UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

Repositorio Digital USM **https://repositorio.usm.cl**

Tesis USM TESIS de Pregrado de acceso ABIERTO

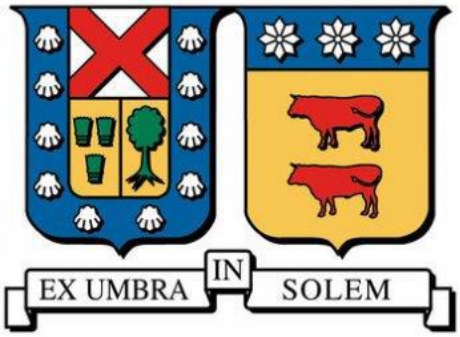
2019

ANÁLISIS DE POSIBILIDAD DE IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMAS DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE DIÓXIDO DE CARBONO EN CHILE EN FUNCIÓN DE EXPERIENCIAS INTERNACIONAL

FARÍAS HUMERES, RICARDO ANDRÉS

https://hdl.handle.net/11673/47923

Repositorio Digital USM, UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA



UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS

ANÁLISIS DE POSIBILIDAD DE IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMAS DE CAPTURA Y ALMACENAMINTO DE DIÓXIDO DE CARBONO EN CHILE EN FUNCIÓN DE EXPERIENCIAS INTERNACIONALES.

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL

AUTOR

RICARDO ANDRÉS FARÍAS HUMERES

PROFESOR GUÍA

FRANCISCO DALL´ORSO LEÓN

PROFESOR CORREFERENTE

MARÍA PILAR GARATE CHATEAU

SANTIAGO DE CHILE, OCTUBRE, 2019

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a mi mamá y mi papá, por apoyarme y estar para mí siempre. Gracias por acompañarme en todos los momentos de mi vida, por guiarme, aconsejarme y ayudarme en todo lo que me he propuesto. Siendo un ejemplo de sacrificio y perseverancia para conseguir las metas propuestas. Además de darles las gracias, ya que por su esfuerzo estoy culminando esta etapa universitaria. Y lo que soy actualmente es gracias a ellos.

Agradezco a mi hermana Maite, y a mi abuelita Nina por su preocupación durante todo este camino y hacer lo que estuviera a su alcance para apoyarme. También a mis familiares que siempre tenían una palabra de aliento. A mi amiga Catalina, por acompañarme durante estos años de universidad, por su preocupación y su cariño entregado, y a todos aquellos que fueron parte de mi etapa universitaria, amigos, compañeros, profesores y funcionarios.

Por último, agradezco a mi profesor guía, Francisco Dall´Orso, por acompañarme en esta etapa final, ayudándome y apoyándome para cumplir con las expectativas puestas en la realización de esta memoria, y en el desarrollo por completo de este proceso. Por su simpatía y buena disposición.

RESUMEN EJECUTIVO

El panorama internacional ha mostrado interés en la forma de mitigar las emisiones de GEI, es por esto que Chile debe tomar medidas para cumplir con sus objetivos ambientales adoptados en el Protocolo de París, ya que se encuentra en la categoría de país vulnerable. Es por esto que las tecnologías de captura de dióxido de carbono van generando mayor aceptación dentro de la Unión Europea y Estados Unidos principalmente. Por lo tanto, en base a las experiencias internacionales se busca ver como desarrollaron los proyectos, y como poder implementar dichas políticas en el país, de forma de visualizar que debe mejorarse.

Se estudiaron los diferentes tipos de tecnología que son potencialmente aptos, como lo son los procesos de pre-combustión y post-combustión para las centrales termoeléctricas y plantas procesadoras de cemento. Además, de diagnosticar como se encuentra la infraestructura para poder implementar el transporte y como es la geografía del país para poder aplicar el almacenamiento del dióxido de carbono.

Para poder implementar esta tecnología en el país, debe buscarse un punto de equilibrio entre el impuesto verde establecido, y el costo de capturar CO_2, donde el punto de inflexión ocurre en el año 2037, con un costo de 41 dólares, donde ahí comienza a ser atractiva esta oportunidad para las empresas, ya que antes no le salía rentable a los privados.

Para poder implementar este plan de mitigación para el dióxido de carbono se elabora una hoja de ruta, con la finalidad de mostrar las falencias y los puntos a desarrollar, donde pese a lo mencionado en el párrafo anterior, el ámbito legal requiere de trabajo a desarrollar para que sean viables los proyectos de captura, transporte y almacenamiento de CO_2.

Índice de Contenidos

1. INTRODUCCIÓN 9
2. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN 11
3. OBJETIVOS 13
   3.1 Objetivo general 13
   3.2 Objetivos Específicos 13
4. MARCO TEÓRICO 14
   4.1 Cambio climático 14
   4.2 Impactos del cambio climático en Chile 14
   4.3 Fuentes de emisión de gases de efecto invernadero 16
      4.3.1 África 16
      4.3.2 Asia y el Pacífico 17
      4.3.3 Europa 18
      4.3.4 América Latina y el Caribe 19
      4.3.5 América del Norte 20
   4.4 ¿Qué es el dióxido de carbono? 21
   4.5 Emisión de dióxido de carbono a la atmosfera 22
   4.6 Acuerdos internacionales para combatir el cambio climático 24
      4.6.1 Protocolo de Montreal 24
      4.6.2 Protocolo de Kioto 25
      4.6.3 Acuerdo de Paris 27
   4.7 Mercados de Carbono 29
      4.7.1 El mercado de conformidad 30
      4.7.2 El mercado voluntario 32
   4.8 ¿Qué son los métodos CCUS y qué se busca con su aplicación? 37
   4.9 Desarrollo de tecnologías y aplicaciones 41
   4.10 Almacenamiento del dióxido de carbono 43
      4.10.1 Almacenamiento geológico 44
      4.10.2 Formaciones sedimentarias salinas profundas y yacimientos de gas empobrecidos . 44
      4.10.3 La carbonización mineral 44
      4.10.4 Almacenamiento en el océano 45
   4.11 Interminables años de fracaso arrastra la tecnología de captura y almacenamiento de carbono 47
   4.12 Proyectos de captura y almacenamiento de carbono que fracasaron en Europa 49

5. PROPUESTA DE POLITICA PÚBLICA PARA CHILE 52
5.1 Diagnóstico de la situación ambiental de Chile 52
5.2 Análisis de soluciones según el panorama actual del país 54
5.3 ¿Cómo realizar captura, transporte y almacenamiento de dióxido de carbono en Chile?. 66
5.4 Análisis de factibilidad 69
5.4.1 Análisis ambiental 69
5.4.2 Análisis económico 71
5.4.3 Análisis legal 77
5.4.4 Análisis político 80
5.5 Dualidad de la captura de carbono 82
5.6 Hoja de ruta para implementación 85
5.7 Relación entre el mercado de carbono y el costo de capturar dióxido de carbono 91
6. CONCLUSIONES 97
7. REFERENCIAS 101
8. ANEXOS 114
3.1 Anexo I: Detalle de emisiones de gases de efecto invernadero en Chile, tanto por sector como por gas emitido. 114
3.2 Anexo II: Detalle por región de la cantidad de empresas que son afectadas por el impuesto verde. 116
3.3 Anexo III: Valor de impuesto pagado y compensaciones recibidas 117

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Ciclo del carbono en la atmósfera terrestre**. Fuente:** Khan Academy, 2017. 21

Figura 2: Ciclo del Mecanismo de Desarrollo Limpio. **Fuente:** Organización de Naciones Unidas (2013). 32

Figura 3: Proceso de acreditación de una metodología Verified Carbon Standard. **Fuente:** VERRA, 2018. 36

Figura 4: Separación del dióxido de carbono del gas natural producido en la Formación Heimdal, que luego es inyectado en la Formación Utsira. **Fuente:** Bennaceur, et al., 2017. 47

Figura 5: Generación eléctrica por tipo de fuente y emisiones GEI (kt CO2 eq), serie 1990-2016. **Fuente:** Ministerio de Medio Ambiente (2018)..... 59

Figura 6: Fuentes generadoras de energía, según la capacidad instalada del Sistema Eléctrico Nacional. **Fuente:** Asociación de Generadoras de Chile (2019). 60

Figura 7: Estructura de bloques y límites para la captura de dióxido de carbono en la industria del cemento. **Fuente:** Jakobsen, Roussanaly & Anantharaman (2017). 64

Figura 8: Visión general de los procesos y los sistemas de captación de dióxido de carbono. **Fuente:** Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (2005). 67

Figura 9: Escala de costos de la captura, transporte y almacenamiento de dióxido de carbono. **Fuente:** Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, 2005..... 73

Figura 10: Proceso gráfico de la inyección de dióxido de carbono en un pozo petrolero, para la realización de la recuperación mejorada de hidrocarburo. **Fuente:** Santamaria (2018). 84

Figura 11: Hoja de ruta para un plan de implementación de sistemas de captura, transporte y almacenamiento de dióxido de carbono. **Fuente:** Elaboración propia..... 91

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Emisiones de gases de efecto invernadero entre 1990-2014. **Fuente:** CAIT Climate Data Explorer, 2017. 23

Gráfico 2: Emisiones de dióxido de carbono para países de América Latina en millones de kilotones. **Fuente:** CNN Español, 2017. 24

Gráfico 3: INGEI de Chile: balance de GEI (kt CO2 eq) por sector. **Fuente:** Ministerio de Medio Ambiente, 2018. 52

Gráfico 4: Precio del impuesto a las emisiones de dióxido de carbono en el plano internacional, en relación a Chile. **Fuente:** Elaboración propia (2019). 92

Gráfico 5: Evolución del precio de capturar dióxido de carbono versus el precio del impuesto actual y sugerido en Chile. **Fuente:** Elaboración Propia. 94

Gráfico 6: Curvas ajustadas para el costo de la tecnología e impuesto sugerido, según su tendencia gráfica. **Fuente:** Elaboración propia. 95

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Principales países emisores de dióxido de carbono**. Fuente:** Ecoosfera (2015)..... 22

Tabla 2: Tecnologías de captura de carbono y su contribución en la captura de dióxido de carbono. **Fuente:** Rubin & De Coninck (2005). 39

Tabla 3: Porcentaje de dióxido de carbono recuperado por el proceso de aminas en diferentes plantas termoeléctricas. **Fuente:** Serrano, Pérez & Marmolejo (2017)..... 43

Tabla 4: Emisiones totales del sector energía, según el inventario nacional de gases de efecto invernadero. **Fuente:** Elaboración propia, con información del Ministerio de Medio Ambiente (2018). 56

Tabla 5: Subcategorías del sector energía que representan la mayor cantidad de emisiones de GEI. **Fuente:** Elaboración propia, con información del Ministerio de Medio Ambiente (2018). 57

Tabla 6: Emisiones de dióxido de carbono en toneladas realizadas por los principales actores en la industria del cemento. **Fuente:** Registro de emisiones y transferencia de contaminantes, 2017..... 63

Tabla 7: Cantidad de proyectos realizados o en construcción entre los años 2000-2020, por regiones de Chile. **Fuente:** Elaboración propia con información de UNEP, 2019. 76

Tabla 8: Cantidad de emisiones acumuladas por tonelada de CO_2 eq, por regiones de Chile. **Fuente:** Elaboración propia con información de UNEP, 2019. 76

Tabla 9: Inversión realizada en proyectos MDL en Chile en las diferentes regiones, además de precio promedio pagado en las distintas regiones por un bono de emisiones CER. **Fuente:** Elaboración propia con información de UNEP, 2019. 77

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los temas más investigados, estudiados y contingentes en la actualidad, es el problema del cambio climático y las consecuencias que trae para la población mundial y ecosistemas que conocemos, ya que con el aumento de emisiones de gases de efecto invernadero provocado por el constante crecimiento industrial y la deforestación mundial, es que se está incrementando la temperatura del planeta causando un desequilibrio. Donde uno de los principales gases que realiza dicha perturbación es el dióxido de carbono, ya que debido a su composición y estructura química retiene calor causando un incremento de las temperaturas, si bien es esencial para la vida, el mayor porcentaje de este gas en la atmósfera provoca daño.

Si bien, se han realizado políticas para la reducción de emisiones de dióxido de carbono a través de impuestos y el mercado de carbono, no son suficientes para mitigar los cambios, debido a que se siguen emitiendo gases de efecto invernadero al ambiente, con la diferencia de pagar por esta.

Es por esto, que la innovación y la investigación científica deben hacer frente a esta problemática, y es donde en los últimos años han tomado fuerza los proyectos de captura y almacenamiento de dióxido de carbono de las grandes instalaciones de combustión (principalmente generadoras de energía como lo son las termoeléctricas), donde dichos proyectos y tecnología resultan imprescindibles para reducir las emisiones (Sanz, 2013). Pero aún deben superarse grandes barreras como lo son los aspectos legales que impliquen su regulación, la obligatoriedad, permisos medioambientales, y sobre todo el grado de responsabilidad de las empresas para mitigar su implementación. Pese a que es una

tecnología prometedora, se choca con una gran barrera que impide su masificación, la cual es: los costos. Según un estudio de National Geographic (2015), los costos son el mayor obstáculo debido a que nadie quiere hacer frente a la fuerte inversión inicial para comprobar los resultados obtenidos en menores escalas, esto también sumado a la falta de incentivos fiscales.

Por lo que cabe cuestionarse, ¿cuáles están siendo las verdaderas acciones políticas para hacer frente a la crisis climática mundial?, ¿qué proyectos están siendo realizados a gran escala en el rubro de la captura de dióxido de carbono?, y ¿qué se puede realizar para hacer frente a los nuevos desafíos?, ya que, viéndolo a nivel de Chile, este puede ser uno de los grandes afectados por las consecuencias que se podrían avecinar al ritmo actual de desarrollo.

Es por esto, que Chile ya ha tomado cartas en el asunto y mediante el Ministerio de Medio Ambiente y el Ministerio de Energía, le han comenzado a hacer frente a esta situación en el país, esto ya sea mediante la implementación del impuesto verde, el plan de descarbonización de la matriz energética nacional, proyectos mediante el mecanismo de desarrollo limpio, trabajo en conjunto con la industria privada, planes de reforestación, entre otros, por lo tanto es un hecho real el cual requiere de los medios, tecnología y la evaluación de alternativas para poder revertir en parte esta situación, por lo que hay que preguntarse ¿cómo se puede mejorar esta situación? y ¿qué beneficios se pueden conseguir evaluando todas las opciones en el largo plazo?

2. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Un mundo cada vez más consciente del medio ambiente, y considerando que las consecuencias del cambio climático se han vuelto cada vez más visibles en nuestro entorno, es importante comenzar a generar medidas para combatir y revertir estos cambios que han ido generando las personas, ya que "las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) de la quema de combustibles fósiles y la industria comprenden aproximadamente el 90% de las emisiones que provoca la humanidad" (Jackson, et al., 2017), y según Le Quéré et al. (2017) señala que a fines del año 2017 se produjo un 2% de incremento de las emisiones de este gas, en comparación a tres años anteriores donde no se habían registrado incrementos, sino más bien se mantenía estable el valor de las emisiones de CO_2.

Se debe tener en consideración que Chile es un país propenso a sufrir las consecuencias de la liberación excesiva de gases de efecto invernadero, tal como lo menciona la Organización de Naciones Unidas (1995), que contextualiza a Chile como un país vulnerable debido a que cuenta con áreas de bajo nivel costero, con una variada geografía y que presenta zonas urbanas con contaminación atmosférica. Tomando en consideración lo mencionado anteriormente es que se debe tomar un rol protagónico debido a las circunstancias que puede deparar el futuro, y es por esto que en base al acuerdo de Paris, Chile se compromete a reducir sus emisiones de CO_2 en un 30% por unidad de PIB con financiamiento propio, como lo expone el Ministerio de Medio Ambiente (2015).

Es por esto que organismos internacionales se han encontrado desarrollando tecnologías de captura y almacenamiento de carbono, con el fin de mitigar las emisiones de la industria y las plantas de generación eléctrica, si bien este tipo de acciones se realizan en algunas empresas de Estados Unidos y Europa, no es altamente conocida ni mucho menos

masificada debido a los costos en los que se debe incurrir como se propone en el trabajo de Gutierrez, Vigil &Burgos (2014). Si bien la tecnología existe, aún se encuentra en constante iteración y estudio de cómo va a reaccionar el carbono respecto a sus propiedades físicas con el método que se aplique para poder evitar que se siga liberando excesivamente al ambiente, es por esto que se habla de una captura selectiva de CO_2 dependiendo del resultado que se desea conseguir y del tipo de industria en que se aplica el proceso (Silvestre-Albero, Silvestre-Albero, Casco & Reinoso, 2014).

En base a lo anterior, es que el trabajo para cumplir con los compromisos que se propone Chile al aceptar los acuerdos internacionales debe ir de la mano con la voluntad de las empresas nacionales, es por esto que dentro del mundo privado existen iniciativas para contribuir a la sustentabilidad, con el fin de reducir su huella de carbono con procesos productivos menos contaminantes, esto porque entienden que si no actúan en el corto plazo a futuro las consecuencias serán irreversibles (La Tercera, 2015).

Es por esto, que en base a todo lo mencionado nace la interrogante de si ¿las acciones qué se están realizando en el extranjero pueden replicarse en nuestro país?, en ¿qué costos asociados hay que incurrir para realizar la inversión en el plano empresarial?, ¿cómo generar los fondos para ayudar en su fomento en la industria? y ¿qué clase de empresas son las más adecuadas para realizar una primera implementación?

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Desarrollar una propuesta de factibilidad para la implementación de sistemas de captura, uso y almacenamiento de carbono (CCUS) en Chile, mediante el análisis de los desafíos impuestos como país y a nivel mundial para reducir las emisiones de gases en la industria, basándose en proyectos similares y la experiencia internacional en esta área.

3.2 Objetivos Específicos

Identificar las consecuencias que trae para Chile el ritmo actual de emisiones de carbono en el mundo, con el fin de determinar la relevancia de este tema para el país.

Analizar los distintos tipos de tecnología en el área que se han ido desarrollando en los últimos años, para poder discernir cual es la más efectiva y adecuada para Chile.

Definir qué tipo de industria es idónea para realizar pruebas piloto de implementación de sistemas de captura y almacenamiento de CO_2, con el fin de generar un impacto relevante en el rubro.

Determinar las posibles fuentes de financiamiento disponibles tanto nacionales como internacionales, con el fin de incentivar la adopción de sistemas CCUS en la industria chilena.

4. MARCO TEÓRICO

4.1 Cambio climático

El cambio climático se ha convertido en uno de los grandes desafíos que debe hacer frente la humanidad actual. Dentro de la comunidad científica existe el consenso de que es un hecho real, causado por la acción del hombre, provocada a través de las excesivas emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). El Grupo intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC), indica que "la influencia humana en el sistema climático es clara y va en aumento, y sus impactos se observan en todos los continentes. Si no se le pone freno, el cambio climático hará que aumente la probabilidad de impactos graves, generalizados e irreversibles en las personas y los ecosistemas. Sin embargo, existen opciones para la adaptación al cambio climático y con actividades de mitigación rigurosas, se puede conseguir que los impactos provocados permanezcan en un nivel controlable, creando un futuro más claro y sostenible" (2014).

Para limitar el calentamiento global en la superficie a no más de 2℃, respecto de la época pre-industrial, se requerirán fuertes reducciones de las emisiones de estos gases a la atmosfera, lo que supondrá un importante reto tecnológico, económico, institucional y de comportamiento, involucrando a toda la humanidad (Ministerio de Medio Ambiente, 2017).

Si bien el cambio climático afecta de forma diferente a cada país, hay que conocer cómo afecta a Chile, ya que según la ONU es uno de los países más propensos a recibir los efectos de este fenómeno.

