

Eficiencia de las tecnologías de captura y almacenamiento de carbono

Óscar David Bocanegra Ovando ¹

Diego Alberto Priego Pérez ²

Nahum Nolasco Caba ³

RESUMEN

Las Tecnologías de Captura y Almacenamiento de Carbono (TCAC) constituyen un conjunto de procedimientos tecnológicos para mitigar las emisiones de carbono al capturar dióxido de carbono (CO²) en fuentes estacionarias y almacenarlo de forma segura en el subsuelo. Este estudio compara las eficiencias de las tecnologías de precombustión, oxidación y poscombustión en plantas eléctricas, al utilizar un enfoque de búsqueda basado en palabras clave y criterios específicos. Los resultados revelan que la precombustión logra una reducción del 85 % en emisiones, similar a poscombustión (87 %) y poscombustión GNCC (88.5 %), con el menor aumento de costos (38.5 %), lo que indica la viabilidad económica en México. La oxidación destaca con una eficiencia de captura del 94 %, el líder en reducción de emisiones anuales. Ambas opciones son viables: la oxidación destaca por su porcentaje de captura y la precombustión

con su alta eficiencia. Se recomienda la aplicación de estas tecnologías en experimentos locales para una investigación más extensa aplicada a México.

Palabras clave: oxidación, precombustión, poscombustión, TCAC, Tecnologías de captura y almacenamiento de carbono.

INTRODUCCIÓN

Los gases de efecto invernadero (GEI), a pesar de representar menos del 0.1 % de la atmósfera, juegan un papel importante en la dinámica del clima, ya que el 90 % del calor es absorbido por estos gases. Pero distintas actividades humanas han provocado un aumento en la cantidad de estos gases (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, 2018).

La Tecnología de Captura, Uso y Almacenamiento de Carbono o TCAC representa un conjunto de procedimientos tecnológicos diseñados con el obje-

¹ Alumno del primer semestre de la Licenciatura en Ingeniería en Energías Renovables. Universidad Olmeca. Correo electrónico: uo23408004@olmeca.edu.mx

² Alumno del primer semestre de la Licenciatura en Ingeniería Biomédica. Universidad Olmeca. Correo electrónico: uo23407005@olmeca.edu.mx

³ Docente en la Licenciatura en Ingeniería Biomédica. Universidad Olmeca. Correo electrónico: uo18017@olmeca.edu.mx

tivo de mitigar las emisiones de carbono en la atmósfera. Su enfoque se centra en la captura del dióxido de carbono (CO₂) generado a gran escala en fuentes fijas para almacenarlo de manera segura y permanente en el subsuelo (Davi, Sannin y Trujillo, 2016). Este proceso se posiciona como una estrategia clave en la transición hacia una nueva generación de energías, caracterizadas por su sostenibilidad y bajos niveles de carbono.

La relevancia de la Tecnología de CCUS radica en su capacidad para abordar de manera efectiva el desafío de las emisiones de carbono, ofrece una solución integral que va más allá de la simple captura, al incluir el uso y almacenamiento del carbono. Este enfoque no solo contribuye a la reducción de gases de efecto invernadero, sino que también establece un puente hacia un futuro energético más limpio y sostenible (Secretaría de Energía, 2015).

ANTECEDENTES

En los informes del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático-constituido en 1988 por reconocidos expertos científicos de todo el planeta – y publicados en 1990, 1992, 1995, 1997 y 1998, se advertía sobre el aumento de la temperatura terrestre y la elevación del nivel del mar que había comenzado por la significativa y creciente emisión antropogénica de GEI desde el inicio de la era industrial (Rodríguez, 2007). Se establece que, alrededor de 91 kg de CO₂ son producidos por cada 100 kWh de electricidad producida, cuando un carbón bituminoso es quemado con una eficiencia del 34 % (Campbell y Mitchell, 2008 como se citó en Sánchez, 2012). Debido al impacto que causa el CO₂ en el cambio climático y dado su incremento en años recientes, es necesario reducir estas emisiones, pero sin afectar la producción de energía (Wall, 2007 como se citó en Sánchez, 2012).

La principal opción es la captura y almacenamiento de CO₂, llamada CCUS. Todas las tecnologías de CCUS incluyen la compresión de CO₂ producido a

un estado supercrítico, antes de transportarlo y almacenarlo (Wall, 2007 como se citó en Sánchez, 2012). Sin embargo, este proceso provoca una pérdida en la eficiencia del proceso de generación de energía (Wall, Liu *et al.*, 2009 como se citó en Sánchez, 2012). En la actualidad, se adelantan numerosas investigaciones para desarrollar tecnologías que faciliten la captura de CO₂, dentro de las cuales se han propuesto las siguientes:

«Captura pre-combustión: en la captura pre-combustión el carbono es removido antes del proceso de oxidación del combustible» (Figuroa, Fout *et al.*, 2008 como se citó en Sánchez, 2012).

