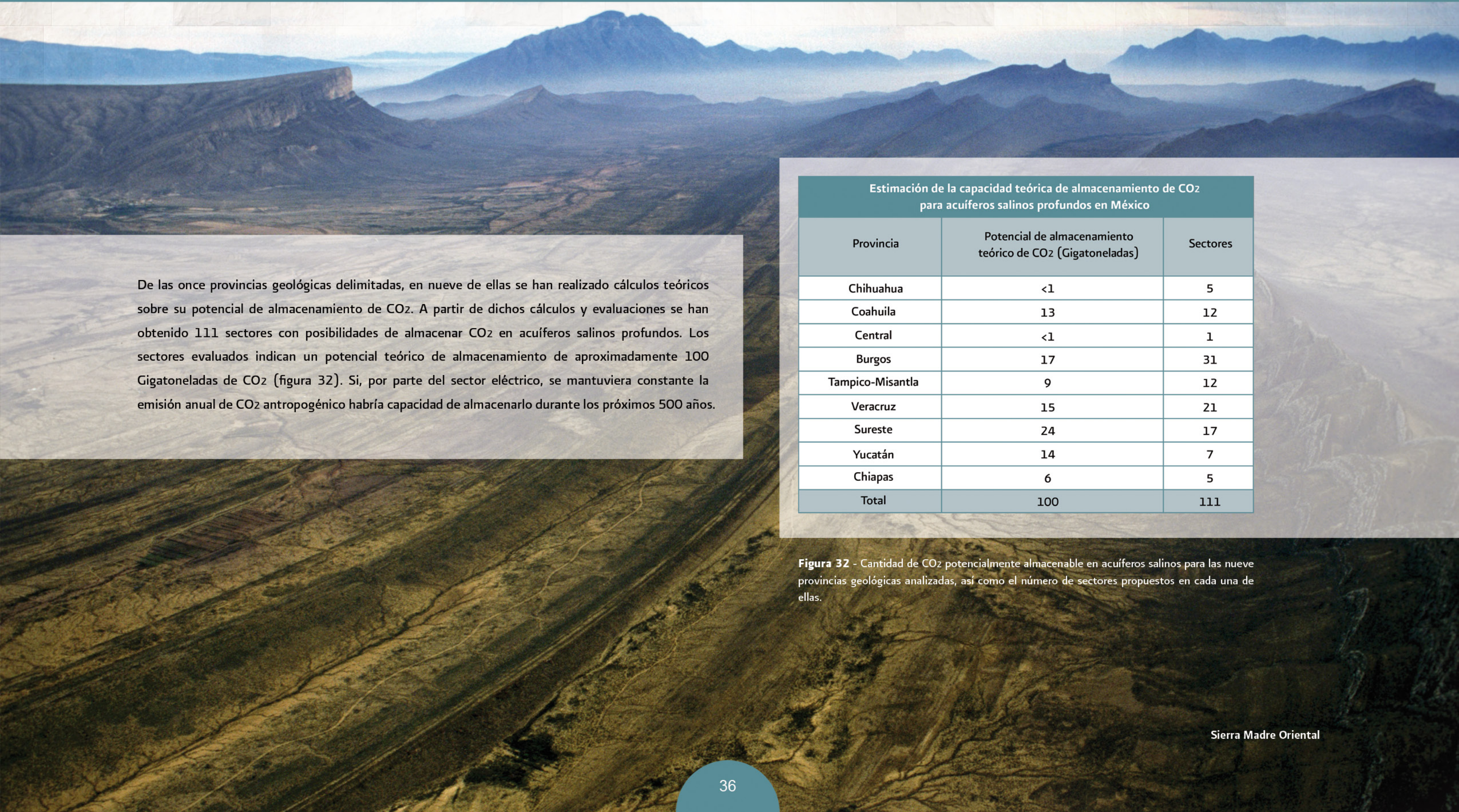


Figura 31 - Localización de sectores propuestos para la Provincia geológica de Veracruz (cuadros negros) y su relación con la ubicación de fuentes emisoras de CO₂ antropogénico.



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/detriticas.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 de la transformación de la materia orgánica contenida dentro de las rocas al estar sometidos al calor y presión durante millones de años. Principalmente carbón, petróleo y gas natural.

Combustión Antropogénica: Combustión creada por el hombre.

Combustóleo: Producto residual que se obtiene de los procesos de refinación del petróleo y que se usa como combustible.

Coque: 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 principalmente metano, provenientes de los yacimientos de carbón.

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 toneladas

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: Proceso de recuperar mayor volumen de hidrocarburos mediante la inyección de un fluido. EOR por sus siglas en inglés (ENHANCED OIL RECOVERY)

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.

Créditos de Fotografías e Imágenes



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

Página 7: Volcán Citlaltepetl o Pico de Orizaba, Veracruz © Christian Kober/AGE Fotostock/PhotoStock.

Página 12: 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 16: Toma satelital de Centroamérica. UIG-913-03-PO01016. PhotoStock/AGE Fotostock.

Página 18: Tanque de almacenaje; México. FOH-u19699584. PhotoStock/Fotosearch.

Página 19: Cinta transportadora de metal. MO2-470937. PhotoStock/AGE Fotostock

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

Página 24: Planta Petroquímica en el Golfo de México. FOH-U27866202. PhotoStock/Fotosearch.

Página 25: 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 36: Sierra Madre Oriental. U01-559538. PhotoStock/AGE Fotostock.

Página 37: Desierto de Baja California, México. XD3-1304733. PhotoStock/AGE Fotostock.

Agradecimientos

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, Misael Morales, Ian Solano, 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

Para mayor información visite: www.co2.energia.gob.mx/atlas