4.2 Impactos del cambio climático en Chile

Chile es un país altamente vulnerable al cambio climático, cumpliendo con la mayoría de los nueve criterios de vulnerabilidad enunciadas por La convención Marco de las Naciones

Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), los cuales son: posee áreas costeras de baja altura, zonas áridas y semiáridas, zonas de bosques, territorio susceptible a desastres naturales, áreas propensas a sequías y desertificación, zonas urbanas con problemas de contaminación atmosférica y ecosistemas montañosos (Organización de Naciones Unidas, 1995).

En base a lo anterior, se presentan los principales efectos del cambio climático en el país:

Temperatura: Los datos históricos registran aumentos de las temperaturas en el valle central y la cordillera, en tanto que las estaciones costeras indican un leve enfriamiento, aunque sin significancia estadística. Los estudios indican que a futuro se experimentaría un aumento de las temperaturas en todo el país, siendo mayor en la zona norte (Quintana & Aceituno, 2012). Hacia el año 2030, habría un aumento de, a lo menos, 0,5℃ para las zonas sur y austral y de 1,5℃ para el norte grande y el altiplano, según el escenario de menores emisiones de GEI.

Precipitaciones: En la zona centro-sur del país, se ha observado una disminución estadísticamente significativa de las precipitaciones (Quintana & Aceituno, 2012). Hacia el año 2030, se proyecta una disminución de la precipitación entre 5% y 15%, para la zona comprendida entre las cuencas de los ríos Copiapó y Aysén. Para el período 2031-2050, se intensificará la disminución de las precipitaciones en el país (Ministerio de Medio Ambiente, 2017).

Eventos climáticos extremos: Se espera un marcado aumento de los eventos de sequía (se considera una sequía, cuando existen dos años consecutivos con precipitaciones anuales menores al percentil 20 de una línea base), especialmente a partir de la segunda mitad del

siglo XXI, proyectándose hacia fines de siglo una ocurrencia de más de 10 veces en 30 años (CEPAL, 2009).

Por su condición de país altamente vulnerable al cambio climático, se estima que en Chile las pérdidas ambientales, sociales y económicas por este fenómeno podrían llegar a ser significativas, alcanzando al año 2100, un 1,1% anual del PIB (CEPAL, 2009). La biodiversidad, recursos hídricos, infraestructura construida y los sectores económicos pueden verse negativamente afectados dentro de este siglo.

4.3 Fuentes de emisión de gases de efecto invernadero

La preocupación por la emisión de gases de efecto invernadero ha ido en aumento a nivel mundial, debido a los efectos irreparables que está provocando en el mundo su excesiva liberación al ambiente, es por esto que la Organización de Naciones Unidas (2016) detalla algunas de las fuentes de emisión de estos contaminantes y las soluciones que se plantean a nivel continental.

4.3.1 África

La contaminación del aire en espacios cerrados constituye uno de los principales problemas del continente africano, pues causa una cifra aproximada de 600.000 muertes al año. Debido a su dependencia del uso de la biomasa como fuente de energía para las cocinas, la iluminación y la calefacción, el 90% de la población de la región se halla expuesta a este daño. El aumento de la urbanización, la industrialización, la motorización y las emisiones de polvo mineral procedente de los desiertos han incrementado la contaminación del aire en espacios abiertos en África. Asimismo, el transporte transfronterizo, la dispersión y la deposición final de los contaminantes contribuyen a elevar los niveles de este tipo de contaminación en la región.

La gestión de las zonas forestales, los cambios en el uso del suelo y el tipo de vegetación son los principales factores que determinan las emisiones de gases de efecto invernadero, como el CO_2 y el metano. Si bien se han realizado estudios para poder determinar con exactitud cuánto es el aporte real a nivel mundial, los resultados conseguidos siguen teniendo un alto grado de incertidumbre debido a que es necesaria una mayor colaboración internacional tanto en el ámbito científico y académico, como en el socioeconómico (Servicios de información y noticias científicas, 2017).

4.3.2 Asia y el Pacífico

Se redujeron las emisiones de dióxido de azufre y de óxido de nitrógeno, pero las concentraciones de ozono y partículas finas (contaminantes climáticos de corta vida como el carbono negro) han seguido aumentando. La contaminación transfronteriza en forma de neblina y humo —derivada de la quema de biomasa al aire libre y las prácticas inadecuadas de uso de la tierra— se está convirtiendo en el principal problema para la calidad del aire en la región de Asia Sudoriental y pone de manifiesto el carácter urgente de las soluciones multilaterales y la cooperación regional. La contaminación del aire en espacios cerrados causada por la quema de biomasa o de combustibles de mala calidad perjudica la salud de la población.

La senda de desarrollo adoptada en la región genera grandes cantidades de emisiones de dióxido de carbono, cuyos niveles resultan peligrosos para la vida y, además, perturban el clima a escala global. Los sectores que más oportunidades ofrecen para descarbonizar las economías son la energía, las infraestructuras, las ciudades y los transportes. La eficiencia energética es posible si se combina la gestión de la demanda de energía con una reglamentación e instrumentos económicos. En general, las estrategias de descarbonización

conducirán a la innovación tecnológica, el desarrollo empresarial y la creación de empleo, por lo que contribuyen al desarrollo socioeconómico en un sentido más amplio.

4.3.3 Europa

Las emisiones de gases de efecto invernadero se han mantenido estables o se han reducido en la Unión Europea, pero están aumentando en la región suroriental. Las emisiones han disminuido en la mayoría de los sectores, principalmente gracias a mejoras en la eficiencia de la industria, con la excepción del transporte, la refrigeración y la climatización. Deben adoptarse más medidas de mitigación específicas para los sectores del transporte, la agricultura, la energía y las materias primas como parte de la transición a una economía circular[1].

La calidad del aire es el principal riesgo para la salud de la población europea, con efectos desproporcionados en los niños, los ancianos y las personas pobres. En 2012, la calidad del aire en espacios abiertos causó más de 500.000 muertes prematuras en la región y la calidad del aire en espacios cerrados cobró otras 100.000 vidas de forma prematura. Más del 95% de la población urbana está expuesta a niveles de contaminación superiores a los establecidos en las directrices de la Organización Mundial de la Salud (2005). Se debe adoptar medidas políticas integradas en materia de calidad del aire y clima. Las políticas deben asimismo dar prioridad a los cambios en los estilos de vida y las medidas de eficiencia, y a la reducción de las emisiones desde el origen y los riesgos emergentes.

[1] La economía circular es un modelo económico, que se caracteriza por su contribución a la reducción al mínimo de la generación de residuos, incidiendo en una disminución de emisiones de CO_2; a la vez que genera más eficiencia en el uso de los recursos incrementando la competitividad. Es un proceso centrado en las "3R" (Reducir, Reutilizar y Reciclar) desde el diseño, a la fabricación, transporte, almacenamiento y consumo del producto implicando a todos los agentes: proveedores, productores, distribuidores y consumidores (Universidad de Chile, 2016).

4.3.4 América Latina y el Caribe

La calidad del aire ha empeorado en las ciudades y, en la mayoría de aquellas sobre las que hay datos disponibles, las concentraciones de material particulado y ozono se sitúan por encima de los niveles establecidos en las directrices de la Organización Mundial de la Salud (2005). Esto incrementa la vulnerabilidad de sus habitantes a las enfermedades respiratorias; y más de 100 millones de personas en la región viven en zonas expuestas a la contaminación atmosférica.

En la actualidad, la región de América Latina y el Caribe tan solo producen el 5% de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero; no obstante, su contribución a las cifras mundiales está aumentando, a consecuencia sobre todo de las demandas impuestas por el sector industrial y el del transporte. De acuerdo con el Banco Mundial (2015), las emisiones de dióxido de carbono procedentes de la quema de combustibles fósiles y la fabricación de cemento en la región aumentaron en términos absolutos (+14,18%) a lo largo del período de 2006 a 2011, aunque su proporción en relación con el producto interno bruto (PIB) ha disminuido.

El análisis de escenarios revela la probabilidad de que América Latina y el Caribe continúen siendo la región con el menor contenido de carbono de cualquier combinación de tipos de energía regional hasta 2050. No obstante, los datos actuales muestran que los sistemas de la región ya se hallan sometidos a presión por los cambios en el clima mundial, y se espera que estas tendencias se acentúen.

4.3.5 América del Norte

Las condiciones ambientales en América del Norte han mejorado significativamente con el tiempo gracias a la inversión en las políticas, las instituciones, la recopilación y la evaluación de los datos, y los marcos regulatorios.

La calidad del aire en la región sigue mejorando a consecuencia de la acción política concertada en estos países y las tendencias favorables en el mercado tecnológico y energético. Los esfuerzos regionales, nacionales y locales por mejorar la calidad del aire están reportando beneficios sustanciales, mensurables e importantes para la salud pública, cuyo valor se estima en torno a los 2 billones de dólares. No obstante, la distribución de las mejoras en la calidad del aire no es uniforme, y cerca de 140 millones de personas se hallan expuestas a niveles de contaminación por encima de los umbrales definidos por la normativa.

Los impactos del cambio climático en toda la región están afectando a diversos aspectos del medio ambiente, además de a la salud y bienestar del ser humano y, en algunos casos, a su seguridad. Canadá y los Estados Unidos han acordado desempeñar un papel de liderazgo internacional en la economía mundial con bajas emisiones de carbono durante los próximos decenios a través de medidas con base científica orientadas a la protección del Ártico y sus pueblos, así como del trabajo conjunto para implementar el histórico Acuerdo de París, entre otras acciones.

Las iniciativas para mitigar el cambio climático mediante la reducción de las emisiones de los gases de efecto invernadero y la intensificación del secuestro del carbono están empezando a dar resultados tangibles y a sentar las bases para que se produzcan avances potenciales de gran envergadura.

4.4 ¿Qué es el dióxido de carbono?

El CO_2 (dióxido de carbono), también conocido como anhídrido carbónico, es un gas cuya molécula está compuesta por dos átomos de oxígeno y uno de carbono. Es soluble en agua cuando la presión se mantiene constante y normalmente se encuentra en la naturaleza en forma gaseosa, pero cuando se le somete a una presión y temperatura considerablemente baja se vuelve líquido.

El dióxido de carbono es un compuesto no tóxico en bajas cantidades, no inflamable y abundante en la naturaleza, y dadas sus propiedades físicas y químicas se utiliza desde hace muchos años en la industria alimentaria.

Se piensa erróneamente que el CO_2 es un compuesto dañino y nocivo para la salud, pero por sí solo no es dañino, sino que es esencial para el ciclo biológico de plantas y cosechas, por lo tanto, es altamente beneficioso y necesario para la vida en el planeta (Rodríguez, 2012).

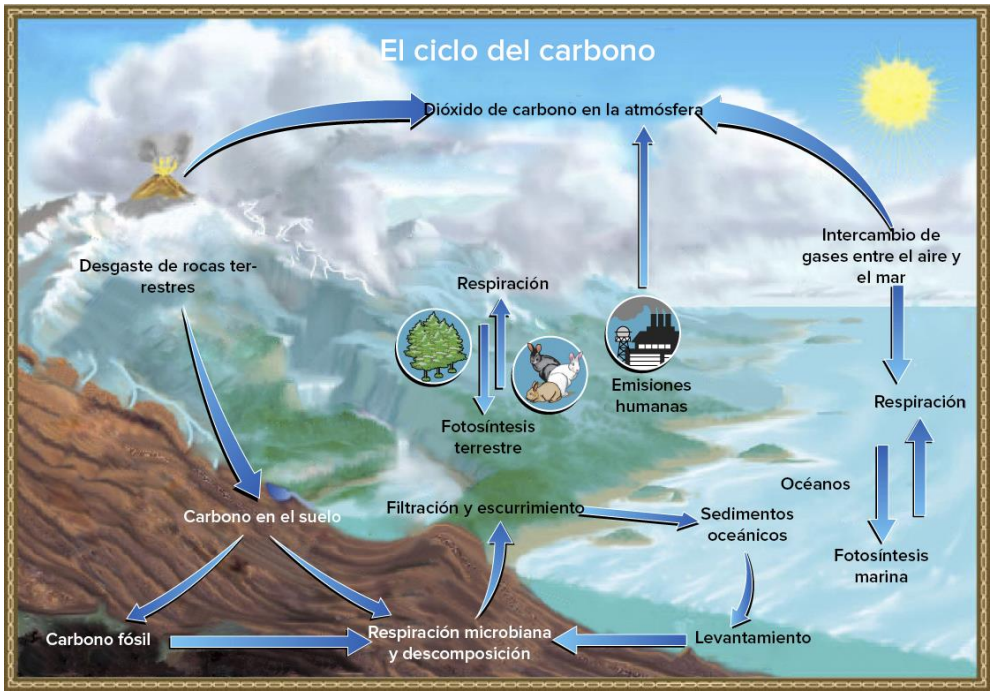


Figura 1: *Ciclo del carbono en la atmósfera terrestre.* ***Fuente:*** *Khan Academy, 2017.*

4.5 Emisión de dióxido de carbono a la atmosfera

Desde la Revolución Industrial las emisiones a la atmosfera han crecido exponencialmente pues en ese tiempo comenzaron a quemarse masivamente los hidrocarburos para obtener energía.

El World Resources Institute (2012) desgloso un ranking de países que emiten más CO_2 a la atmosfera y los ha dividido por sectores, qué rubro de esos países es su principal emisor de carbono y de qué forma (como la agricultura, la industria, energía).

Los 10 países que más gases de efecto invernadero provocan, generan el 72% del total. Por su parte los 100 países que menos emisiones arrojan solo provocan el 3% de ellos.

A continuación, se muestran los más grandes emisores de CO_2 del planeta:

País	% de emisiones de CO_2 a la atmosfera
China	25,36
Estados Unidos	14,4
Unión Europea	10,16
India	6,96
Rusia	5,36
Japón	3,11
Brasil	2,4
Indonesia	1,76
México	1,67
Irán	1,65

Tabla 1: *Principales países emisores de dióxido de carbono.* ***Fuente:*** *Ecoosfera (2015).*

El sector energético es la fuente dominante de emisiones de gases de efecto invernadero y aporta más del 75 por ciento de las emisiones globales de estos gases. Y seis de los 10 principales emisores son países en desarrollo. Según los datos, China contribuye con aproximadamente el 25 por ciento de las emisiones globales, lo que lo convierte en el principal emisor. India, Indonesia, Brasil, México e Irán también contribuyen con una

proporción relativamente grande de las emisiones globales a medida que crecen sus economías (World Resources Institute, 2015).

A continuación, se muestra de forma gráfica los datos históricos de emisiones de gases de efecto invernadero y las emisiones de CO_2, donde se observa un aumento constante a través de los años de gases liberados al ambiente, se conforma la información con datos de 196 países (CAIT Climate Data Explorer, 2017)

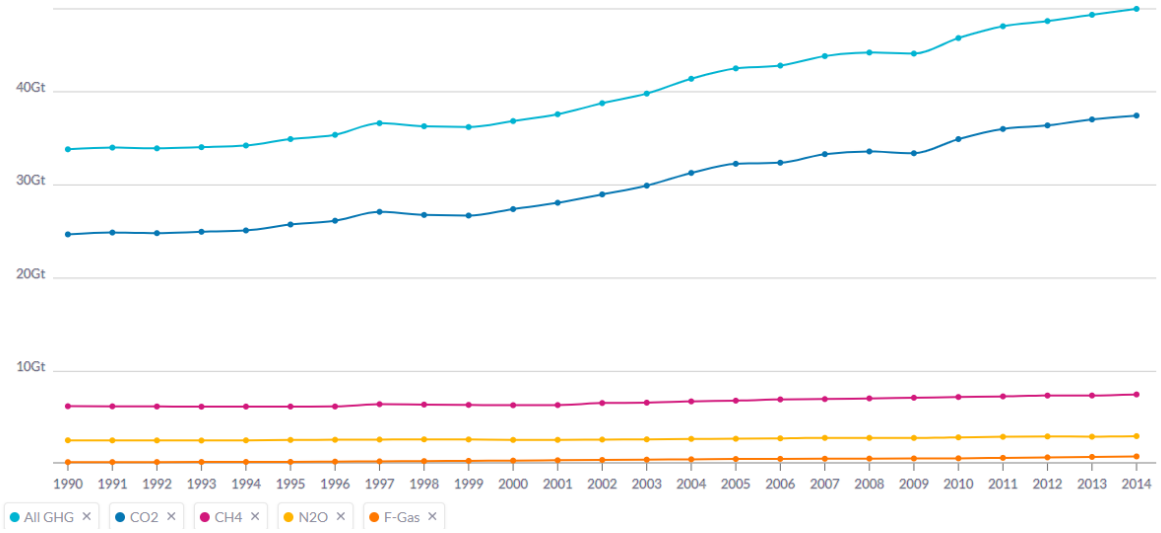


Gráfico 1: *Emisiones de gases de efecto invernadero entre 1990-2014.* ***Fuente:*** *CAIT Climate Data Explorer, 2017.*

Ahora, desglosando la información solo para América Latina que se señala cómo la región de menos emisión de gases de efecto invernadero y por lo tanto de CO_2, se cuenta con Brasil y México que aparecen en el listado de los principales 20 (CNN Español, 2017).

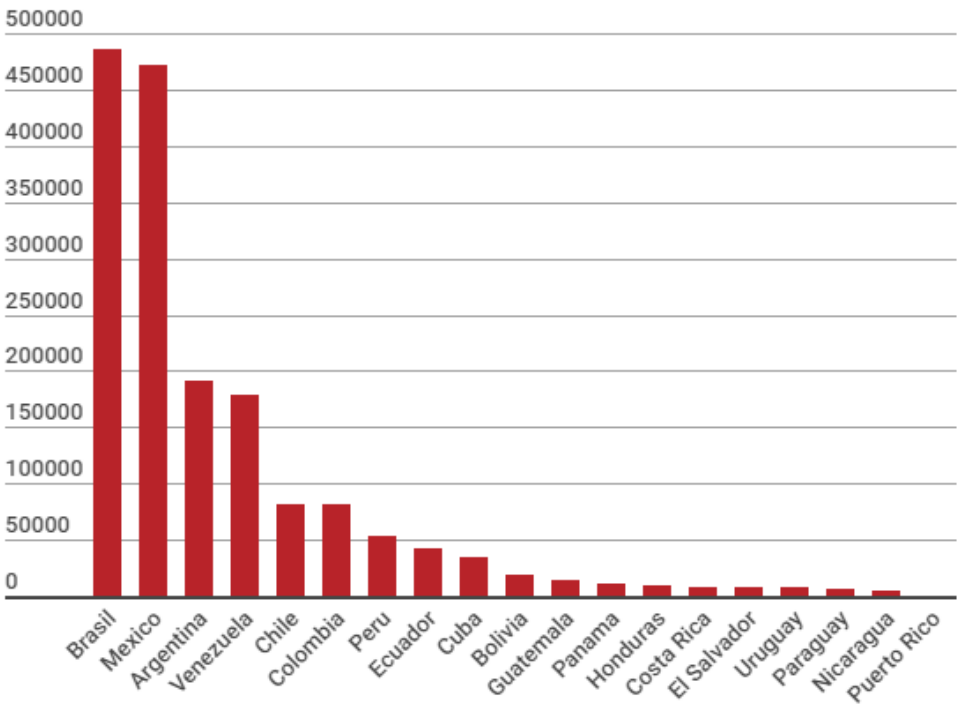


Gráfico 2: *Emisiones de dióxido de carbono para países de América Latina en millones de kilotones.* ***Fuente:*** *CNN Español, 2017.*

4.6 Acuerdos internacionales para combatir el cambio climático

Si bien el cambio climático viene siendo un tema que toma cada vez mayor importancia en la agenda de los distintos países, han habido acuerdos para poder alcanzar y trazar objetivos claros y concretos, para poder mantener las condiciones de vida como la conocemos, y así existir ayuda cooperativa entre los involucrados, tanto a nivel de conocimiento como económico.