Captura pos-combustión: en la captura pos-combustión, el CO₂ es separado de los gases que se producen después de la combustión. (Figuroa, Fout *et al.*, 2008 como se citó en Sánchez, 2012).

Oxi-combustión: la combustión se hace cuando hay una mayor concentración de O₂ (Bejarano y Levendis, 2008 como se citó en Sánchez, 2012), el CO₂ producido por la reacción también se obtendrá en mayor concentración (Rathnam, Elliott *et al.*, 2009 como se citó en Sánchez, 2012) facilitando la separación del CO₂. El principio de esta importante tecnología conocida como oxicombustión, fue propuesto en 1982 (Wall, Liu *et al.*, 2009 como se citó en Sánchez, 2012).

Este artículo se enfoca en la comparación de las diferentes maneras de capturar y almacenar carbono para determinar qué tan eficientes son, el costo y su eficiencia de captura.

OBJETIVO

Comparar la eficiencia de los tres tipos de tecnologías de captura y almacenamiento de carbono aplicados en plantas eléctricas, para su introducción en México.

JUSTIFICACIÓN

En los últimos años, la producción de gases de efecto invernadero ha resultado en aumentos de temperatura

a nivel global, ha traído consecuencias climáticas que afectan diversas regiones del planeta. Estas consecuencias varían desde pequeños incrementos de temperatura hasta condiciones muy cálidas, así como desde inundaciones devastadoras hasta sequías extremas.

Ejemplos notables incluyen la Ciudad del Cabo en Sudáfrica, que experimentó devastadoras sequías en 2018 debido al calentamiento global. Otro caso es el de Tuvalu, un país con una población de 11 mil habitantes, que se encuentra al borde de la extinción debido al aumento del nivel del mar provocado por los GEI, lo que ha llevado a la pérdida de tierras y a un acceso limitado al agua potable. Un escenario similar se observa en el estado de Tabasco, donde el incremento del nivel del mar ha impactado a las comunidades costeras de los municipios de Centla y Paraíso, forzando a muchas personas a abandonar sus hogares.

La mayor emisión de estos gases proviene de sectores esenciales como la ganadería, la generación de electricidad y los medios de transporte, los cuales son de gran importancia para la sociedad. Por eso se han propuesto diversas soluciones para reducir las emisiones de GEI. Algunas de estas alternativas incluyen la disminución del uso de vehículos a gasolina, la promoción de fuentes de energía limpia como prioridad, la reducción del consumo de carne, la educación ambiental para reducir los residuos, la innovación en la ganadería sustentable, la gestión más eficiente de los residuos en general y la implementación de estrategias de captura y almacenamiento de carbono.

La captura y almacenamiento de carbono emerge como una solución viable, ya que la implementación integral de todas las propuestas anteriores es complicada. Esta estrategia sugiere no sólo reducir la emisión de CO₂, sino también capturarlo y almacenarlo desde fuentes primarias, como lo es la generación de energía eléctrica a base de carbón bituminoso, para prevenir su acumulación excesiva de GEI en la atmósfera. Aunque aún es una tecnología emergente y

su aplicación está en proceso en algunos países, es crucial evaluar su eficacia para determinar su impacto real y potencial.

METODOLOGÍA

Se realizó una búsqueda de artículos científicos acerca de los tipos de tecnologías de Captura y almacenamiento de carbón en México y Europa. Se utilizó información del continente Europeo, debido a que es el continente con mayores avances en la aplicación de tecnologías de captura y almacenamiento de CO₂. Se evaluaron aquellos informes que cumplieran con los criterios de inclusión para recabar los datos que demostraron la utilidad de las tecnologías de Captura y almacenamiento de CO₂.

Criterios de inclusión:

- Que la información incluya las palabras clave: Oxidación, precombustión, poscombustión, tecnologías de captura y almacenamiento de carbono.
- Fecha de publicación (2012-2023).
- Que esté escrito o traducido al idioma español o inglés.
- Organismos nacionales e internacionales que recaben datos acerca de las tecnologías de captura y almacenamiento de carbono.
- Datos estadísticos de los países donde ya se han aplicado y llevan al menos 1 año de uso.