4.6.1 Protocolo de Montreal

El objetivo principal del Protocolo de Montreal es la protección de la capa de ozono mediante la toma de medidas para controlar la producción mundial de sustancias que la agotan, con el objetivo final de eliminarlas. Este protocolo exige el control de casi 100 sustancias químicas en varias categorías, dependiendo de en qué categoría se encuentre, el

tratado establece un calendario para la eliminación gradual de la producción y el consumo de esas sustancias.

El calendario de eliminación de los HCFC se creó en 1992 para los países desarrollados y países en desarrollo, este último con una congelación en 2015, con eliminación completa en 2030 en los países desarrollados y en 2040 en los países en desarrollo.

La aplicación del Protocolo de Montreal ha progresado bien en los países desarrollados y países en desarrollo. Todos los calendarios de eliminación se han respetado en la mayoría de los casos, algunos incluso antes de lo previsto. En vista del progreso constante realizado en el marco del Protocolo, ya en 2003, el ex Secretario General Kofi Annan declaró: «Tal vez el acuerdo internacional más exitoso hasta la fecha ha sido el Protocolo de Montreal» (Organización de Naciones Unidas, 2018).

4.6.2 Protocolo de Kioto

El Protocolo de Kioto es un convenio de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático, y un tratado internacional cuyo objetivo principal es lograr la disminución en la liberación de gases de efecto invernadero, que originan el calentamiento global, como lo son el dióxido de carbono (CO_2), óxido nitroso (N_2O) y gas metano (CH_4); además de los gases industriales fluorados, como por ejemplo los perfluorocarbonos (PFC), los hidrofluorocarbonos (HFC) y el hexafluoruro de azufre, en al menos un 5%.

El Protocolo de Kioto fue aprobado el 11 de diciembre de 1997, en Kioto (Japón), pero no fue hasta 2005 que entró en vigencia. Además de la disminución de los gases de efecto invernadero que provocan el cambio climático, se promovió la idea de un desarrollo

sostenible, de tal manera que también se puedan emplear energías no convencionales y así poder reducir aún más el calentamiento global.

Las actividades a las cuales se les exige reducir sus emisiones de gases son el refinamiento de los hidrocarburos, la calcinación de los minerales metálicos, la fabricación de cemento, la generación de electricidad, la producción de acero, la fabricación de vidrio, así como la elaboración de productos cerámicos (General, 2015).

Algunos artículos referidos en el Protocolo de Kioto atingentes con la captura y almacenamiento del dióxido de carbono, son los siguientes (Organización de Naciones Unidas, 1997):

Artículo 2:

Protección y mejora de los sumideros y depósitos de los gases de efecto invernadero no controlados por el Protocolo de Montreal, teniendo en cuenta sus compromisos en virtud de los acuerdos internacionales pertinentes sobre el medio ambiente; promoción de prácticas sostenibles de gestión forestal, la forestación y la reforestación;

Investigación, promoción, desarrollo y aumento de del uso de formas nuevas y renovables de energía, de tecnologías de secuestro de carbono y de tecnologías avanzadas y novedosas que sean ecológicamente racionales.

Artículo 10:

Cooperarán en la promoción de modalidades eficaces para el desarrollo, la aplicación y la difusión de tecnologías, conocimientos especializados, prácticas y procesos ecológicamente racionales en lo relativo al cambio climático, y adoptarán todas las medidas viables para promover, facilitar y financiar, según corresponda, la transferencia de esos recursos o el acceso a ellos, en particular en beneficio de los países en desarrollo […].

Artículo 12:

La reducción de emisiones resultante de cada actividad de proyecto deberá ser certificada por las entidades operacionales que designe la Conferencia de las Partes en calidad de reunión de las Partes en el presente Protocolo sobre la base de: Unos beneficios reales, mensurables y a largo plazo en relación con la mitigación del cambio climático.

4.6.3 Acuerdo de Paris

El Acuerdo de Paris fue firmado en 2015 y adoptado por 195 países, donde se intenta trazar un camino hacia un mundo sostenible mediante los cambios drásticos que está viviendo la humanidad.

El objetivo de este acuerdo es contener el aumento de temperatura por debajo de los $2\ [°C]$ respecto a la era preindustrial y de esforzarse por limitar este aumento a $1{,}5\ [°C]$. El acuerdo no especifica metas obligatorias para los 195 países, como sí lo hace el protocolo de Kioto. Cada gobierno se fija a sí mismo sus propios objetivos de reducción de emisiones para el 2025 o 2030 (Aste, 2017).

Algunos artículos referidos en el Acuerdo de Paris donde se refieren a la captura y almacenamiento del dióxido de carbono, son los siguientes (Organización de Naciones Unidas, 2015):

Artículo 2:

Mantener el aumento de la temperatura media mundial por debajo de $2\ [°C]$ con respecto a los niveles preindustriales, y proseguir los esfuerzos para limitar ese aumento de la temperatura a $1{,}5\ [°C]$ con respecto a los niveles preindustriales, reconociendo que ello reduciría considerablemente los riesgos y los efectos del cambio climático;

Aumentar la capacidad de adaptación a los efectos adversos del cambio climático y promover la resiliencia al clima y un desarrollo con bajas emisiones de gases de efecto invernadero, de un modo que no comprometa la producción de alimentos, entre otros […]

Artículo 4:

Todas las Partes deberían esforzarse por formular y comunicar estrategias a largo plazo para un desarrollo con bajas emisiones de gases de efecto invernadero, teniendo presente el artículo 2 y tomando en consideración sus responsabilidades comunes pero diferenciadas y sus capacidades respectivas, a la luz de las diferentes circunstancias nacionales.

Artículo 6:

Por el presente se establece un mecanismo para contribuir a la mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero y apoyar el desarrollo sostenible, que funcionará bajo la autoridad y la orientación de la Conferencia de las Partes en calidad de reunión de las Partes en el presente Acuerdo y podrá ser utilizado por las Partes a título voluntario. Además, se tendrá por objeto o siguiente:

- Promover la mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero, fomentando al mismo tiempo el desarrollo sostenible.
- Incentivar y facilitar la participación, en la mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero, de las entidades públicas y privadas que cuenten con la autorización de las Partes.
- Contribuir a la reducción de los niveles de emisión en las Partes de acogida, que se beneficiarán de actividades de mitigación por las que se generarán reducciones

de las emisiones que podrá utilizar también otra Parte para cumplir con su contribución determinada a nivel nacional.

Artículo 10:

Para dar una respuesta mundial eficaz y a largo plazo al cambio climático y promover el crecimiento económico y el desarrollo sostenible es indispensable posibilitar, alentar y acelerar la innovación. Este esfuerzo será respaldado como corresponda, entre otros por el Mecanismo Tecnológico y, con medios financieros, por el Mecanismo Financiero de la Convención, a fin de impulsar los enfoques colaborativos en la labor de investigación y desarrollo y de facilitar el acceso de las Partes que son países en desarrollo a la tecnología, en particular en las primeras etapas del ciclo tecnológico.

4.7 Mercados de Carbono

Debido a la presencia de gases de efecto invernadero en la atmósfera, cada vez son más las acciones que se llevan a cabo con el fin de contrarrestar y frenar sus efectos, es por esto que una medida viable ha sido el mercado de carbono, que permite limitar y controlar la cantidad de CO_2 y otros gases de efecto invernadero que se emiten actualmente. Sin embargo, se ha considerado que se trata de una medida destinada a reducir el impacto del cambio climático, que a combatirlo como tal (Arriols, 2018).

Según indica la Fundación de Ecología y Desarrollo (2009), ECODES por sus siglas en inglés, los mercados de créditos de carbono son sistemas de comercio a través de los cuales gobiernos, empresas o individuos pueden vender o adquirir reducciones de emisiones de gases de efecto invernadero.

Este comercio se basa en dos puntos principales:

- No importa cuán distante sean los países en la transacción, el efecto de reducción de CO_2 tiene un efecto global. Por lo tanto, se permiten transacciones entre países muy distantes geográficamente.
- En términos ambientales, no es tan importante si se reducen las emisiones hoy o en unos años. Dado el tiempo de permanencia de los GEI en la atmósfera; el efecto ambiental de evitar las emisiones el día de hoy o en unos años es el mismo, siempre y cuando realmente se evite la emisión.

El mercado de carbono está dividido en el mercado de conformidad y el mercado voluntario. El mercado de conformidad está regido por el Protocolo de Kioto bajo la Convención Marco de las Naciones para el Cambio Climático (UNFCCC). El mercado voluntario en cambio no está regulado bajo el Protocolo de Kioto.

4.7.1 El mercado de conformidad

Bajo el Protocolo de Kioto, los países que se adscribieron, adicionalmente a las políticas y medidas domésticas para la reducción de emisiones, pueden alcanzar sus metas de reducción de emisiones mediante los siguientes mecanismos internacionales de flexibilidad:

- El comercio de emisiones.
- Transacciones basadas en proyectos, como el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) y La Implementación Conjunta (IC).

El comercio de derechos de emisión, permite la compra venta de las emisiones creadas y asignadas a los países integrantes del Protocolo de Kioto. Estos derechos representan cantidades de emisión que se podrían liberar sin incurrir en una falta con las metas de reducción establecidas bajo este protocolo. El emitir menos de lo permitido, deja

un margen de permisos de emisión (o derechos de emisión) que pueden ser vendidos a otros países que, por varias razones, no lograron emitir menos de lo establecido.

Por otro lado, las transacciones basadas en proyectos consisten en la comercialización de las reducciones de emisiones cuantificadas en un proyecto. Acá destaca el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL).

El mecanismo de Desarrollo Limpio permite a los países desarrollados acreditar las reducciones de Gases de Efecto invernadero a través de proyectos realizados en países en desarrollo como si fueran generados en su mismo territorio. Los proyectos deben cumplir con el requisito de adicionalidad. Para ello, el artículo doce del Protocolo de Kioto especifica que las reducciones de emisiones certificadas (Certified Emissions Reductions, CERs) pueden ser emitidas por un proyecto siempre y cuando las reducciones calculadas de emisiones de gases de efecto invernadero que este generará, sean adicionales a cualquier reducción que se hubiese producido en ausencia de la actividad del proyecto. Asimismo, las reglas establecen que los proyectos deben cumplir ciertos requisitos, a fin de calificar para una actividad del tipo mecanismo de desarrollo limpio. Estos requisitos incluyen el cumplimiento de los criterios de presentación y desarrollo del proyecto, el proceso de registro y validación del proyecto, los requisitos de monitoreo, verificación y certificación de las reducciones, y las reglas que gobiernan la emisión de certificados (Ministerio de Medio Ambiente, 2010).

Figura 2: *Ciclo del Mecanismo de Desarrollo Limpio.* ***Fuente:*** *Organización de Naciones Unidas (2013).*

4.7.2 El mercado voluntario

El Mercado Voluntario de Carbono consiste en diversas transacciones individuales negociadas por ciudadanos particulares, organizaciones privadas o públicas. Los actores mencionados participan activamente por su voluntad de tomar conciencia y responsabilidad por las emisiones de gases de efecto invernadero que producen y buscan propuestas de mayoristas o expertos especializados en los créditos de compensación de carbono, que en su caso pueden ser organizaciones de lucro u ONG que ofrecen cierto rango de proyectos de

energía renovable, tecnologías limpias y eficiencia energética o proyectos forestales (Fundación de Ecología y Desarrollo, 2009).

Los sistemas de certificación y estándares en el mercado voluntario se pueden dividir en dos grupos:

1) Aquellos que tienen el propósito de certificar la calidad de las compensaciones y los proyectos que las generan (The Voluntary Carbon, The Gold Estándar, Plan Vivo, Social Carbon, etc.).
2) Aquellos que se concentran más en certificar a los vendedores de compensaciones, productos, servicios y/o reclamos de neutralidad de carbón realizado por individuos o instituciones (Climate Neutral Network, European Carbon Investor Services, etc.).

4.7.2.1 The Gold Standard

Fundación de Ecología y Desarrollo (2009) detalla que, el Gold Standard es una fundación sin ánimo de lucro y regida por la ley suiza que ofrece un sello de calidad a proyectos MDL, IC y proyectos de compensación voluntaria. Esta fundación exige a los proyectos el cumplimiento de unos criterios más estrictos de lo usual en términos de adicionalidad y sostenibilidad. Su objetivo es promover el desarrollo sostenible en países en vía de desarrollo, sin generar emisiones adicionales y a un coste reducido. Especialmente en los mercados voluntarios, el Gold Standard garantiza que la compensación de emisiones representa un cambio real en términos de reducción de emisiones y de contribución al desarrollo sostenible. Los objetivos del Gold Standard son, por lo tanto:

• Aumentar la inversión en proyectos de energía sostenible.

• Asegurar que se generen contribuciones significativas y duraderas al desarrollo sostenible.

• Certificar que las inversiones tienen integridad ambiental.

• Aumentar el respaldo público para proyectos de energía renovable y eficiencia energética.

El Gold Standard reduce los riesgos de proyectos y los riesgos relacionados con el proceso de generación de bonos gracias a que el conjunto de procedimientos y requerimientos exigidos son los más altos en el mercado de carbono. Las estimaciones de reducciones de emisiones son muy conservadoras. El Gold Standard también certifica beneficios secundarios para la población local como mejoras en el medio ambiente y generación de empleo. El valor en el mercado de los créditos generados bajo el Gold Standard es más alto que el de otros estándares, ya que su reputación en el mercado es la más alta. También mantiene un registro (el GS-registry) que clasifica todos los proyectos Gold Standard y a través del cual es posible transferir créditos de un modo transparente. Este registro funciona desde abril de 2008.

4.7.2.2 Verified Carbon Standard

Según señala VERRA (2018), el programa Verified Carbon Standard (VCS) es el programa voluntario de gases de efecto invernadero (GEI) más utilizado en el mundo. Casi 1500 proyectos VCS certificados han reducido o eliminado más de 200 millones de toneladas de carbono y otras emisiones de GEI a la atmósfera.

Al utilizar los mercados de carbono, las entidades pueden neutralizar o compensar sus emisiones retirando los créditos de carbono generados por proyectos que están reduciendo las emisiones de GEI en otros lugares. Por lo que es crítico asegurar o verificar que las reducciones de emisiones generadas por estos proyectos realmente estén ocurriendo. Verified

Carbon Standard se encarga de garantizar la credibilidad de los proyectos de reducción de emisiones.

Una vez que los proyectos han sido certificados según el conjunto de reglas y requisitos del Programa VCS , a los desarrolladores de proyectos se les pueden otorgar créditos de gases de efecto invernadero negociables que se llaman Unidades de Carbono Verificadas (VCU) . Esos VCU pueden ser vendidos en el mercado abierto y retirados por individuos y compañías como un medio para compensar sus propias emisiones. Con el tiempo, esta flexibilidad canaliza el financiamiento a empresas y tecnologías limpias e innovadoras.

El rol de Verra es desarrollar y administrar el programa. El desarrollo del Programa VCS está respaldado por el VCS Program Advisory Group , un organismo de múltiples partes interesadas que ayuda a garantizar que el Programa Verified Carbon Standard continúe brindando servicios a sus usuarios de manera eficaz y eficiente, e impulse soluciones prácticas y sólidas para mitigar el cambio climático.

Los proyectos desarrollados en el marco del Programa Verified Carbon Standard deben seguir un riguroso proceso de evaluación para poder ser certificados. Los proyectos VCS cubren una amplia gama de sectores, incluyendo las energías renovables (como los proyectos eólicos e hidroeléctricos), la silvicultura (incluida la prevención de la deforestación) y otros. Las reducciones de emisiones certificadas por los programas son elegibles para ser emitidas como VCU, con un VCU que representa una tonelada métrica de emisiones de gases de efecto invernadero reducidas o eliminadas de la atmósfera.

Todos los proyectos VCS están sujetos a auditorías de escritorio y de campo por parte de terceros independientes calificados y el personal de Verra para garantizar que se cumplan las normas y se apliquen las metodologías de manera adecuada.

El sistema de registro, es el almacén central de datos de todos los proyectos registrados y rastrea la generación, retiro y cancelación de todas las VCU. Para registrarse en el programa, los proyectos deben demostrar que han cumplido con todos los estándares y requisitos metodológicos.

Si bien los proyectos VCS suelen incluir un conjunto discreto de actividades, los gobiernos ahora están estableciendo políticas y programas para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero en todas las jurisdicciones nacionales o subnacionales.

Figura 3: *Proceso de acreditación de una metodología Verified Carbon Standard.* ***Fuente:*** *VERRA, 2018.*

4.8 ¿Qué son los métodos CCUS y qué se busca con su aplicación?

La captura de carbono, desde sus etapas, hasta que tipo de dióxido de carbono es apto para poder aplicar las distintas tecnologías fueron estudiadas por Rubin & De Coninck (2005), donde expresan lo siguiente:

La captura y almacenamiento de dióxido de carbono (CCUS), es una de las técnicas que se podrían utilizar para reducir las emisiones de CO_2 de las actividades humanas. Puede aplicarse a las emisiones de grandes centrales eléctricas o a instalaciones industriales.

El proceso implica tres pasos principales:

1- La captura de CO_2 en su origen, separándolo de otros gases producidos en un sector industrial.

2- Transporte del CO_2 capturado a una ubicación de almacenamiento adecuada (normalmente en forma comprimida).

3- Almacenar el CO_2 lejos de la atmósfera durante un largo período de tiempo, por ejemplo, en formaciones geológicas subterráneas en el océano, o bien dentro de ciertos compuestos minerales.

La mayoría de los escenarios para el uso de energía a nivel global proyectan un aumento sustancial de las emisiones de CO_2 a lo largo de este siglo. También se sugiere que el suministro de energía primaria continuará siendo dominado por los combustibles fósiles hasta al menos mediados de siglo.

Sin embargo, ninguna opción de tecnología única proporcionará todas las reducciones de emisiones necesarias para estabilizar las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera a un nivel que evite interferencias peligrosas en el sistema climático.

Otras opciones tecnológicas para estabilizar las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera incluyen:

- Reducir la demanda de energía al aumentar la eficiencia energética.
- Cambiar a combustibles menos intensivos en carbono (de carbón a gas natural, por ejemplo).
- Aumentar el uso de fuentes de energía renovables y/o energía nuclear (cada una de las cuales, en conjunto, emiten poco o nada de CO_2).
- Mejorar los sumideros naturales de carbono (como los bosques).

Por lo tanto, los mecanismos de captura y almacenamiento de CO_2 comprenden una opción súper válida para los países desarrollados que necesitan reducir sus emisiones, y que a su vez cuentan con grandes fuentes emisoras de CO_2, que permitiría sacarle provecho a la implementación de sistemas de captura, acceso a sitios de almacenamiento, y experiencia en operaciones de petróleo o gas. Pero existen a su vez, muchas barreras para los países que se encuentran en vías de desarrollo, ya que se deben difundir los mecanismos de captura y almacenamiento, y del mismo modo se requerirá de una fuerte inversión económica que no todos los países son capaces de soportar, si no se les realiza aportes monetarios.

Para capturar el CO_2, primero se separa de otros gases que resultan de la combustión o el procesamiento. Luego se comprime y se purifica para facilitar su transporte y almacenamiento.

El dióxido de carbono resultante de la combustión, particularmente en el sector eléctrico, puede capturarse usando uno de estos tres sistemas:

Sistema	Estado	% de CO_2 capturado
Post-combustión	En uso comercial, en otras aplicaciones relacionadas.	80 – 90 %
Pre-combustión	En uso comercial, en otras aplicaciones relacionadas.	80 – 90 %
Combustión de oxicombustible	Fase de demostración	90%

Tabla 2: *Tecnologías de captura de carbono y su contribución en la captura de dióxido de carbono.* ***Fuente:*** *Rubin & De Coninck (2005).*

En un sistema de post-combustión, el gas de combustión producido por la combustión del combustible con aire, solo contiene una pequeña fracción de CO_2. Se captura al inyectar los gases de combustión en un líquido que absorbe selectivamente el CO_2 (como un solvente orgánico refrigerado o comprimido). Casi puro CO_2 luego se puede liberar del líquido, generalmente calentándolo o liberando la presión. Ya se utilizan procesos de separación similares a gran escala para eliminar el CO_2 del gas natural.

En un sistema de pre-combustión, el combustible primario se convierte primero en gas calentándolo con vapor y aire u oxígeno. Esta conversión produce un gas que contiene principalmente hidrógeno y CO_2, que puede separarse fácilmente. El hidrógeno se puede utilizar para producir energía o calor.

La combustión de oxicombustible utiliza oxígeno puro para quemar el combustible en lugar de usar aire que solo contiene 20% de oxígeno y una gran cantidad de nitrógeno. Resulta en una mezcla de gases que contiene principalmente vapor de agua y CO_2. El vapor de agua se elimina fácilmente del CO_2 al enfriar y comprimir la corriente de gas. Sin embargo, para este proceso, primero se debe separar el oxígeno del aire, que es un proceso bastante complejo.

A continuación, se muestran las ventajas y desventajas de las tecnologías de captura de CO_2 (Saldívar, Cabrera & Reta, 2017):

- **Pre-combustión:**

  Ventajas:

  - Es aplicable a las centrales térmicas de carbón.
  - Comercialización de H_2 a gran escala.
  - Alta eficiencia.
  - Bajas penalizaciones de energía de captura ($\approx 10 - 15\ \%$).
  - Producción de gas de síntesis concentrado en CO_2 a alta presión.
  - Potencial de reducción de los costos/cargas de compresión.
  - Mayor fuerza motriz para la separación

  Desventajas:

  - Alta inversión de capital, debido a alto costo del equipo.
  - Experiencia insuficiente para plantas térmicas a gran escala de H_2.
  - Aplicable principalmente a plantas nuevas, ya que pocas plantas de gasificación están operando actualmente.

- **Oxicombustión:**

  Ventajas:

  - Muy alta concentración de CO_2 en los gases de combustión.
  - Simplifica la captura post-combustión.
  - Alta eficiencia.
  - Opción de reacondicionamiento tecnológico.

  Desventajas:

  - Grandes requerimientos de producción criogénica de O_2, que pueden ser costos de energía no permitidos para ciertas industrias.

- Requerimiento de enfriamiento del CO_2 reciclado para mantenerla temperatura dentro de los límites de los materiales utilizados.
- Decrecimiento de la eficiencia del proceso.

- **Post-combustión:**

  Ventajas:

  - Aplicable a la mayoría de las plantas eléctricas de carbón.
  - Opción de tecnologías de reacondicionamiento.

  Desventajas:

  - El gas de combustión esta diluido en CO_2 y se encuentra a presión ambiente.
  - Rendimiento o volumen de circulación superior requerido para altos niveles de captura.
  - El CO_2 es producido a baja presión comparado con los requerimientos de captura.

Si bien, el objetivo de realizar la captura de carbono es reducir las emisiones de dióxido de carbono al ambiente, mediante el almacenamiento de estos gases se ha logrado conseguir la recuperación mejorada del petróleo, la cual se ha comenzado a aplicar ampliamente en los yacimientos existentes. Esto debido a que el CO_2 es inyectado para ser almacenado en formaciones geológicas, y una vez que es introducido se mezcla con el petróleo existente y la mezcla se hincha en condiciones de alta presión. Dicha mezcla se mueve fácilmente, lo que aumenta la producción de petróleo, debido a que permite extraer el líquido al cual no se tenía acceso fácilmente con la maquinaria utilizada (Kwack & Kim, 2017).

4.9 Desarrollo de tecnologías y aplicaciones

China es el segundo mayor emisor de CO_2 a nivel mundial luego de Estados Unidos,

en dicho país la generación de energía representa un 73% de las emisiones totales de carbono, las fábricas de cemento contribuyen un 14%, seguido del hierro y el acero con un 7%. Existe un reconocimiento por parte del gobierno chino de asumir el reto de disminuir las emisiones de dióxido de carbono, es por esto que anunció oficialmente medidas para controlar las emisiones de CO_2 por unidad de PIB en un $40 - 45\%$ para el año 2020.

El proceso de post-combustión es el más adecuado para capturar carbono en las centrales de carbono tradicionales, dentro de esta tecnología se han desarrollado los siguientes procedimientos (Lei, et al., 2011):

- Utilizar disolventes basados en amina: utilizar complejos químicos en base a partículas de aminas secundarias como dietalonamina (DEA) y terciarias como metildietanolamina (MDEA), sin embargo, la monoetalonamina (MEA) muestra una alta velocidad de reacción y eliminación de CO_2, pero tiene una desventaja de que se requiere aumentar la demanda de energía, y en consecuencia el costo del procedimiento y además los productos residuales son dañinos para el ambiente y la salud humana.
- Líquidos iónicos: un disolvente no volátil. Son considerados el sustituto potencial de los compuestos de aminas acuosos para la captura del CO_2. Su desventaja es que se debe trabajar con estructuras complejas que poseen costos muy elevados en comparación a estructuras aminas
- Absorbentes sólidos: se encuentran los que son en base a aminas, que si bien traen buenos resultados, se requieren grandes cantidades y su costo es excesivamente alto. También se encuentran los absorbentes en base a tierra alcalina, que al reaccionar con el carbono producen elementos alcalinos, que es un subproducto

que se puede utilizar en los procesos de pre-combustión y post-combustión, se debe procurar que esto suceda en ausencia de vapor de agua y a altas temperaturas.

Del estudio de Serrano, Pérez & Marmolejo (2017), entre los procesos mencionados anteriormente, el de post-combustión por absorción química mediante monoetanolamina (MEA), es la que constituye la mejor alternativa para las centrales termoeléctricas existentes, puesto que permite ser instalada sin excesivas modificaciones a la central, encontrando valores de recuperación de CO_2 superiores al 80%, siendo una alternativa viable.

Según mencionan Yaumi, Bakar & Hameed (2017), los métodos de captura de carbono provocan que se incurra en altos costos y representan entre el $70 - 80\%$ del gasto total de captura de carbono y la tecnología aplicada para poder realizar dichos proyectos.

Los procesos que se especializan en la captura de carbono mediante procesos MEA han entregado una relación en que de mayor potencia sea la planta, mayor captación de CO_2 existirá, tal como se muestra en la siguiente tabla:

Potencia (MW)	CO_2 Recuperado	Combustible	Solvente
500	90%	Gas natural	MEA
450	96%	Carbón	MEA
350	90%	Carbón	MEA IIE
300	88%	Carbón	MEA
100	81%	Carbón	MEA UG

Tabla 3: *Porcentaje de dióxido de carbono recuperado por el proceso de aminas en diferentes plantas termoeléctricas.* ***Fuente:*** *Serrano, Pérez & Marmolejo (2017).*

4.10 Almacenamiento del dióxido de carbono

Una vez que se ha recuperado el dióxido de carbono empleando alguno de los procesos mencionados anteriormente, es que hay que comenzar a visualizar que hacer con este gas, ya que no se puede liberar al ambiente sino no hubiera servido de nada la inversión realizada, es por esto que han surgido diferentes alternativas para depositar el CO_2 acumulado, como por ejemplo en yacimientos geológicos o bien en cavidades submarinas.

4.10.1 Almacenamiento geológico

Este procedimiento implica la inyección del CO_2 a profundidades mayores de $1000\ [m]$ en formaciones sedimentarias porosas utilizando tecnologías derivadas de la industria del petróleo y gas. Cuando se inyecta dióxido de carbono en este tipo de yacimientos se debe cumplir que el gas se encuentre en estado súper crítico, lo cual se cumple a $31{,}1\ [°C]$ y a $7{,}38\ [MPa]$ (Lei, et al., 2011). En el estudio de Serrano, Pérez & Marmolejo se dice que "las formaciones geológicas idóneas para el almacenamiento de CO_2 son las sedimentarias, destacando aquellas que han retenido petróleo, gas natural, agua salada y capas de carbón".

4.10.2 Formaciones sedimentarias salinas profundas y yacimientos de gas empobrecidos

La ventaja de este tipo de lugares para el almacenamiento del dióxido de carbono es que se encuentran en prácticamente todo el mundo. Por ejemplo, para fines de 2008 China había inyectado 20 millones de toneladas de CO_2, pero los recursos de almacenamiento que dispone este país es de $2.300.000\ [Mt]$ en cuencas terrestres y de $780.000\ [Mt]$ en cuencas costeras. Además China se ha convertido en un potencial centro de almacenamiento de carbono, y esto se puede reafirmar en el acuerdo con la Unión Europea que se desarrolló en el Marco del Acuerdo CEPC en 2005, en el cual se dispone de la evaluación de potenciales lugares en el noreste de China, dicha evaluación se realiza con el fin de que no se presenten fugas de gas, lo cual implicaría riesgos mayores para la salud humana y el medio ambiente (Lei, et al., 2011).

4.10.3 La carbonización mineral

Una tecnología prometedora, pero la cual aún se encuentra en estudio, consiste en hacer reaccionar rocas de silicio o magnesio con dióxido de carbono con el fin de obtener carbonatos.

Este tipo de reacciones son termodinámicamente estables, por lo que es una solución segura y a largo plazo, también se evita el riesgo de cualquier tipo de fugas desde el subsuelo en que se almacene el gas. Aunque este tipo de tecnologías aún sigue en estudio para probar su eficiencia a gran escala, ya que se requiere de una gran cantidad de energía para poder realizar la reacción química, y además de una gran cantidad de yacimientos de minerales con el fin de que los procesos sean rápidos y no ocurran inconvenientes. Por el momento tomando en consideración todo lo mencionado, provoca que se incurra en una inversión elevada (Lei, et al., 2011).

4.10.4 Almacenamiento en el océano

Este tipo de procedimiento es similar al del almacenamiento geológico, pero se tienen que cumplir ciertas consideraciones como la velocidad de inyección del gas, la cantidad total de metro cúbicos a ingresar a la cavidad marina, así como la profundidad, también debe considerarse la permeabilidad para evitar fugas y la anisotropía[2].

Si bien este tipo de almacenamiento aún se encuentra en una etapa conceptual y teórica, esto debido a que las condiciones del fondo marino y su impredecibilidad de los componentes físicos que se encuentren pueden reaccionar con el CO_2 generando ácido carbónico, lo que sería perjudicial para los organismos que viven en el fondo del océano (Lei, et al., 2011).

El CO_2 capturado se traslada a los yacimientos oceánicos mediante gaseoductos o bien, por buques, donde se inyecta a más de mil metros de profundidad. Posteriormente, el

[2] Un material anisotrópico posee propiedades mecánicas diferentes en distintas direcciones. En general las propiedades mecánicas de los materiales anisotròpicos no son simétricas con respecto a ningún plano o eje. Las propiedades que pueden variar son la elasticidad, temperatura, conductividad, etc. (SolidWorks, 2010).

dióxido de carbono disuelto y disperso se convertirá en parte del ciclo global del carbono (Figura 1) (Serrano, Pérez & Marmolejo, 2017).

4.10.4.1 Proyecto Sleipner

La captación y almacenamiento de CO_2 fueron logrados por primera vez en 1996 por Statoil y sus socios en el campo Sleipner del Mar del Norte, Noruega. El campo produce gas natural con un contenido de aproximadamente 9% de CO_2, pero para cumplir con las especificaciones requeridas para poder operar tuvo que reducirlas a un 2,5%. Para poder realizar este procedimiento con éxito, primero se captura la liberación de gases y luego lo separa utilizando el solvente MEA, para posteriormente inyectarlo en la Formación Utsira, utilizando solo un pozo de inyección con gran desviación en su interior.

El proyecto Sleipner ha inyectado 1 millón de toneladas métricas de CO_2 por año desde septiembre de 1996 a una presión de flujo de fondo de pozo supercrítica de aproximadamente 10,5 [MPa] que es inferior a la presión de fracturamiento de la Formación Utsira. Dicho proyecto tiene pensado operar hasta el año 2020.

El campo Sleipner representa el primer proyecto CCS a escala industrial y constituye la base para el éxito de los proyectos futuros (Bennaceur, et al., 2017)

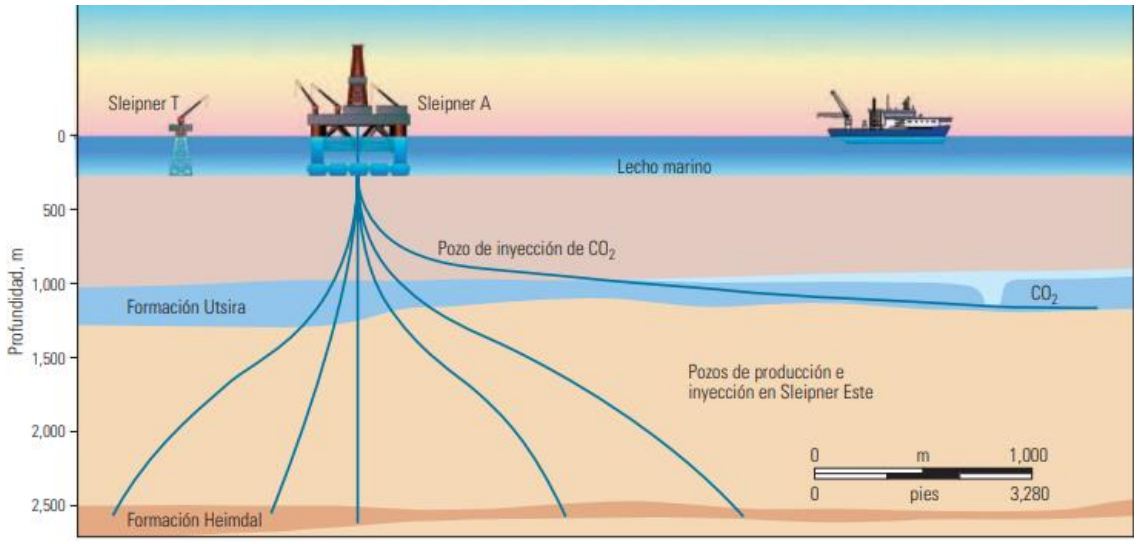


Figura 4: *Separación del dióxido de carbono del gas natural producido en la Formación Heimdal, que luego es inyectado en la Formación Utsira.* ***Fuente:*** *Bennaceur, et al., 2017.*

4.11 Interminables años de fracaso arrastra la tecnología de captura y almacenamiento de carbono

Un informe del Tribunal de Cuentas Europeo, señala que las acciones de la Unión Europea para apoyar la captura y el almacenamiento de carbono, así como las energías renovables innovadoras, no han tenido los efectos esperados, y se respaldan en que han examinado las acciones que se han llevado a cabo entre los años 2008 y 2017 (Energías Renovables, 2018).

"Entre 2008 y 2017 se fijaron objetivos ambiciosos, pero el apoyo de la UE a proyectos de demostración contribuyó escasamente -dice el Tribunal- a la realización de proyectos y a la obtención de resultados". Los auditores del tribunal han visitado proyectos en Alemania, España, Países Bajos, Polonia y el Reino Unido, y han constatado que el programa energético ha contribuido "positivamente" al desarrollo del sector eólico marino, pero no ha alcanzado sus ambiciones en el ámbito de la captura de carbono. En el caso del programa NER300, el veredicto es peor: "no se han generado proyectos de éxito en el ámbito

de la captura de carbono y se han realizado escasos progresos en su apoyo a la demostración de una gama más amplia de tecnologías en la industria de las energías renovables innovadoras" (Tribunal de Cuentas Europeo, 2018).

El auditor Samo Jereb (Tribunal de Cuentas Europeo, 2018) indica que "la Unión Europea se esfuerza por ser el líder mundial en la lucha contra el cambio climático, pero, para cumplir su objetivo, tendrá que aprender de la experiencia de fracasos anteriores, diseñar mejores mecanismos de apoyo a las tecnologías innovadoras con baja emisión de carbono y garantizar una rendición de cuentas plena de los recursos utilizados para lograr este desafío", y los auditores señalan que el Programa Energético para la Recuperación y el Programa NER300 se vieron afectados por las condiciones adversas de la inversión que, unidas a la inseguridad de los marcos reglamentarios y las políticas, obstaculizaron o retrasaron el progreso de muchos proyectos de energía procedente de fuentes renovables y de captura de carbono. El informe también señala que un culpable en el fracaso de la comercialización de la captura y el almacenamiento de carbono: la volatilidad de los precios de mercado del carbono.

Los antecedentes de lo mencionado anteriormente son, que la Unión Europea puso en marcha el Programa Energético Europeo para la Recuperación (PEER) con un presupuesto de 1.600 millones de euros para promover los proyectos de captura y almacenamiento de carbono y de energía eólica marina. Al mismo tiempo, la Unión Europea creó la reserva de nuevos entrantes de 300 millones de derechos de emisión (NER300), financiada mediante la venta de 300 millones de derechos de emisión (por un valor de 2.100 millones de euros) para impulsar proyectos de CAC y de energías renovables innovadoras (Tribunal de Cuentas Europeo, 2018). Con un objetivo de gasto global de 3.700 millones de euros, ambos

programas fijaron objetivos ambiciosos en materia de captura de carbono y energías renovables innovadoras. En el Acuerdo de París de 2015, la UE se comprometió a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero al menos en un 40 % para 2030, meta que se sumaba a su aspiración de conseguir una economía hipocarbónica para 2050.

4.12 Proyectos de captura y almacenamiento de carbono que fracasaron en Europa

Según constata la Comisión Europea (2017), en seis proyectos de captura y almacenamiento de CO_2, al Programa Energético Europeo para la Recuperación (PEER) se le asignó un presupuesto de 1000 millones de euros por parte de la Unión Europea, lo cual representa un 80% de la inversión. El programa mencionado anteriormente solo auspicia a proyectos que engloben en su totalidad el proceso de captura y almacenamiento de dióxido de carbono.

Los proyectos que fueron financiados por el PEER perseguían los siguientes propósitos:

- Ayudar a demostrar la tecnología de toda la cadena de valor de la captura y almacenamiento de CO_2.
- Contribuir a reducir los costos de producción y operativos de esta tecnología.
- Acelerar el desarrollo y la aplicación de sistemas normativos y de permisos.

Situación de los proyectos:

Jaenschwalde, Alemania: se han probado tecnologías de captura de oxicombustión y poscombustión en una central de demostración de 300 MW, con almacenamiento terrestre de CO_2. Este proyecto debía comenzar a funcionar en 2015. Sin embargo, debido a retrasos en la legislación alemana sobre CAC, Vattenfall anunció la cancelación del proyecto el 5 de diciembre de 2011.

Porto Tolle, Italia: se ha probado la tecnología de captura de poscombustión en una central eléctrica combinada de 250 MW, con almacenamiento marino de CO_2. Dicho proyecto debía comenzar a funcionar en 2015. Sin embargo, se canceló el 11 de agosto de 2013 a petición del promotor debido a problemas relacionados con los permisos y a la falta de perspectivas para completar la estructura financiera del proyecto.

Belchatow, Polonia: se ha probado la tecnología de captura de poscombustión en 260 MW de potencia generados por una nueva unidad supercrítica, con almacenamiento terrestre de CO_2. Debía comenzar a funcionar en 2016. Sin embargo, se canceló el 6 de mayo de 2013 por solicitud del promotor, debido a la ausencia de un plan realista que completara la estructura financiera del proyecto, a determinados riesgos de carácter técnico y a la falta de un marco legal adecuado para el almacenamiento de CO_2.

Compostilla, España: se ha probado la tecnología de captura de oxicombustión y la tecnología de lecho fluido circulante en una nueva central piloto de carbón de 30 MW, que se ampliará a 323 MW, con almacenamiento terrestre de CO_2. Quedó interrumpido en 2013, en parte por la caída de los precios de los derechos de emisión en la Unión Europea, ya que desarrollar esta tecnología requiere de una alta inversión, pero al no verse apoyada de forma legislativa se optó por desistir del proyecto.