Criterios de exclusión:

- Publicaciones que no contengan las palabras clave: Oxidación, precombustión, poscombustión, tecnologías de captura y almacenamiento de carbono.
- Publicaciones realizadas previas al 2012.
- Publicaciones que no estén en los idiomas español o inglés.

- Publicaciones de medios no científicos cuyo fin sea solo divulgación a un público general.

Los resultados de esta investigación son presentados mediante gráficos y tablas que representan la eficiencia y costos en las plantas donde se aplicaron estas tecnologías.

RESULTADOS

Las **Tablas 1, 2, 3 y 4** presentan estimaciones del desempeño y los costos asociados con diversas plantas que implementan tecnologías de captura de dióxido de carbono (CO₂), como se mencionó previamente. Es importante destacar que los costos de captura de estas plantas se encuentran expresados en dólares estadounidenses, con valor de referencia del año 2013. Es relevante señalar que en estas tablas no se incluyen los gastos relacionados con el transporte y el almacenamiento del CO₂, ya que estos varían en función del método de transporte utilizado, las distancias involucradas y el tipo de ubicación seleccionada para el almacenamiento geológico (Saldívar *et al.* 2017).

La **Tabla 1** muestra el resumen de estimaciones del rendimiento y del costo de la captura por pre-combustión en las centrales eléctricas de ciclo combinado de gasificación integrada (CCGI) que utilizan carbón bituminoso (todos los valores en dólares estadounidenses constantes de 2013) Fuente: Extraída

de (Saldívar *et al.*, 2017), basada en (Rubin, Davison y Herzog, 2015).

En la **Tabla 2** se observa el resumen de las estimaciones de rendimiento y costo actuales para la captura de oxicomustión en nuevas plantas SCPC/USC utilizando carbones sub-bituminosos o bituminosos (todos los valores en dólares estadounidenses constantes 2013) Fuente: Extraída de (Saldívar *et al.*, 2017), basada en (Rubin, Davison y Herzog, 2015).

Medidas de rendimiento y costo para nuevas plantas CCGI con carbón bituminoso (relativo a una CCP sin captura de CO ₂)	Valores	
	Rango	
	Bajo	Alto
Medición de rendimiento de la planta		
Planta de referencia CCP, Potencia de salida neta (MW)	550	1030
Tasa de emisión sin captura (tCO ₂ / MWh)	0.75	0.861
Tasa de emisión con captura (tCO ₂ / MWh)	0.017	0.11
Porcentaje de reducción de CO ₂ por MWh (%)	90	98
El CO ₂ total capturado o almacenado (Mt / año)	3.1	5.5
Captura de energía requerida. (% Más entrada / MWh)	24	29
Medición del costo de la planta		
Capital total requerido sin captura (USD / kW)	2455	2681
Capital total requerido con captura (USD / kW)	4278	5372
Porcentaje de aumento en el costo de capital con captura (%)	67	106
costo nivelado de la electricidad (CNE) sin captura (USD / MWh)	56	68
CNE con captura (USD / MWh)	91	121
Incremento en el CNE, solamente con captura (USD / MWh)	35	56
Porcentaje de aumento en CNE con captura solamente (%)	60	84
Costo del CO ₂ capturado (USD / tCO ₂)	36	67
Costo de CO ₂ evitado, excluyendo Transp. Y almac. (USD / tCO ₂)	45	73

La **Tabla 3** muestra el resumen de las estimaciones de rendimiento y de los costos de la captura por postcombustión en las centrales de calderas de carbón pulverizado (CCP) usando carbón bituminoso (todos los valores en dólares estadounidenses constantes de 2013) Fuente: Extraída de (Saldívar *et al.*, 2017), basada en (Rubin, Davison y Herzog, 2015).

Medidas de rendimiento y costo para nuevas plantas CCGI con carbón bituminoso	Valores	
	Rango	
	Bajo	Alto
Medición de rendimiento de la planta		
Planta de referencia CCGI, Potencia de salida neta (MW)	600	748
Tasa de emisión sin captura (tCO ₂ / MWh)	0.723	0.850
Tasa de emisión con captura (tCO ₂ / MWh)	0.093	0.150
Porcentaje de reducción de CO ₂ por MWh (%)	82	88
El CO ₂ total capturado o almacenado (Mt / año)	3.1	3.3
Captura de energía requerida. (% Más entrada / MWh)	20	35
Medición del costo de la planta		
Capital total requerido sin captura (USD / kW)	2687	3900
Capital total requerido con captura (USD / kW)	3808	5148
Porcentaje de aumento en el costo de capital con captura (%)	30	47
costo nivelado de la electricidad (CNE) sin captura (USD / MWh)	82	99
CNE con captura (USD / MWh)	111	130
Incremento en el CNE, solamente con captura (USD / MWh)	24	36
Porcentaje de aumento en CNE con captura solamente (%)	26	41
Costo del CO ₂ capturado (USD / tCO ₂)	28	41
Costo de CO ₂ evitado, excluyendo Transp. y almac. (USD / tCO ₂)	37	58