ROAD, Países Bajos: se ha probado la tecnología de captura de poscombustión en un flujo de gas de salida equivalente a 250 MW para una central eléctrica de carbón de 1.070 MW, con almacenamiento marino de CO_2. Las empresas que financiaban el proyecto optaron por desistir de continuar financiando en esta central, esto debido a que las empresas Engie y Uniper, tenían inversiones en centrales eléctricas a carbón y debido a la incertidumbre del mercado, la nueva normativa más severa y el futuro incierto de la energía y la demanda,

añadiendo la mala gestión en la toma de decisiones por parte de los ejecutivos, repercutió en que abandonaran el proyecto, pese a que realizarlo impactaría en su negocio principal de energía, señala Roca (2017).

Don Valley, Reino Unido: se ha probado el ciclo combinado de gasificación integrada (IGCC, por sus siglas en inglés) en 900 MW de capacidad bruta, con almacenamiento marino en acuíferos salinos. Sin embargo, la comisión encargada de este proyecto en Reino Unido, no vio ninguna posibilidad razonable de que el proyecto tomara una 'Decisión de Inversión Final' positiva de manera oportuna, ya que el proyecto no ha logrado asegurar la financiación adicional necesaria para la construcción y la inoportuna creación de legislación terminaron por detener el proyecto, señala Teffer (2017).

5. PROPUESTA DE POLITICA PÚBLICA PARA CHILE

5.1 Diagnóstico de la situación ambiental de Chile

Para poder dimensionar la situación ambiental del país en cuanto a emisiones efectuadas por los diferentes contribuyentes en esta causa se toma como línea base la información entregada por el Ministerio de Medio Ambiente (2018), donde detalla que el balance de gases de efecto invernadero de Chile contabilizó 46.185,2 $kt\ CO_2\ eq$, mientras que las emisiones de GEI totales del país contabilizaron 111.677,5 $kt\ CO_2\ eq$, las que se incrementan en un 114,7% desde 1990 y en un 7,1% desde 2013. Los principales causantes de esta tendencia son los sectores energía y UTCUTS (Uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura). Los valores que se escapan de la tendencia en el balance son consecuencia, principalmente de los incendios forestales contabilizados en el sector UTCUTS.

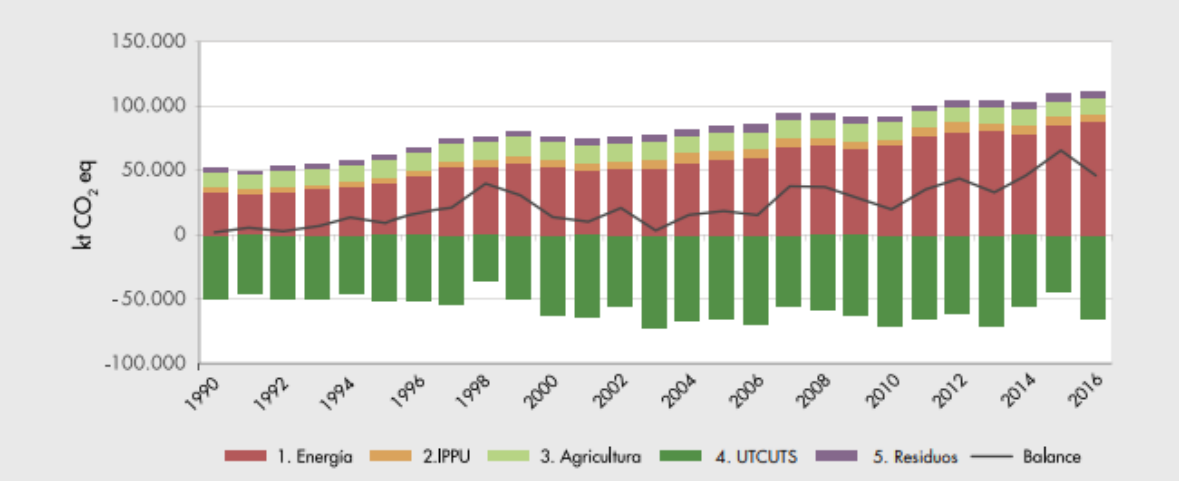


Gráfico 3: *INGEI de Chile: balance de GEI (kt CO2 eq) por sector.* ***Fuente:*** *Ministerio de Medio Ambiente, 2018.*

Las estimaciones de gases de efecto invernadero totales estuvieron dominadas por el CO_2, que representó el 78,7%, seguido de CH_4 con el 12,5% y del N_2O con el 6%. Los gases fluorados contabilizan colectivamente el 2,8% de las emisiones GEI totales del país en 2016.

Ahora bien, el desglose de los actores antes mostrados se da de la siguiente forma:

- El sector de energía es el principal emisor nacional de GEI, con el 78,0% de las emisiones totales en 2016. En el mismo año, las emisiones de GEI del sector contabilizaron 87.135,6 $kt\ CO_2\ eq$, lo que representa un incremento de 137,5 % desde 1990 y de 16,6 % desde 2013. En general, la principal causa es el aumento del consumo energético del país, incluyendo el consumo de carbón mineral y de gas natural para la generación eléctrica, así como de combustibles líquidos para transporte terrestre, mayormente diésel y gasolina.
- El sector IPPU (Procesos industriales y uso de productos) representó el 6,2 % de las emisiones de GEI totales en 2016. En el mismo año, sus emisiones alcanzaron las 6.939,3 $kt\ CO_2\ eq$, incrementándose en un 110,6 % desde 1990 y en un 12,9 % desde 2013. En general, las principales causantes son el alza sostenida de las producciones de hierro y acero, cal, ácido nítrico, cemento y el incremento del uso de los HFC en la refrigeración.
- El sector Agricultura representó el 10,6 % de las emisiones de GEI totales en 2016. En el mismo año, sus emisiones alcanzaron las 11.801,6 $kt\ CO_2\ eq$, disminuyendo en un 14,7 % desde 1990 y en un 11,5 % desde 2013, debido mayormente a la baja de la población del ganado bovino y ovino que se ha registrado durante la última década. Esto a pesar del aumento sostenido que han tenido el ganado porcino y aves de corral; y el uso de fertilizantes nitrogenados.
- El sector UTCUTS es el único que consistentemente absorbe CO_2 en el país, lo que lo convierte en uno de los más relevantes por su potencial de mitigación. En 2016, el balance de GEI del sector contabilizó $-65.492{,}3\ kt\ CO_2\ eq$, aumentando

su condición de sumidero en un 30,8 % desde 1990 y disminuyéndola en un 8,9 % desde 2013.

- El sector Residuos representó el 5,2 % de las emisiones de GEI totales en 2016. En el mismo año, las emisiones de GEI del sector contabilizaron 5.801,1 $kt\ C0_2\ eq$, incrementándose en un 95,4 % desde 1990 y en un 9,1 % desde 2013, debido al aumento de la población y sus residuos generados.

En resumen, durante el 2016, las emisiones a nivel nacional y por tipo de gases de efecto invernadero fueron las siguientes: las emisiones netas de $C0_2$ contabilizaron 22.186,4 kt; las emisiones de CH_4 contabilizaron 562,6 kt y las emisiones de N_20 contabilizaron 22,8 kt. En el caso de los gases fluorados, las emisiones de HFC contabilizaron 2.869,5 $kt\ C0_2\ eq$; y las emisiones de SF_6 contabilizaron 272,3 $kt\ C0_2\ eq$. Respecto a los gases precursores, en 2016 las emisiones en todo el país fueron las siguientes dependiendo del tipo de gas: el NO_x contabilizó 300,8 kt; el CO contabilizó 963,4 kt; los compuestos orgánicos volátiles distintos del metano (COVDM) contabilizaron 364,0 kt; y por último, el SO_2 contabilizó 357,4 kt. Por otra parte las emisiones de carbono negro [3] fueron 19,5 kt para todo el país.

En el anexo I se encuentra el detalle de emisiones por sector, además del tipo y la cantidad de gases de efecto invernadero que se han emitido desde el año 1990 en el país.

5.2 Análisis de soluciones según el panorama actual del país

En el tercer informe bienal de actualización de Chile sobre cambio climático del Ministerio de Medio Ambiente (2018), se señala que en el 2016 las emisiones de gases de

[3] "El carbono negro es el resultado de la combustión incompleta de diésel, biocombustibles y biomasa y es lo que da el color negro al hollín. Calienta el planeta mediante la absorción de radiación solar" (BBC, 2011).

efecto invernadero totales en el país (excluyendo UTCUTS) fueron de $111.677{,}5\ kt\ CO_2\ eq$, incrementándose en un $114{,}7\%$ desde 1990 y en $7{,}1\%$ desde 2013. También hay que destacar que el principal GEI emitido fue el CO_2 $(78{,}7\%)$, seguido del CH_4 $(12{,}5\%)$, N_2O $(6{,}0\%)$, y los gases fluorados $(2{,}8\%)$.

El sector de la Energía es el principal emisor de gases de efecto invernadero representando el $78{,}0\%$ de las emisiones totales en 2016, mayoritariamente por el consumo de carbón mineral y diésel para la generación eléctrica y el consumo de combustibles líquidos en el transporte terrestre.

En base a lo anterior, en la siguiente tabla se muestran las diferentes subcategorías del sector Energía, con sus respectivas emisiones, porcentaje de incremento o decremento desde 1990 y 2013.

Fuente emisora	Emisiones alcanzadas	Diferencial desde 1990	Diferencial desde 2013
Aviación internacional	1.492,3 $kt\ CO_2\ eq$	Incremento de 342,2%	Incremento de 7,7%
Navegación internacional	777,1 $kt\ CO_2\ eq$	Incremento de 143,3%	Disminución de 13,4%
Quema de biomasa	35.042,3 $kt\ CO_2\ eq$	Incremento de 192,0%	Disminución de 2,4%
Industrias de la energía	35.711,1 $kt\ CO_2\ eq$	Incremento de 511,1%	Incremento de 7,9%
Industria manufacturera	16.129,2 $kt\ CO_2\ eq$	Incremento de 31,5%	Incremento de 10,7%
Minería y cantería	7.966,8 $kt\ CO_2\ eq$	Incremento de 109,7%	Incremento de 34,5%
Transporte	26.936,4 $kt\ CO_2\ eq$	Incremento de 191,8%	Incremento de 8,4%
Emisiones fugitivas[4]	1.001,6 $kt\ CO_2\ eq$	Disminución de 55,6%	Disminución de 5,9%

Tabla 4: *Emisiones totales del sector energía, según el inventario nacional de gases de efecto invernadero.* ***Fuente:*** *Elaboración propia, con información del Ministerio de Medio Ambiente (2018).*

Dentro de subcategoría Industrias de la energía, la Producción de electricidad y calor como actividad principal es la de mayor importancia con un 96,8%, seguido de 2,1% de Manufactura de combustibles sólidos y otras industrias de la energía y un 1,0% de Refinación del petróleo. Por lo que la generación eléctrica es la mayor fuente individual de gases de efecto invernadero en el país, representando el 31,0% de las emisiones GEI totales.

Como bien se menciona anteriormente, existen tres subcategorías del sector energía relevantes donde poner atención para el control del gas de dióxido de carbono, las cuales son:

[4] Se consideran emisiones fugitivas a todas las emisiones intencionales o no intencionales de gases de efecto invernadero liberados durante la extracción, el procesamiento, almacenamiento y distribución de combustibles fósiles.

Fuente emisora	Emisiones alcanzadas
Industrias de la energía	35.711,1 $kt\ CO_2\ eq$
Quema de biomasa	35.042,3 $kt\ CO_2\ eq$
Transporte	26.936,4 $kt\ CO_2\ eq$
Industria manufacturera	16.129,2 $kt\ CO_2\ eq$

Tabla 5: *Subcategorías del sector energía que representan la mayor cantidad de emisiones de GEI.*
Fuente: *Elaboración propia, con información del Ministerio de Medio Ambiente (2018).*

En un comienzo se ve que la segunda subcategoría del sector de energía en emisiones realizadas al ambiente es la de Quema de biomasa (tabla 5), la cual se ve influenciada en mayor medida por el aumento en el consumo de leña, debido a un aumento progresivo del sector urbano y rural mediante la construcción de residencias, ante lo cual la demanda se ha visto incrementada considerablemente. Si bien existe regulación para este tema, Vildósola (2017) indica que la biomasa es carbono neutral, porque las producciones forestales y agrícolas captan CO_2, que al convertirse en energía es liberado. En cambio, los combustibles fósiles, como el petróleo, el gas, la gasolina, solo lo liberan. Por otro lado, la emisión de material particulado se genera cuando la combustión es mala o incompleta y esto pasa cuando el combustible contiene mucha agua, como ocurre con la leña húmeda; le falta oxígeno a la combustión, o el equipo es deficiente. Si la biomasa está bien trabajada y se utilizan tecnologías adecuadas, nada de eso ocurre. Por lo tanto, esta área no es atingente para desarrollar captura y almacenamiento de CO_2, como se ha venido planteando.

Luego viene la subcategoría de Transporte, la cual se ve marcada por el crecimiento del parque automotriz a nivel nacional inducido por la expansión de la población, el mayor poder adquisitivo y el mejoramiento de la infraestructura vial en el país. Dentro también se encuentra el aumento de viajes aéreos nacionales. Desde una mirada a los objetivos de Chile de cara al 2050, la materia transporte se encuentra al debe debido a que esta materia utiliza

en gran medida combustibles fósiles para su funcionamiento, ya que González (2019) señala en un documento del $(CR)^2$ (Center for Climate and Resilience Research) que hay que iniciar una revolución en la matriz del transporte del país más allá del gas natural, llegando a la electromovilidad e investigar el potencial del hidrógeno, donde dichas tecnologías deben abordar el tema de carga y traslado de mercancías en el país, ya que se reducen las emisiones, pero debe lograrse a costos razonables, donde debe potenciarse el transporte ferroviario. Como se menciona anteriormente, el tema del transporte apunta hacia otro lado, a diferencia de lo que se trata este análisis.

Ahora se tratarán las dos subcategorías que son propicias para realizar captura de dióxido de carbono, las cuales son la industria de la energía y la industria manufacturera.

Ahora analizaremos la industria de la energía, donde el mayor peso de las emisiones se lo lleva la Producción de electricidad y calor como actividad principal, seguido de la Manufactura de combustibles sólidos y por último la refinación del petróleo, por lo que se puede decir que la generación eléctrica es la mayor fuente individual de GEI en el país, representando el 31% de las emisiones totales según el tercer informe bienal de Actualización de Chile sobre Cambio Climático, del Ministerio de Medio Ambiente (2018).

Los combustibles utilizados para la generación eléctrica se desglosan de la siguiente manera:

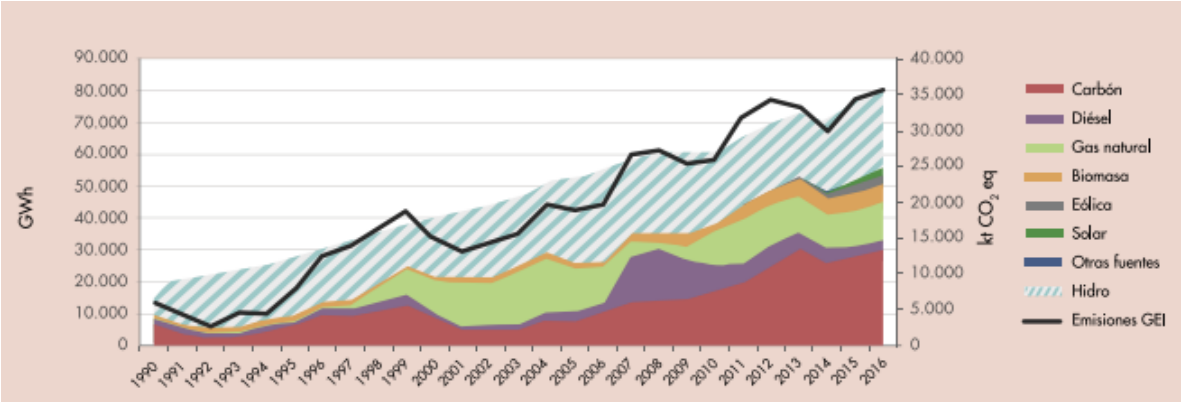


Figura 5: *Generación eléctrica por tipo de fuente y emisiones GEI (kt CO2 eq), serie 1990-2016.*
Fuente: *Ministerio de Medio Ambiente (2018).*

Donde sí nos enfocamos en los combustibles que producen emisiones de dióxido de carbono al ser utilizados, nos damos cuenta que corresponden al carbón y gas natural en mayor medida (biomasa puede considerarse, pero se subentiende que cumple los requisitos de procedencia del material y corresponde a la materia prima mencionada unos párrafos más atrás). Este tipo de combustible se utiliza en termoeléctricas, dentro de la amplia gama de tecnologías usadas en la generación de electricidad, la cual se descompone de la siguiente manera en la relevancia de producción:

CAPACIDAD TOTAL SEN - MW

RENOVABLE	11.438,5
HIDRO EMBALSE	3.383,3
HIDRO PASADA	3.364,1
BIOMASA	446,0
EÓLICO	1.741,2
SOLAR	2.459,0
GEOTÉRMICA	44,9
NO RENOVABLE	13.189,6
GAS NATURAL	4.875,6
CARBÓN	5.544,6
DERIV. DEL PETRÓLEO	2.769,4
TOTAL	24.628,1

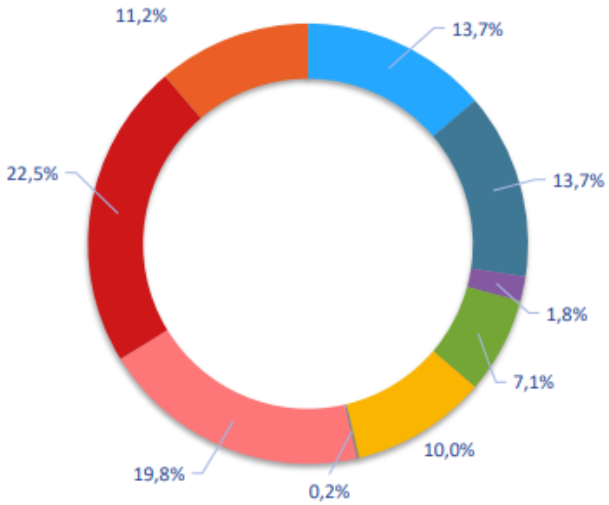


Figura 6: *Fuentes generadoras de energía, según la capacidad instalada del Sistema Eléctrico Nacional.* ***Fuente:*** *Asociación de Generadoras de Chile (2019).*

Donde se puede mencionar que, al mes de febrero de 2019, del total de capacidad instalada en el SEN (Sistema eléctrico nacional), el 46,4% corresponde a tecnologías de generación en base a recursos renovables, y el 53,6% corresponde a centrales termoeléctricas a gas natural, carbón o derivados del petróleo.

Además, según señalan Clemente & Naharro (2009), en el mercado de la generación de energía el desarrollo, operación y despliegue de tecnologías de captura y almacenamiento de CO_2, está previsto que se reduzcan las emisiones de dióxido de carbono en un 20% para el año 2050. Por ejemplo, en España son diversas las opciones que se están llevando a cabo para lograr esta reducción, entre las que destacan el desarrollo y optimización de procesos para una utilización más limpia y eficaz de los combustibles fósiles, tecnologías de uso limpio de carbón, sustitución parcial de combustibles fósiles por combustibles biomasicos, desarrollo de tratamiento de gases, etc. Donde estas opciones han sido financiadas en los

últimos años por los gobiernos nacionales, por los diferentes Programas Marcos (PM) de I+D de la Unión Europea y por la Industria, habiendo demostrado que son opciones técnicamente viables para la reducción de las emisiones contaminantes, en especial el dióxido de carbono.

Ahora bien, Rosa, Martínez & Jiménez (2016) indican que, dado que los precios de los combustibles fósiles están sometidos a inesperados cambios y fluctuaciones de precios debido a factores sociopolíticos, la descarbonización del sistema energético es un factor fundamental en la política energética de cualquier país, pues un descenso en los precios podría provocar un aumento insostenible en las emisiones de gases de efecto invernadero. Según la Agencia Internacional de Energía (2015), en el caso de la captura y almacenamiento de carbono el descenso de precios de los combustibles fósiles reduce los costes asociados a la penalización energética que conlleva añadir la dicha tecnología a la generación de energía. A su vez, la capacidad de la captura y almacenamiento de dióxido de carbono para permitir el uso de recursos fósiles sin dejar de contribuir a los objetivos de reducción de emisiones de CO_2 requiere la implantación por parte de los gobiernos de mercados que estimulen la inversión privada en dichas tecnologías.

Además, cabe mencionar que la visión de Chile ante el desafío del cambio climático para el área de la energía está dada no solo en reducir la vulnerabilidad del sector, sino que también en aumentar su resiliencia a los impactos y disminuir el aporte de las emisiones del sector al total de emisiones-país, apoyando así la descarbonización de la matriz eléctrica nacional. Donde también se destaca un cronograma de retiro o reconversión eficiente del carbón de la matriz eléctrica, siguiendo las tendencias mundiales y las necesidades ambientales que el país y las comunidades se han planteado de forma segura y eficiente (Ministerio de Energía, 2018). En el marco de dicho plan se anunció el retiro de ocho

centrales a carbón en cinco años y la meta de retiro total al año 2040. Dicha labor comenzará con el cese de las ocho centrales más antiguas a 2024, las cuales se encuentran ubicadas en Iquique, Tocopilla, Puchuncaví y Coronel, y representan en su conjunto un 19% del total de la capacidad instalada de centrales a carbón (T13, 2019)

En cuanto a la industria manufacturera, esta incluye las emisiones de gases de efecto invernadero generada por la quema de combustibles fósiles en dicha industria, incluyendo la quema para generación de electricidad y calor para el uso propio de sus procesos industriales. La subcategoría de mayor relevancia es la de minería y cantería

Dentro de este estudio tenemos a las empresas dedicadas a la producción de cemento son las que más contribuyen a la generación de gases de efecto invernadero, y es ahí donde se debe atacar con medidas de mitigación de captura y almacenamiento de dióxido de carbono, según señala Santtibañez (2014).

En el caso de nuestro país, dicha industria muestra interés por ser un actor participe de la reducción de emisiones de $C0_2$ al año 2030, ya que para la industria del cemento y del hormigón, la sustentabilidad y el combate contra los efectos del cambio climático se han transformado en un tema fundamental en los últimos años, según señala el Instituto del Cemento y del Hormigón en Chile (2019), ya dicho organismo y la Federación Interamericana del Cemento presentaron la Hoja de Ruta 2019, donde establecen los compromisos de la industria respecto a la reducción de la emisión de $C0_2$, y que aborda además, el rol de la industria frente a la adaptación y mitigación a los efectos del cambio climático. Por ejemplo se destaca que Chile a nivel mundial se encuentra entre los países con menor intensidad de emisiones en la industria, ya que la producción de cemento genera

$581\,\frac{kgCO_2}{ton}\,cemento$ y a meta de la hoja de ruta planteada es reducirla a $520\,\frac{kgCO_2}{ton}\,cemento$ al año 2030 y mantener así el liderazgo de Chile en esta materia.

La producción de cemento genera un 5% de las emisiones totales de CO_2 y siempre producirá este gas de efecto invernadero (Chen et al., 2010; Feiz et al., 2015). Además, algunas plantas cementos tienen calor residual disponible que puede ser utilizado potencialmente para la regeneración de disolvente en CO_2 capturar. Por estas razones, la captura y almacenamiento de carbono en la industria del cemento ha ganado interés.

Para el caso de nuestro país, las principales empresas cementeras generan la siguiente cantidad de emisiones:

Empresa	Procesos con combustión	Total general
CEMENTO MELÓN PLANTA LA CALERA	420,233	420,233
INACAL PLANTA DE CAL COPIAPO	401,426	401,429
CEMENTOS BIO BIO CENTRO SA PLANTA ANTOFAGASTA	164,427	164,905
Total general	**986,086**	**986,568**

Tabla 6: *Emisiones de dióxido de carbono en toneladas realizadas por los principales actores en la industria del cemento.* ***Fuente:*** *Registro de emisiones y transferencia de contaminantes, 2017.*

Según los estudios de Jakobsen, Roussanaly & Anantharaman (2017), capturar y usar el CO_2 en una de estas plantas, la cual incluye recuperación mejorada de petróleo, donde dicha etapa no aplicaría a Chile, puede visualizarse de la siguiente manera:

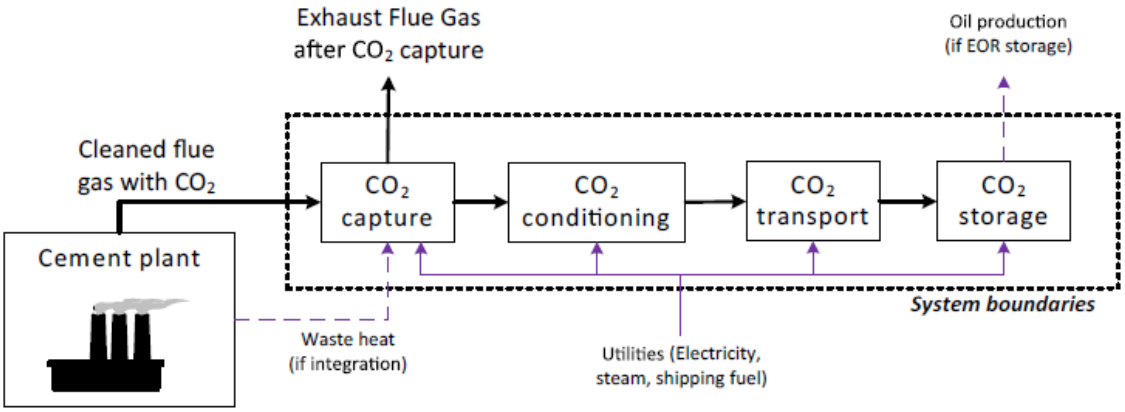


Figura 7: *Estructura de bloques y límites para la captura de dióxido de carbono en la industria del cemento.* ***Fuente:*** *Jakobsen, Roussanaly & Anantharaman (2017).*

Pese a que la industria del cemento ha presentado avances respecto a acciones a tomar en cuanto a las emisiones de gases de efecto invernadero que producen, no debe descartarse el resto de la industria chilena, ya que según datos del Instituto Nacional de Estadística (2019), el índice de producción manufacturera en el país se vio incrementado en un 1,3%, ante lo cual se deja intuir que existe mayor producción lo cual abre la posibilidad de llevar tecnologías de captura de dióxido de carbono a gran parte del mundo productivo del país.

Por último, queda señalar cual es la mirada política de o que se ha mencionado en este punto, donde acotaremos dicha mirada a lo que se expone por parte del Ministerio de Medio Ambiente (2018):

- Chile se compromete, al 2030, a reducir sus emisiones de CO_2 por unidad de PIB en 30% con respecto al nivel alcanzado en 2007, considerando un crecimiento económico futuro que le permita implementar las medidas adecuadas para alcanzar este compromiso.
- Adicionalmente, y condicionado a la obtención de aportes monetarios internacionales (Grant), el país se compromete al 2030 a aumentar su reducción

de emisiones de CO_2 por unidad de PIB hasta alcanzar una disminución de entre 35% y 45% con respecto al nivel alcanzado en 2007, considerando, a la vez, un crecimiento económico futuro que le permita implementar las medidas adecuadas para alcanzar este compromiso.

La lucha contra el cambio climático no va solo en reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, sino que también se consideran medidas forestales, entre las que se destacan que:

- Chile se compromete al manejo sustentable y a la recuperación de 100.000 hectáreas de bosque, principalmente nativo, que representará capturas y reducción de GEI de alrededor de 600.000 toneladas de CO_2 equivalentes anuales, a partir de 2030. Este compromiso está condicionado a la aprobación de modificaciones de la Ley sobre Recuperación de Bosque Nativo y Fomento Forestal.
- Chile se compromete a forestar 100.000 hectáreas, en su mayoría con especies nativas, que representarán capturas de entre 900.000 y 1.200.000 toneladas de CO_2 equivalentes anuales, a partir de 2030. Este compromiso está condicionado a la prórroga del Decreto Ley 701 y a la aprobación de una nueva Ley de Fomento Forestal.

Por lo que se puede mencionar que trabajar para la reducción de gases de efecto invernadero es una opción real dentro del país, y la elaboración de políticas existen. Además de recalcar que el desarrollo tecnológico se encuentra presente alrededor del mundo en diferentes estados de avances, está la existencia de pruebas, modelos y prototipos para

realizar captura y almacenamiento de dióxido de carbono, solo que debe comenzar a expandirse su uso.

5.3 ¿Cómo realizar captura, transporte y almacenamiento de dióxido de carbono en Chile?

En primer lugar, nos enfocaremos en la captura de dióxido de carbono mediante los procesos mencionados en el apartado 3.8. Esto debido a que no todos los tipos de sistemas son aptos para todas las industrias, ante lo cual se debe buscar cual será el más óptimo para las empresas de los sectores analizados anteriormente, que son el sector de generación eléctrica, más específico termoeléctricas y la industria del cemento que son las que más emisiones de gases de efecto invernadero producen.

Se descartan el proceso de oxicombustión, ya que utiliza oxígeno para realizar la combustión del combustible primario, para producir un gas compuesto en su mayoría por agua y dióxido de carbono, pero la aplicación de estos sistemas en calderas, se encuentran actualmente en fase de demostración y su aplicación en sistemas de turbinas, en fase de investigación (Santamaría, 2018).

La pre-combustión si bien retira el CO_2 de los combustibles antes de ser quemado, es tecnología que se usa mayoritariamente para la fabricación de fertilizantes y en la producción de hidrógeno, además de que retirar el carbono antes de la combustión es más caro y complejo de realizar, sumado a que se necesitan altas concentraciones de dióxido de carbono y que este gas se encuentre a una presión elevada. Se emplea principalmente en termoeléctricas de quema de carbón, o plantas que usen carbón, aunque puede bajar la eficiencia este proceso en pérdidas de energía en capturar el CO_2 de una planta con 38,4% a 31,2% de eficiencia, aunque puede recuperarse dicha energía utilizando el hidrógeno como

combustible. La mayor ventaja es que se puede implementar esta tecnología sin hacer muchas modificaciones a las plantas (Saldívar, Cabrera & Reta, 2017).

En cambio, la tecnología de post-combustión consiste en remover el CO_2 después de la quema de combustibles fósiles, mediante la captación de dicho gas con un solvente orgánico como la monoetanolamina (MEA), y es un sistema ideal para aplicarse en las centrales termoeléctricas (Santamaría, 2018).

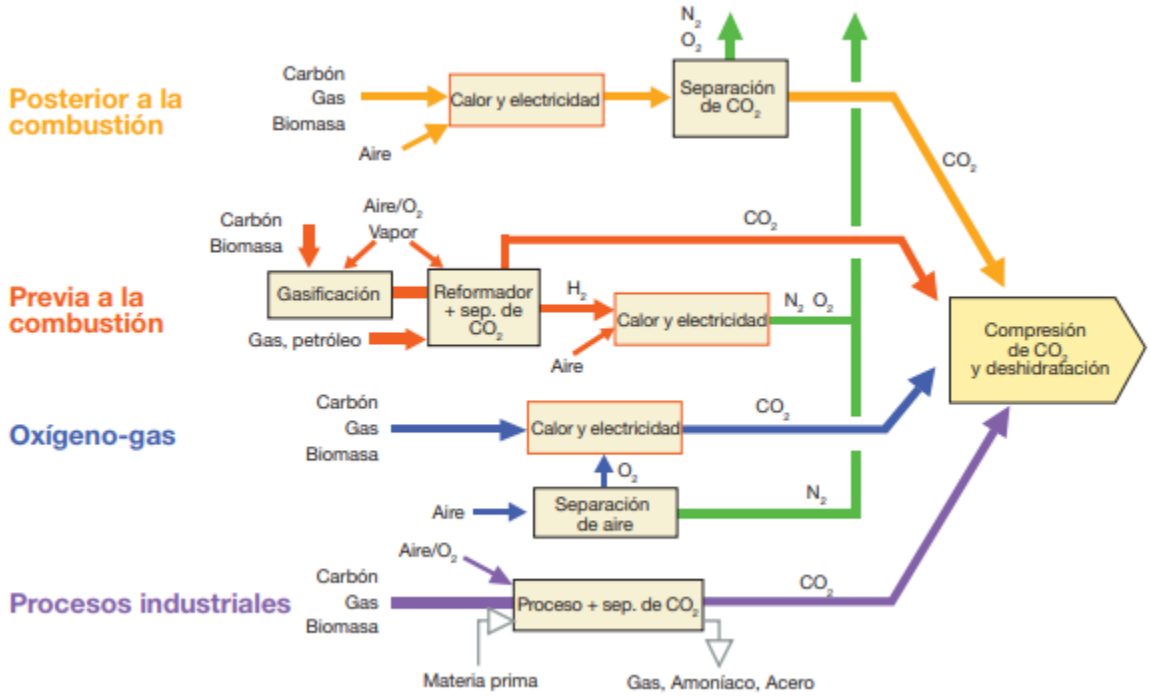


Figura 8: *Visión general de los procesos y los sistemas de captación de dióxido de carbono.*
Fuente: *Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (2005).*

Como bien se mencionó anteriormente, el proceso de post-combustión y pre-combustión son los más adecuados para la industria chilena en estudio, pero se tiene ciertas limitantes con el primero que han de superarse previamente para aplicarse a gran escala. Entre los mayores problemas se encuentra la degradación de las plantas, problemas de corrosión que acarrean los solventes ricos en CO_2 y la gran cantidad de energía requerida

para recuperar los solventes. Donde es aquí que ocurre el mayor gasto energético, ya que se incurre en un 70% de los costos del proceso (Romeo & Bolea, 2015)

En cuanto al transporte del dióxido de carbono, los países que aplican esta tecnología o bien tienen desarrollado el movimiento de este gas lo realizan a través de gaseoductos, y son el método más común. Para esto el CO_2 gaseoso es comprimido a una presión superior a los $8MPa$, aumentando su densidad, facilitando y abaratando así el transporte. También existe el transporte mediante buques, que puede resultar más atractivo del punto de vista económico, especialmente si el dióxido de carbono debe ser transportado a largas distancias o a ultramar. Para que exista un ahorro considerable en términos económicos debe ser realizado a gran escala, lo cual se realiza a baja escala por la baja demanda. Los camiones y los vagones cisterna también son opciones técnicamente viables, pero son más costosos en comparación a los gaseoductos y los buques, salvo a una escala muy reducida, y es poco probable que sean de utilidad para transportar dióxido de carbono a gran escala (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, 2015).

Ahora, en cuanto al almacenamiento de dióxido de carbono existen diversas técnicas que se pueden utilizar. Una de ellas consiste en inyectar directamente dicho gas en el fondo oceánico, y es una medida totalmente aprovechable por Chile debido a su larga costa que lo bordea, pero existe el inconveniente que aún se encuentra en fase investigativa y demostrativa, con el fin de no provocar daños ambientales y alterar el equilibrio natural al deshacerse de millones de toneladas de dióxido de carbono, pese a que se busca utilizar el ciclo natural del carbono en dicho proceso (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, 2015).

Por lo tanto, suena atractivo el almacenamiento geológico en pozos de petróleo o de gas natural, pero nos topamos con el problema de que Chile no es un país productor por excelencia debido a la escasa cantidad de yacimientos presentes en el país. Si bien se ha realizado la exploración de yacimientos en la zona central, estos han resultado obteniendo productos de bajo volumen o bien, de alto costo de producción, por lo que dichos proyectos no han resultado comerciales. Dejando así a la región de Magallanes como a única productora de gas natural y petróleo en bajas cantidades. Debido al aumento de demanda del último tiempo se ha tenido que importar gas natural mediante barcos (Educar Chile, 2019).

Desde el año 2019 la Empresa Nacional de Petróleo (ENAP), inicio el proceso de autorización para perforar 60 pozos de exploración y desarrollo con la finalidad de explotar gas natural no convencional y petróleo en la Región de Magallanes, donde en dicha región ya se producen diariamente dos millones de metros cúbicos de gas en 131 pozos (Cooperativa, 2019).

5.4 Análisis de factibilidad

Para realizar el análisis de factibilidad para la implementación de sistemas de captura y almacenamiento de dióxido de carbono, se desarrollará en cuatro dimensiones, las cuales son el ámbito ambiental, económico, legal y político.

5.4.1 Análisis ambiental

Como bien se ha mencionado anteriormente, Chile es uno de los países que más criterios de vulnerabilidad tiene con el cambio climático debido a su larga costa y diversidad de climas que pueden verse afectados por un incremento en la temperatura. Además, desde que Chile ratifico en 1994 la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC) y se hizo parte del Protocolo de Kioto en 2002, ha estado presente

activamente en las discusiones y esfuerzos internacionales, y ha cumplido fielmente con los compromisos asumidos en su condición de país en vías de desarrollo. De los últimos convenios internacionales adoptados en 2015 con el Acuerdo de Paris, fue promulgado en Chile durante el 2017 (Ministerio de Medio Ambiente, 2018).

Se busca reducir las emisiones de dióxido de carbono en un 30% por unidad de PIB, además de buscar un plan de reforestación para un manejo sustentable y equilibrado de emisiones, con la finalidad de conseguir un carbono neutralidad.

Cuando se está planeando realizar una captura, transporte y almacenamiento de CO_2, hay que considerar que el transporte por gaseoducto no presenta problemas superiores a los que ya se afrontan para el transporte de gases como el gas natural como o señala el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (2005). Existe siempre un eventual riesgo de fuga o explosión de tubería, pero sin el problema de la inflamación del gas, en cambio para el transporte vía terrestre o marítima, la situación es semejante al transporte de otro tipo de gases industriales, existiendo siempre una posibilidad relativamente pequeña de riesgo de accidentes y eventuales derramamientos de CO_2, cuyas consecuencias están siendo estudiadas aún, pero que pueden eventualmente causar asfixia en grandes concentraciones en espacios reducidos.

En el caso de Chile, realizar almacenamiento del tipo geológico en yacimientos ya desocupados de la región de Magallanes se puede incurrir en riesgos locales como aquellos, que se provocan mediante fugas por fallos en los pozos, que pueden afectar a los trabajadores locales y a los equipos de reparación de fugas. O bien fugas por fallas geológicas no detectadas, creando una eventual contaminación de los acuíferos y acidificación de los suelos, y ya mirándolo en una acción global si son varios los países que aplican esta

tecnología, si hubiera una fuga considerable en un depósito de dióxido de carbono, esto podría contribuir significativamente en las alteraciones climáticas. Para el caso del almacenamiento oceánico, el riesgo es bastante más elevado, teniendo en cuenta la falta de información disponible en cuanto a los efectos del aumento de la concentración de CO_2 (acidificación) en los ecosistemas marítimos (Ciclo del Carbono, 2019).

5.4.2 Análisis económico

Como bien se ha ido mencionando a lo largo de este estudio, cuantificar económicamente el uso de esta tecnología es aún una idea acelerada. Debido principalmente a que la gran mayoría de los proyectos no se han realizado a escala industrial, o bien se sigue en proceso de estudio de sus reales consecuencias y logros que se pueden derivar. Por lo tanto, solo se cuenta a grandes rasgos de cuanto presupuesto se han invertido en investigación y desarrollo de estos.