Medidas de rendimiento y costo para nuevas plantas CCP con carbón bituminoso	Valores	
	Rango	
	Bajo	Alto
Medición de rendimiento de la planta		
Planta de referencia CCP, Potencia de salida neta (MW)	550	1030
Tasa de emisión sin captura (tCO ₂ / MWh)	0.746	0.840
Tasa de emisión con captura (tCO ₂ / MWh)	0.092	0.120
Porcentaje de reducción de CO ₂ por MWh (%)	86	88
El CO ₂ total capturado o almacenado (Mt / año)	3.8	5.6
Captura de energía requerida. (% Más entrada / MWh)	21	44
Medición del costo de la planta		
Capital total requerido sin captura (USD / kW)	2313	2990
Capital total requerido con captura (USD / kW)	4091	5252
Porcentaje de aumento en el costo de capital con captura (%)	58	91
costo nivelado de la electricidad (CNE) sin captura (USD / MWh)	61	79
CNE con captura (USD / MWh)	94	130
Incremento en el CNE, solamente con captura (USD / MWh)	30	51
Porcentaje de aumento en CNE con captura solamente (%)	46	69
Costo del CO ₂ capturado (USD / tCO ₂)	36	53
Costo de CO ₂ evitado, excluyendo Transp. Y almac. (USD / tCO ₂)	45	70

En la **Tabla 4** se ve el resumen del rendimiento y estimaciones de costos para la captura postcombustión en las nuevas plantas generadoras de gas natural de ciclo combinado (GNCC) (todos los valores en dólares estadounidenses constantes de 2013) Fuente: Extraída de (Saldívar *et al.* 2017), basada en (Rubin, Davison y Herzog, 2015).

Medidas de rendimiento y costo para nuevas plantas (GNCC)	Valores	
	Rango	
	Bajo	Alto
Medición de rendimiento de la planta		
Planta de referencia GNCC, Potencia de salida neta (MW)	512	910
Tasa de emisión sin captura (tCO ₂ / MWh)	0.348	0.370
Tasa de emisión con captura (tCO ₂ / MWh)	0.040	0.043
Porcentaje de reducción de CO ₂ por MWh (%)	88	89
El CO ₂ total capturado o almacenado (Mt / año)	1.1	2.3
Captura de energía requerida. (% Más entrada / MWh)	13	18
Medición del costo de la planta		
Capital total requerido sin captura (USD / kW)	808	1378
Capital total requerido con captura (USD / kW)	1422	2626
Porcentaje de aumento en el costo de capital con captura (%)	76	121
costo nivelado de la electricidad (CNE) sin captura (USD / MWh)	42	83
CNE con captura (USD / MWh)	63	115
Incremento en el CNE con captura (USD / MWh)	19	40
Porcentaje de aumento en CNE con captura (%)	27	61
Costo del CO ₂ capturado (USD / tCO ₂)	48	111
Costo de CO ₂ evitado, excluyendo Transp. Y almac. (USD / tCO ₂)	58	121

La **Figura 1** presenta los datos del porcentaje de reducción de emisiones de CO₂ y el porcentaje de

incremento en costos, utilizando como fuente de referencia las **Tablas 1, 2, 3 y 4**, con promedio de los rangos altos y bajos. Es importante destacar que la tecnología de precombustión (85 %) logra una reducción de emisiones similar a la poscombustión (87 %) y la poscombustión GNCC (88.5 %), pero con un incremento de costos menor (38.5 %).

En la **Figura 2**, se presenta la cantidad de CO₂ capturado en un año en diversas plantas donde se han implementado tecnologías de captura y almacenamiento de carbono. La tecnología de poscombustión destaca como la que logra la mayor captura de CO₂ (5.6 Mt/año en su rango más alto) en comparación con las demás tecnologías evaluadas.

En la **Figura 3**, se presentan los costos por tonelada CO₂ capturado en un año en diversas plantas donde se han implementado tecnologías de captura y almacenamiento de carbono. La tecnología de precombustión se destaca como la que cuenta con el menor costo por tonelada de CO₂ capturado (28 USD/tCO₂ en su rango más bajo) en comparación con las demás tecnologías evaluadas.

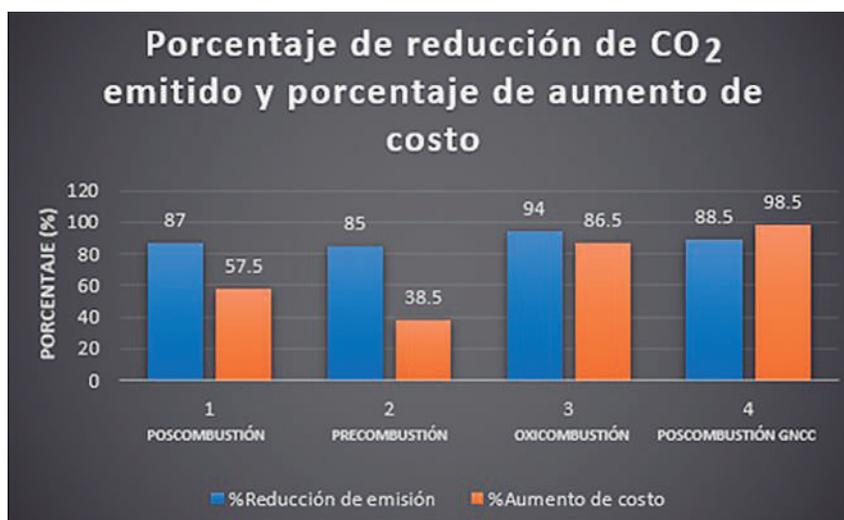


Figura 1. Comparación del promedio de los porcentajes de reducción de CO₂ emitido y porcentajes de aumento de costo mostrados en distintas plantas donde se aplicaron las tecnologías de captura y almacenamiento de carbono. Fuente: Modificado de (Saldívar *et al.* 2017), basada en (Rubin, Davison y Herzog, 2015).

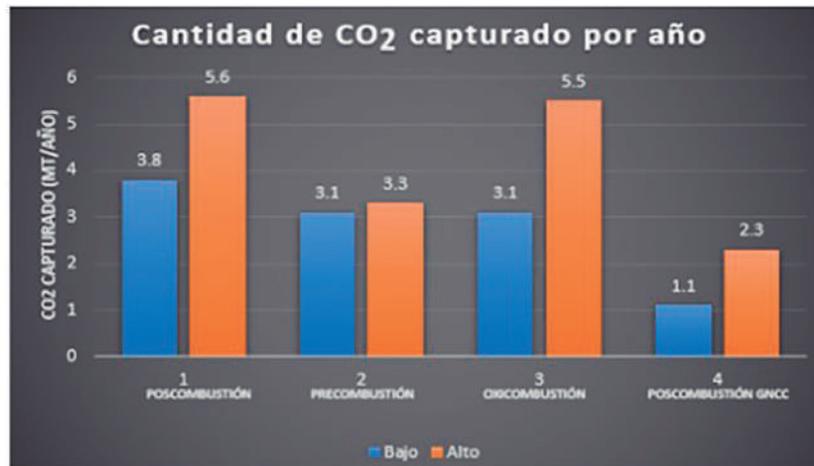


Figura 2. Comparación de las cantidades de CO₂ capturado por año (Mt/año) de las diferentes plantas donde se aplicaron tecnologías de almacenamiento de carbono. Fuente: Modificada de (Saldívar *et al.* 2017), basada en (Rubin, Davison y Herzog, 2015).