Además, como no se ha adquirido demasiada experiencia con respecto a la combinación de la captación, el transporte y el almacenamiento de CO_2 en un sistema de captura y almacenamiento de dióxido de carbono plenamente integrado. Hay que resaltar que algunos componentes ya se utilizan en mercados maduros para ciertas aplicaciones industriales, por lo que estos sistemas aún no se han usado en centrales eléctricas a gran escala (que es donde se posee el mayor potencial).

La variabilidad de los factores propios de cada emplazamiento, especialmente las características del diseño, el funcionamiento y la financiación de las centrales eléctricas o las instalaciones industriales en que se utilice; el tipo y el costo del combustible empleado; las distancias, los terrenos y las cantidades requeridas por el transporte del CO_2; y el tipo y las características del almacenamiento de CO_2. Además, persiste la incertidumbre en torno al

rendimiento y el costo de los componentes y los sistemas integrados de la tecnología de captura y almacenamiento de carbono, nuevo y existente. No obstante, la bibliografía indica que, por lo general, se estima que el costo de la construcción y el funcionamiento de los sistemas de captación de CO_2 disminuirá con el tiempo como resultado del aprendizaje práctico (por medio del despliegue de la tecnología) y de la I+D sostenida. Los hechos observados también sugieren que los costos de los prototipos de planta de captación podrían superar a las estimaciones actuales antes de descender más adelante. En casi todos los sistemas, el costo de la captación (incluida la compresión) representa el mayor componente de los costos. Los gastos de electricidad y combustible varían de un país a otro de forma considerable, y estos factores también influyen en la viabilidad económica de las opciones (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, 2005).

En el siguiente cuadro resumen, se muestran los costos de captación, transporte y almacenamiento de CO_2:

Componentes del sistema de CAC	Escala de costos	Observaciones
Captación del CO_2 emitido en una central eléctrica a carbón o a gas	15-75 US$/t$CO_2$ captado (neto)	Costos netos del CO_2 captado en comparación con la misma planta sin captación
Captación del CO_2 emitido en la producción de hidrógeno y amoníaco o el refinamiento de gas	5-55 US$/t$CO_2$ captado (neto)	Aplicable a las fuentes con alto grado de pureza que requieren un simple secado y compresión
Captación del CO_2 emitido por otras fuentes industriales	25-115 US$/t$CO_2$ captado (neto)	La escala refleja el uso de diversas tecnologías y combustibles
Transport	1-8 US$/t$CO_2$ transportado (neto)	Por cada 250 km de transporte por gasoductos o buque para un flujo másico de 5 (extremo superior) a 40 (extremo inferior) MtCO_2/año
Almacenamiento geológico[a]	0,5-8 US$/t$CO_2$ inyectado (neto)	Con exclusión de los ingresos potenciales generados por la recuperación mejorada de petróleo o la ECBM
Almacenamiento geológico: vigilancia y verificación	0,1-0,3 US$/t$CO_2$ inyectado	Esto abarca la fase previa a la inyección, la inyección y la vigilancia posterior a la inyección, y depende de las prescripciones reglamentarias
Almacenamiento oceánico	5-30 US$/t$CO_2$ inyectado (neto)	Con inclusión del transporte a 100-500 km de la costa; quedan excluidas la vigilancia y la verificación
Carbonatación mineral	50-100 US$/t$CO_2$ mineralizado (neto)	Escala correspondiente al mejor caso estudiado. Incluye el uso de energía adicional para la carbonatación

Figura 9: *Escala de costos de la captura, transporte y almacenamiento de dióxido de carbono.*
Fuente: *Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, 2005.*

Si bien implementar esta tecnología es de exclusiva responsabilidad de la industria, se deben inducir lineamientos que vayan encaminados a la adopción de sistemas de captura de dióxido de carbono. Una iniciativa es el impuesto verde, que entró en vigencia desde el año 2017, donde en dicho año la recaudación fiscal correspondientes a emisiones fijas, aporto $US\$\ 191{,}3\ millones$, pagados por las empresas afectadas a dicho impuesto, a lo que se añade lo recaudado por fuentes móviles, equivalentes a $US\$\ 107\ millones$ (Biblioteca del Congreso de Chile, 2018).

Con la aplicación del impuesto verde, se busca que las empresas intenten reducir su carga tributaria a través del mejoramiento de procesos, cambio de combustibles o innovación tecnológica, promoviendo la eficiencia energética y el uso de fuentes de energía alternativas. El impuesto directo a la emisión de dióxido de carbono equivale a $US\$5$ por tonelada emitida, donde el estándar internacional corresponde a $US\$32$ (Biblioteca del Congreso Nacional, 2018).

En el anexo II se puede visualizar el detalle de empresas por rubro que están afectas al pago del impuesto verde.

Según lo expuesto anteriormente, el proyecto de ley de modernización tributaria, que está en trámite legislativo actualmente, se propone como mecanismo de flexibilidad un sistema de compensaciones de CO_2, donde lo que se busca es materializar mediante proyectos de reducción de emisiones del mismo contaminante, siempre que dichas reducciones sean adicionales (no asociadas al cumplimiento de ninguna obligación legal), medible, verificables y permanentes. El sistema en general tiene plazo de entrada en vigencia entre 2022 y 2025, lo que permite que las empresas tengan un plazo razonable para adaptar sus procesos, y se debe hacer énfasis en que la compensación es contaminante a contaminante, ya que no puede admitirse que si se emite un contaminante se busque compensar reduciendo las emisiones de otro distinto. Esto, precisamente incentiva que se busquen alternativas tecnológicas para minimizar impactos específicos (Gómez. 2019).

Otro punto que se puede utilizar para obtener financiamiento o bien generar políticas de captura de carbono, es el mercado de carbono que fue propuesto en el artículo 6 del Acuerdo de París, el cual aún se encuentra en discusión y es un punto a zanjar en la Conferencia de las Partes (COP) que se realizara en Chile.

Lo anterior ronda en el artículo 6 que está relacionado con los mecanismos de mercado o de flexibilidad, resaltan el artículo 6.2, que permite el uso de iniciativas de mitigación transables internacionalmente (ITMO, por sus siglas en inglés); el artículo 6.4, que establece el Sustainable Development Mechanism (SDM), un mecanismo bajo la CMNUCC diseñado para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, a partir de actividades de mitigación; y, finalmente, el artículo 6.8, que reconoce el rol de las iniciativas

de no-mercado como una forma para asistir a los países en el cumplimiento de sus NDC (Contribuciones Nacionalmente Determinadas) (Patrickson, 2019).

Por lo tanto, el llegar a un acuerdo en dichos puntos y especificar bien cómo funcionará el mecanismo de mercado de carbono entre países abrirá una puerta para el desarrollo e implementación de nuevas tecnologías en países desarrollados y que se encuentran en vías de desarrollo. Aunque según señala Patrickson (2019), hay que salvaguardar ciertas consideraciones en este mercado, debido a que el proceso de negociación de este artículo deberá tomar en consideración las lecciones del régimen climático del Protocolo de Kioto, de las cuales, una de las más importantes, se refiere a evitar la doble contabilidad de las reducciones de emisiones de gases de efecto invernadero transadas entre los países. Esta doble contabilidad ocurre cuando los países en desarrollo reducen sus emisiones y venden créditos de carbono a países desarrollados, permitiéndoles a estos últimos aumentar sus emisiones en un monto equivalente. Pese a esta transferencia, los créditos se ven reflejados tanto en el inventario nacional del país que los generó y transfirió, como también en los países receptores de los créditos, quienes reportan esto a la CMNUCC.

Dicho lo anterior, Chile se ha visto fuertemente beneficiado con políticas provenientes de estos tratados, cabe recordar los cientos de proyectos que se originaron del Mecanismo para un Desarrollo Limpio (MDL), donde la cantidad de proyectos se muestran a continuación:

Región	Número de proyectos
Región Metropolitana	14
Región I	9
Región II	15
Región III	5
Región IV	13
Región IX	12
Región V	13
Región VI	15
Región VII	11
Región VIII	29
Región X	19
Región XI	3
Región XII	4
Total	**162**

Tabla 7: *Cantidad de proyectos realizados o en construcción entre los años 2000-2020, por regiones de Chile.* ***Fuente:*** *Elaboración propia con información de UNEP, 2019.*

Además, se posee la información de la cantidad de dióxido de carbono que se espera recuperar, o bien dicho de la cantidad de bonos de emisiones generados:

Región	Acumulado esperado 2012 $ktCO_2eq$	Acumulado esperado 2020 $ktCO_2eq$	Acumulado esperado 2030 $ktCO_2eq$
Región Metropolitana	10.634	39.302	72.587
Región I	31	5.143	12.821
Región II	3.986	28.177	59.221
Región III	4.511	26.620	52.911
Región IV	1.714	8.754	16.320
Región IX	273	4.621	11.234
Región V	4.787	11.342	16.166
Región VI	8.280	28.530	49.935
Región VII	381	6.577	14.961
Región VIII	6.060	24.551	46.443
Región X	843	8.556	19.900
Región XI	4	125	225
Región XII	344	979	1.538
Total	**41.849,21**	**193.277,77**	**374.261,53**

Tabla 8: *Cantidad de emisiones acumuladas por tonelada de CO2 eq, por regiones de Chile.* ***Fuente:*** *Elaboración propia con información de UNEP, 2019.*

Por último, se cuenta con la siguiente información de la inversión realizada en cada región de Chile, con el mecanismo para un desarrollo limpio:

Región	Inversión MUS$	Inversión US$/tCO2	Precio promedio CER US$/tCO2
Región Metropolitana	1.113,11	1.864,35	
Región I	763,70	8.508,41	14,00
Región II	2.152,26	10.251,65	15,00
Región III	383,80	1.205,62	10,00
Región IV	939,14	12.213,10	17,77
Región IX	386,45	5.873,68	18,00
Región V	226,11	2.552,85	
Región VI	1.234,39	4.432,85	15,92
Región VII	437,94	3.676,96	18,75
Región VIII	1.227,66	12.235,95	12,90
Región X	582,00	11.544,57	17,50
Región XI			
Región XII	17,00	1.317,73	
Total general	**9.463,57**	**75.677,70**	**15,72**

Tabla 9: *Inversión realizada en proyectos MDL en Chile en las diferentes regiones, además de precio promedio pagado en las distintas regiones por un bono de emisiones CER.* ***Fuente:*** *Elaboración propia con información de UNEP, 2019.*

Chile en el paso fue uno de los países que más se benefició con el MDL, y es por esto, que dada su experiencia y capacidades creadas en los profesionales en Chile, nos sería fácil transitar al uso del Artículo 6, financiando de esta forma proyectos que estén más allá de los compromisos asumidos por nuestra NDC (contribuciones nacionales asignadas) y aumentando de esta forma la ambición climática del país.

5.4.3 Análisis legal

La normativa legal de Chile enfocada a la captura, transporte y almacenamiento de dióxido de carbono no se encuentra desarrollada o bien indicadores de una posible implementación, ante lo cual es un punto agravante para la implementación de esta tecnología dentro del país, ya que retrasa su uso e implementación.

En lo que respecta a leyes y decretos emitidos por Chile en el ámbito ambiental, según la Biblioteca del Congreso Nacional se encuentran leyes que destacan en el plano del Medio Ambiente y las emisiones, como lo son:

- Ley 19.300 que establece un marco general de regulación del derecho a vivir en un medio ambiente libre de contaminación, la protección del medio ambiente, la preservación de la naturaleza y la conservación del patrimonio ambiental. Asimismo, regula los instrumentos de gestión ambiental como la Evaluación Ambiental Estratégica, el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental y el Acceso a la Información Ambiental, la Responsabilidad por Daño Ambiental, la Fiscalización y el Fondo de Protección Ambiental y la institucionalidad ambiental de Chile (1994).
- Artículo 8 de la Ley 20.780, que marca una implementación del impuesto verde a las industrias nacionales que emitan al aire material particulado. Dicho impuesto tiene vigencia para los establecimientos cuyas fuentes fijas, conformadas por calderas o turbinas, individualmente o en su conjunto sumen una potencia mayor o igual a $50\ [MWt]$ (2018).
- Decreto 38 que aprueba el reglamento para la dictación de normas de calidad ambiental y de emisiones (2013).
- Decreto 2467 que aprueba el reglamento para los laboratorios de medición y análisis de emisiones atmosféricas provenientes de fuentes estacionarias (1994).

Cabe mencionar que lo expuesto anteriormente son los lineamientos originales de las leyes, donde dichos documentos han sufrido actualizaciones o bien reestructurados para actualizarse a las contingencias de los años que van pasando, para conocer dicho detalle dirigirse a las referencias de la Biblioteca del Congreso por el año de emisión de la ley o en su caso de los decretos expuestos.

Por lo tanto, se deben realizar acotaciones en este punto, de acuerdo a la mirada de la normativa internacional en este punto, ya que, si bien es una postura ampliamente aceptada, la tecnología de la captura de dióxido de carbono ha pasado por diferentes fases de aceptación debido a las consecuencias que puede traer el almacenamiento de dichos gases en la tierra.

Ante esto, se necesita un marco regulatorio sólido para atraer la mirada de inversores y así generar un mayor interés en desarrollar esta tecnología.

Según Sanz (2013), se requiere que:

- Exista una limitación de emisiones a la atmósfera de determinados agentes contaminantes procedentes de grandes instalaciones de combustión.
- Las nuevas instalaciones industriales deben estar preparadas con tecnología de captura y almacenamiento de dióxido de carbono, y a su vez la industria existente debe ser capaz de poder reacondicionarse a las nuevas exigencias medio ambientales.
- Se deben emitir permisos de investigación para suelos que puedan ser óptimos para el almacenamiento geológico.
- Exista prevención y control integrado de la contaminación, en todas las aristas de la industria.
- Exista una red de transporte de CO_2 mediante tuberías subterráneas, suficientemente seguras y que permita la unión entre las industrias. Además de que se imponga el acceso a terceros a las redes y emplazamientos de potenciales lugares de almacenamiento, independiente de que sean públicos o privados.
- Los lugares de almacenamiento de dióxido de carbono (e impurezas existentes) son de exclusiva responsabilidad de quienes los usan, por lo tanto, son los

responsables de los daños ambientales que se pudiesen generar en caso de una mala administración, uso y no mantención del lugar.

Debe existir además una reforma a los mercados de emisiones de gases de efecto invernadero, ya que debe plantearse la opción de que una fuga, aunque sea mínima desde los mecanismos planteados debe ser respaldada por estos derechos de emisión. Dichos derechos, deben ser adquiridos en el mercado o mediante la realización de proyectos generadores de créditos de carbono.

5.4.4 Análisis político

Ya se ha mencionado que Chile es uno de los países con mayores riesgos por la acción del cambio climático, donde el índice Global de Riesgo Climático, elaborado por la organización de medio ambiente y desarrollo Germanwatch, Alemania, ha declarado que Chile está en el décimo lugar del ranking de los diez países más afectados por el cambio climático a lo largo del planeta, incluyendo los consiguientes riesgos para sus territorios y población. Este índice considera aquellos países que más han sufrido desastres naturales como olas de calor, inundaciones, lluvias torrenciales, etc., en la última década. Según el estudio, Chile cumple con siete de los nueve criterios de vulnerabilidad ante el cambio climático definidas por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático: áreas de borde costero de baja altura; zonas áridas, semiáridas, con cobertura forestal y expuestas al deterioro forestal; zonas insulares pequeñas; propensión a los desastres naturales; zonas propensas a la sequía y la desertificación; zonas urbanas con problemas de contaminación atmosférica, y zonas de ecosistemas frágiles y montañosos como las cordilleras de la Costa y de los Andes (Universidad Técnica Federico Santa María, 2019).

Es por esta razón que Chile es un actor participe de la lucha contra el cambio climático, ya que reconoce la transversalidad de la problemática y busca incluir la temática en sus políticas públicas, apuntando a la planeación y desarrollo de un eje orientador. Por ejemplo, con el Acuerdo de Paris, Chile se compromete a preparar, comunicar y mantener sucesivamente su contribución determinada a nivel nacional, con plazo de implementación entre 2018 y 2030, incluyendo diversas metas y acciones en el ámbito de la mitigación y adaptación al cambio climático, creación de capacidades, transferencia tecnológica y financiamiento (Ministerio de Medio Ambiente, 2017).

Según señala el Ministerio de Medio Ambiente (2018), los avances en mitigación han sido significativos dado el mayor involucramiento sectorial. Esto ha permitido el desarrollo de nuevas políticas públicas que apuntan a apoyar la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Además, el creciente involucramiento del sector privado permitirá la implementación de acciones concretas que lleven al país a cumplir con sus compromisos e incrementar su ambición.

Lo mencionado anteriormente se ve reflejado en el plan de descarbonización de la matriz energética anunciada por el presidente de Chile, donde en el corto plazo se busca cerrar ocho termoeléctricas que funcionan a carbón, con la finalidad de que a 2040 no queden instalaciones, a menos que cumplan con la implementación de tecnologías de captura de dióxido de carbono, por lo tanto la voluntad en el plano político e industrial si se está haciendo presente para avanzar y mitigar los efectos de los gases de efecto invernadero en el país.

Además, cabe destacar que, durante el año 2019, Chile será sede de la COP25 debido a que Brasil no quiso afrontar el compromiso, donde dicha cumbre es una de las más importantes en lo que respecta a decisiones y lineamientos a considerar en la crisis ambiental

en la que se encuentra el mundo. Hay que considerar que dicho evento viene a hacer frente a los estándares y objetivos internacionales, y se deben tomar decisiones de importancia estratégica (Senado, 2019).

A su vez, como miembro sede de la COP25, Chile en vista de esto tomo un compromiso de ser un país carbono neutral a 2050. Convirtiéndolo así en el primer país en vías de desarrollo de proponérselo. Lo que significa que Chile, pueda ser capaz de absorber tanto dióxido de carbono como el que genera, de modo que el impacto medioambiental sea cero (Revista Energética de Chile, 2019).

5.5 Dualidad de la captura de carbono

A continuación, se analizará el uso que se le da al dióxido de carbono en la industria del petróleo, mediante la recuperación mejorada de este mediante la inyección de CO_2 en pozos de baja productividad.

Según señala Castro & Arana (2013) en la industria del petróleo siempre ha sido de vital importancia la maximización de la recuperación de los hidrocarburos que se encuentran almacenados en los yacimientos, para así obtener el mayor rendimiento posible de los recursos que se han implementado. La vida productiva de los yacimientos se puede dividir en tres etapas:

- Primaria: Esta etapa comienza desde el inicio de la explotación de un yacimiento y es aquella en la cual se aprovecha la energía natural con la que cuenta el depósito de petróleo. En esta etapa se puede considerar el uso de tecnologías tales como el fracturamiento hidráulico o el uso de sistemas artificiales.

- Secundaria: En esta etapa, el objetivo es inyectar al yacimiento energía adicional, ya sea por medio de agua o de gas natural, ya que ambos procesos actúan como un mantenimiento de presión.
- Mejorada: En esta etapa para continuar con la explotación del yacimiento se requiere de implantar tecnologías que modifiquen las propiedades tanto de la roca como de los fluidos almacenados en el yacimiento.

Ahora bien, en términos generales la recuperación mejorada del petróleo (EOR), se define como el conjunto de métodos que emplean fuentes externas de energía y/o materiales para producir el crudo que no puede ser producido por medios convencionales. La recuperación mejorada tendrá cada vez más un papel primordial en la explotación de los yacimientos, ya que estudios recientes de la Agencia Internacional de Energía (2004), señalan que el 20% de la producción de petróleo en el mundo al año 2030 provendrán por este medio.