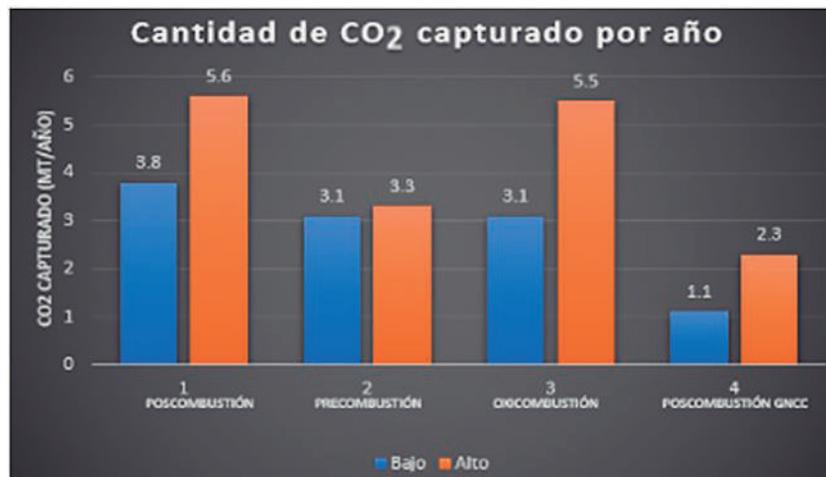


Figura 3. Comparación de los costos por tonelada CO₂ capturado por año (Mt/año) de las diferentes plantas donde se aplicaron tecnologías de almacenamiento de carbono. Fuente: Modificada de (Saldívar *et al.* 2017), basada en (Rubin, Davison y Herzog, 2015).

DISCUSIÓN

Es importante resaltar que entre los datos considerados como los más significativos se encuentran el porcentaje de reducción de emisiones y el porcentaje de aumento de costos, ya que estos valores permiten comparar de manera precisa distintas plantas eléctricas de carbón bituminoso. Los datos cuantitativos, como la cantidad de carbono capturado y el costo por tone-

lada, varían según las características de las plantas, por lo que el uso de porcentajes facilita la comparación para entender la eficiencia de cada tecnología.

Se resalta la precombustión como la elección más económica y eficaz. Esta tecnología no solo reduce las emisiones de CO₂ de manera comparativa a otras opciones, sino que también minimiza los costos adicionales, como se refleja en la **Figura 1**. Este ha-

llazgo no sólo implica un beneficio económico sustancial, sino que también garantiza una captura eficiente de carbono, con generación de energía que no sólo es respetuosa con el medio ambiente, sino también favorable desde el punto de vista económico. La precombustión emerge como una elección estratégica que combina eficiencia en la reducción de emisiones con un impacto positivo en la viabilidad económica de la generación de energía sostenible.

Si el propósito es implementar una TCAC en México que garantice una generación eficiente de energía eléctrica sin comprometer el medio ambiente, la oxicomcombustión parece la mejor opción. A pesar de sus costes superiores, la oxicomcombustión lidera en porcentaje de captura, un dato fundamental mostrado en la **Figura 1** que destaca su capacidad para reducir las emisiones de CO₂ derivadas de la combustión. Esto implica una reducción sustancial de la contaminación del aire, así como las consecuencias actuales del calentamiento global.

Esta investigación se revela como una herramienta esencial para la toma de decisiones, con información valiosa para la selección de la tecnología más idónea en cada caso. Su aplicación en México busca obtener resultados óptimos, contribuyendo a la eficiencia energética y a la mitigación de los impactos ambientales asociados.

CONCLUSIÓN

En este artículo, se exploraron las tecnologías de captura y almacenamiento de carbono, en especial su aplicación en plantas eléctricas. El análisis revela que tanto la oxicomcombustión como la precombustión son opciones viables. Ambas tecnologías destacan por su promisorio papel en la reducción de emisiones, con la oxicomcombustión como la líder en términos de captura, mientras que la precombustión exhibe una eficiencia significativa con un impacto financiero favorable. Estos aspectos son cruciales al seleccionar la tecnología más adecuada para México.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Daví, D., Sannin, M., & Trujillo, E.** (2016). CO₂ content of electricity losses. *Energy Policy*, 104, 439-445. de Queiroz Fernandes Araújo, O., & de Medeiros, J. L. (2017). Carbon capture and storage technologies: present scenario and drivers of innovation. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 17, 22-34.
- Rodríguez S., L.**, (2007). Protocolo de Kyoto: debate sobre ambiente y desarrollo en las discusiones sobre cambio climático. *Gestión y Ambiente*, 10(2), 119-128.
- Saldívar E. S, Cabrera R., J. S., Reta H. M.** (2017). Tecnologías de captura y almacenamiento de dióxido de carbono. *Revista de Ciencias Naturales y Agropecuarias*. 4-12: 22-34.
- Sánchez, A.** (2012). Procesos para la captura de CO₂. Emisión de óxidos de nitrógeno y de azufre durante la oxi-combustión de un carbonizado. Recuperado de: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-39082012000100010
- Secretaría de Energía, S.** (2015). CCUS: Tecnología de Captura, Uso y Almacenamiento de Bióxido de Carbono. Recuperado de: <https://www.gob.mx/sener/articulos/ccus-tecnologia-de-captura-uso-y-almacenamiento-de-bioxido-de-carbono>