Por ejemplo, ya en el año 2011 el entonces presidente de la Sociedad de Ingenieros de Petróleo, Alain Labastie sostuvo: "El factor de recuperación promedio estimado de los yacimientos petrolíferos a nivel mundial, es de alrededor del 35%. Esto significa que aproximadamente dos tercios del petróleo que se ha descubierto se deja en los yacimientos. Tenemos bajo nuestros pies, en lugares bien conocidos, enormes perspectivas para aumentar nuestras reservas. Aumentar el factor de recuperación promedio del 35% al 45% produciría 1 trillón de barriles de petróleo" (2011). En el caso de yacimientos de petróleo no convencionales, el factor de recuperación promedio es sólo de entre el 5% y el 10%, lo que significa un enorme potencial para producir más petróleo, tanto de los depósitos convencionales, como no convencionales en todo el mundo.

Es por esto que según el estudio de Santamaría (2018), el método más aceptado para realizar el almacenamiento permanente de CO_2, son los de tipo geológico, y la alternativa más idónea para dicho almacenamiento son los yacimientos salinos profundos, capas de carbón (no explotables), basaltos y yacimientos de aceite o gas hidrocarburo.

Al inyectar el CO_2, este desplazará los fluidos contenidos en el espacio poroso obteniendo así una recuperación adicional de hidrocarburos y en consecuencia un retorno monetario derivado del costo de la captura y almacenamiento del mismo.

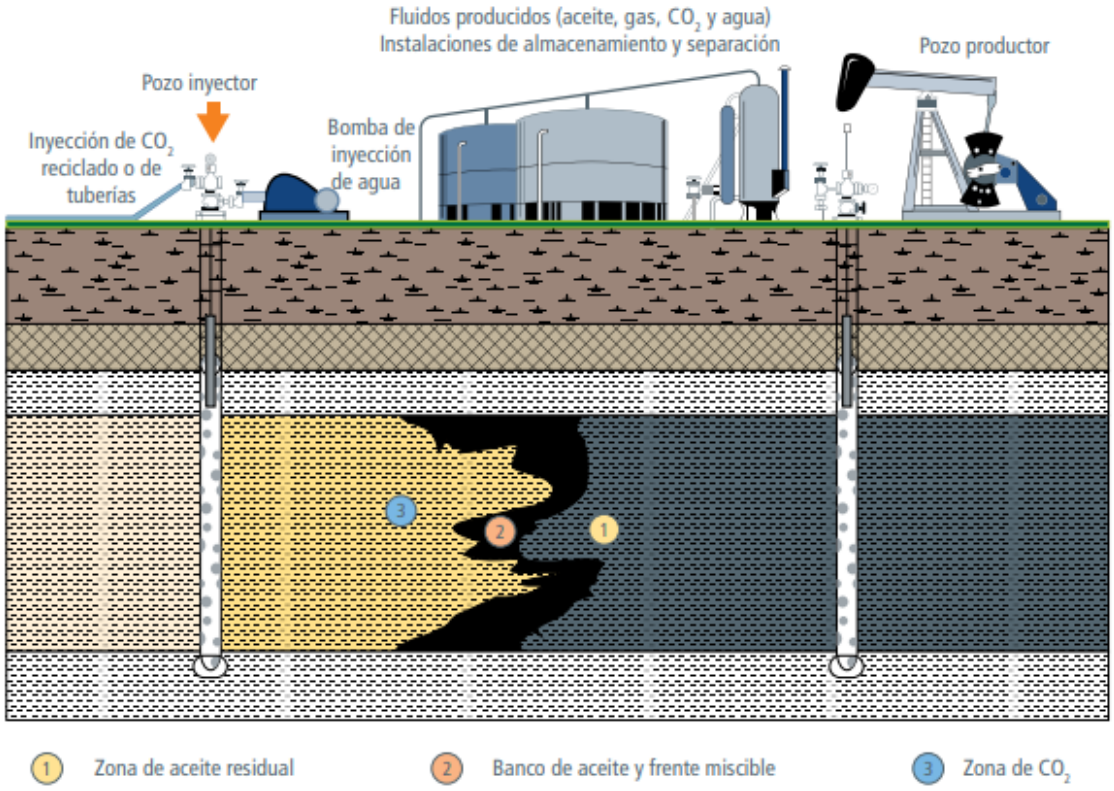


Figura 10: *Proceso gráfico de la inyección de dióxido de carbono en un pozo petrolero, para la realización de la recuperación mejorada de hidrocarburo.* ***Fuente:*** *Santamaria (2018).*

En base a lo anterior, se recae en una disyuntiva de cual es el verdadero propósito de utilizar el almacenamiento geológico o bien de tipo acuifero de dióxido de carbono, ya que se busca amenizar la realidad con los gases de efecto invernadero, o bien seguir utilizando y a su vez seguir explotando el uso de hidrocarburos, lo cual seguirá generando emisiones de

gases a la atmosfera. Donde dichos efectos se ven reflejados en países productores de petróleo, ya que ellos son losque van a utilizar estos mecanismos para aumentar la extracción de este recurso no renovable, ya que en Chile solo se utiliza el producto una vez procesado, es decir los derivados del petróleo. Por lo tanto, dicha industria o bien procesos quedan descartados de esta propuesta para el país.

5.6 Hoja de ruta para implementación

En base a las metas que se proponen en términos de combatir el cambio climático a nivel global, la opción de desarrollar a nivel industrial la tecnología de captura, transporte y almacenamiento de dióxido de carbono se ha convertido en una mirada atractiva para los gobiernos, debido a que los países se encuentran cada vez más industrializados y el nivel de emisiones que son expulsadas al ambiente van creciendo, por lo tanto hay que hacerle frente, y es por esto que hay que comenzar a probar las ideas que han dado éxito a nivel experimental y en laboratorios a micro escala y comenzar a financiar dichos proyectos.

La industria idealmente apta para implementar tecnologías de captura de dióxido de carbono es en termoeléctricas que utilicen carbón, petróleo o gas para su funcionamiento, ya que los procesos de pre y post combustión son adaptables a estas. A su vez dicha industria entra en el plan de descarbonización de Chile y de la generación de energía, por lo tanto, hay que tener cuidado con cerrar estas empresas de golpe debido a que generaría inconvenientes dentro del país como:

- No garantizar seguridad eléctrica al país, por desabastecimiento.
- Generar inconvenientes con inversionistas de dichos proyectos y poner en cuestionamiento futuras inversiones.

- Problemas de economía.

Lo mismo sucede con empresas de diferentes industrias, debido a que el no adaptarse a exigencias medio ambientales puede generar cierre de empresas provocando incremento en el desempleo del país. Por lo tanto, se debe apoyar o bien fomentar el uso de tecnologías que vayan de la mano de la nueva visión sobre mitigaciones del cambio climático.

En términos de transporte falta implementar una política que vaya de la mano con el bienestar de la población, ya que generar una planificación de tuberías (en caso de transporte terrestre) que se dispongan por el país no debe generar disminución de la calidad de vida en el sentido de que sean construcciones que atraviesen una ciudad entera de forma superficial. Lo mismo sucede con el almacenamiento geológico, ya que el no tener cuidado y desarrollar los correctos estudios y mantenciones, repercutirá en daño ambiental que puede ser difícil de recuperar en el corto-mediano plazo.

Por lo tanto, no es solo querer hacer frente a las emisiones sino a todo lo que involucra implementar tecnologías, como en este caso es la captura y almacenamiento de carbono, ya que se deben modificar y/o implementar nueva legislación entorno al tema, tomando como una guía lo que se ha estado trabajando en Europa, con la finalidad de crear bases sólidas y que haya una real conciencia por hacer un cambio.

También, se debe hacer frente a como incentivar a las empresas a adoptar esta tecnología en sus fábricas, ya que actualmente solo está el cargo que se debe realizar mediante impuestos por las toneladas emitidas de CO_2 mediante el impuesto verde, por lo tanto, el mercado de compensaciones que se esta proponiendo puede significar una gran oportunidad para que las empresas más contaminantes reviertan lo hecho e inviertan en nuevas tecnologías

que reduzcan sus emisiones y contribuir al lineamiento que propone el gobierno de Chile, y que mediante las iniciativas del Ministerio de Medio Ambiente buscan cumplir con los objetivos y promesas que se propusieron en las cumbres internacionales de cambio climático.

Por lo tanto, el tener planteada una hoja de ruta, un plan para mitigar las emisiones de dióxido de carbono es relevante para poder obtener éxito a nivel país.

Se propone realizar el siguiente procedimiento:

1. Establecer el rol participe del gobierno y de los ministerios asociados/interesados en la mitigación de gases de efecto invernadero en el país. Para esto es necesario saber cuál es el real interés y la voluntad política existente.
2. Plantear el objetivo principal y los objetivos secundarios para la investigación y desarrollo de tecnologías de captura, transporte y almacenamiento de CO_2 en el país, y asociarlo con el actor clave de las instituciones involucradas para poder cumplir la meta dentro del proyecto, ya que se conocen los interesados en su implementación.
3. Desarrollo y estudio de línea base de emisiones de gases al medio ambiente, con apoyo del inventario nacional de gases de efecto invernadero, emisiones de fuentes puntuales por empresa, y realizar una evaluación de las que presenten indicadores más significativos.
4. Definir rol de la industria privada, con el cumplimiento de los objetivos planteados en un comienzo.
5. Realizar evaluación de empresas aptas para aplicar tecnología de captura de CO_2, comenzando con termoeléctricas que no estén próximas a ser cerradas por el plan

de descarbonización del estado, y que estén dispuestas a asumir la inversión para extender su vida útil de funcionamiento. Empresas dedicadas a la industria cementera y posteriormente expandirse al resto de las industrias que emiten emisiones contaminantes.

6. Desarrollar un plan de seguridad energética nacional, con la finalidad de garantizar los suministros a la población y a las industrias, en vista del plan de descarbonización de la matriz energética y de la apertura de nuevas fuentes de energía renovable, en el marco de la captura de dióxido de carbono.
7. Creación de una normativa legal y/o modificación de esta para establecer las bases mínimas de exigencias para realizar captura, transporte y almacenamiento de dióxido de carbono. Dentro de este punto lo que se busca es garantizar la seguridad tanto económica de una empresa, social en relación a la comunidad adyacente y ambiental de no alterar su biodiversidad y mantener su equilibrio sin causar daños aparentes.

   Los puntos que deberían tratarse desde un comienzo son los siguientes:

- Las empresas deben hacerse cargo de sus emisiones y del entorno que está siendo afectado.
- Garantizar la seguridad del empleo en las empresas que sean afectadas por el impuesto verde, de tal forma que no aumente el desempleo en el país por el cierre de empresas.
- Las empresas que realicen almacenamiento de dióxido de carbono deben hacerse cargo de su traslado y posterior resguardo del gas, con la finalidad de evitar fugas

y emisiones esquivas que puedan alterar el equilibrio del entorno que rodea estos sistemas.

- Desarrollar guías y mecanismos para incentivar la inversión y adopción de nuevas tecnologías que apoyen la mitigación de gases de efecto invernadero.

8. Elaborar estudio de almacenamiento geológico en yacimientos agotados de gas natural o de petróleo en el extremo sur de Chile.
9. Generar un estudio de almacenamiento geológico en países extranjeros, en vista de tratados y acuerdos internacionales.
10. Elaborar estudio de almacenamiento geológico en llanuras terrestres que cumplan con los requisitos mínimos para almacenar dióxido de carbono, que sean próximos a las industrias óptimas para capturar dicho gas.
11. Elaborar estudio técnico y de impacto ambiental para el diseño de una red de transporte entre la empresa que realice captura de carbono y su punto de almacenamiento, ya sea mediante tuberías, a través de gas comprimido en buque o camión cisterna, con la finalidad de obtener un plan óptimo de ruta.
12. Definir plan de implementación del impuesto verde con la finalidad que dicho impuesto vaya acorde al costo de implementar la tecnología de captura de almacenamiento de dióxido de carbono, ya que así se incentiva la implementación en vez de que sea más conveniente pagar por tonelada de gas emitido.
13. Elaborar plan de búsqueda de fuentes de financiamiento para la industria, tanto en el mercado nacional como internacional, ya sea mediante privados o utilización de bonos de carbono.

14. Elaboración de una planta piloto en el sector energético (u otra industria), con la finalidad de corroborar la existencia de eficiencia energética, disminución de emisiones y a su vez realizar un nuevo análisis económico de la tecnología post implementación.
15. Creación de un sistema de monitoreo, reportes y verificación de los datos obtenidos, luego del primer año de operación y así compararlo con la línea base desarrollada previamente.
16. Divulgación de resultados obtenidos en el proyecto piloto, de forma de expandir el proyecto y persuadir de adherirse a nuevas empresas a implementar las nuevas tecnologías.

Lo planteado anteriormente se resume en el siguiente esquema:

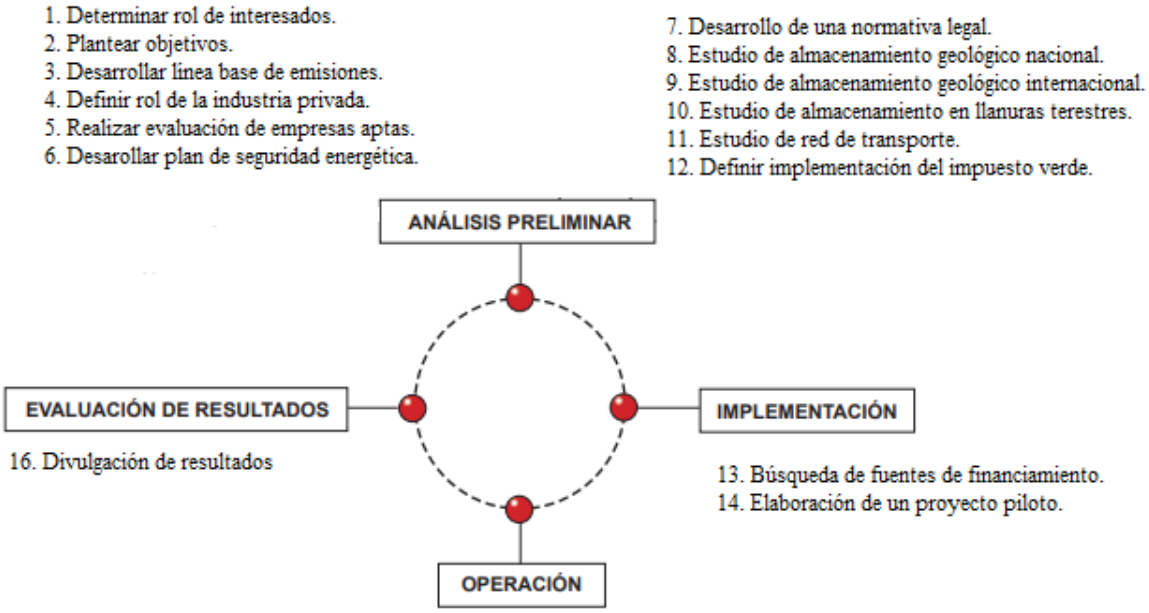


Figura 11: *Hoja de ruta para un plan de implementación de sistemas de captura, transporte y almacenamiento de dióxido de carbono.* ***Fuente:*** *Elaboración propia.*

5.7 Relación entre el impuesto verde y el costo de capturar dióxido de carbono

Como se ha mencionado anteriormente, uno de los factores que influyen en la aplicación de tecnologías de captura de dióxido de carbono es el capital requerido para poner en marcha los proyectos, ya que en un comienzo los costos han sido considerablemente elevados, tal como lo menciona el Instituto de Investigación sobre Evolución Humana (2018) que, en el año 2011, el costo de capturar una tonelada de CO_2 equivalía a 600 dólares, pero ya para el año 2018 en adelante la barrera de los 100 dólares por tonelada capturada se podría haber roto, y comenzaría a ser una opción viable. Pero el costo de esta tecnología debe ir a la par con el mercado de carbono mundial, donde algunos precios por tonelada de dióxido de carbono emitido se pueden ver a continuación:

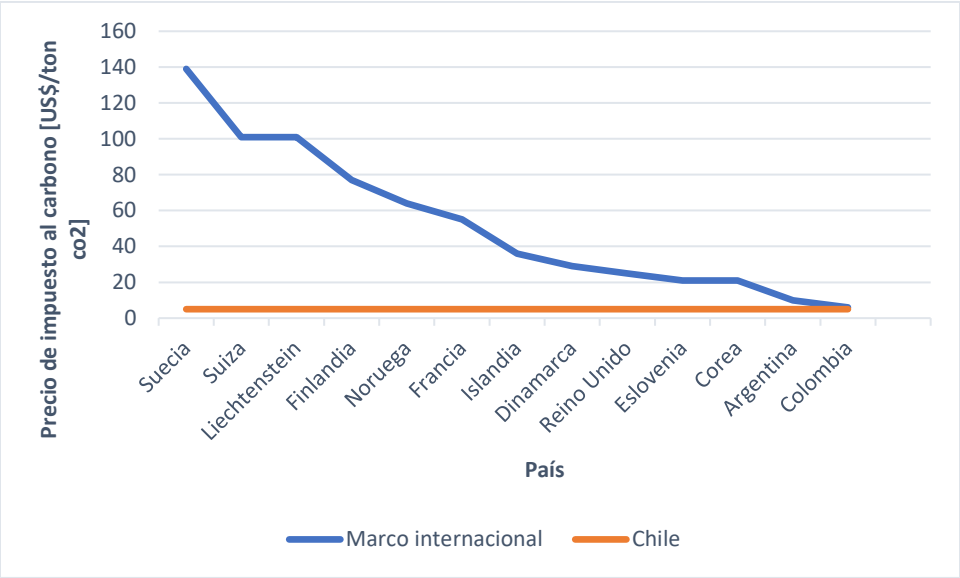


Gráfico 4: *Precio del impuesto a las emisiones de dióxido de carbono en el plano internacional, en relación a Chile.* ***Fuente:*** *Elaboración propia (2019).*

Donde se puede destacar que, en el aspecto tributario chileno, emitir una tonelada de dióxido de carbono cuesta 5 dólares, donde dicho valor es infinitamente menor a Suecia, donde emitir dicha tonelada de gas equivale a 139 dólares. En cuanto a los pares de la región, Argentina y Colombia tienen un impuesto fijado de 10 y 6 dólares respectivamente.

Dicho impuesto fue fijado en el año 2015, y que esta ad portas de ser ratificado en la nueva reforma tributaria en la sección del impuesto verde, no va de la mano de lo que se espera de Chile según los compromisos acordados en el Acuerdo de París, ya que para el año 2020 el impuesto debiese estar fijado entre 40 u 80 dólares por tonelada de CO_2 emitida, y para el año 2030, el costo de emitir dióxido de carbono debiese tener un valor de 50 a 100 dólares. Lo cual lleva al impuesto verde de Chile a estar ocho veces por debajo de los compromisos internacionales adoptados, ya que para alcanzar dicha meta el precio del impuesto debiese ser de 32 dólares por tonelada de gas emitida (Parra, 2019).

Para el año 2017, por un artículo de James Temple con información de los proyectos energéticos de Estados Unidos se pudo obtener que el capturar una tonelada de dióxido de carbono tiene un costo de 60 dólares en plantas de carbón, 100 dólares en procesadoras de cemento y acero y 70 dólares en para capturar CO_2 en plantas de gas natural. Ahora bien, a fines de 2018 en la Cumbre Internacional de CCS realizada por el Gobierno del Reino Unido y la Agencia Internacional de Energía, se presentó un proyecto indicando que se habían obtenido grandes reducciones monetarias para capturar CO_2, obteniendo así una disminución de hasta un 67% por tonelada capturada, llegando a un valor de 45 dólares (International CCS Knowledge Centre, 2018).

Lo mencionado en el párrafo anterior, lo podemos relacionar con el impuesto verde actual de Chile, y el sugerido en la nueva reforma tributaria, ya que el costo de la tecnología sigue siendo ampliamente superior, lo que es equivalente a que conviene pagar el impuesto en vez de implementar y reacondicionar la industria a esta nueva tecnología. Por lo que se propone lo siguiente en relación al gráfico que se muestra:

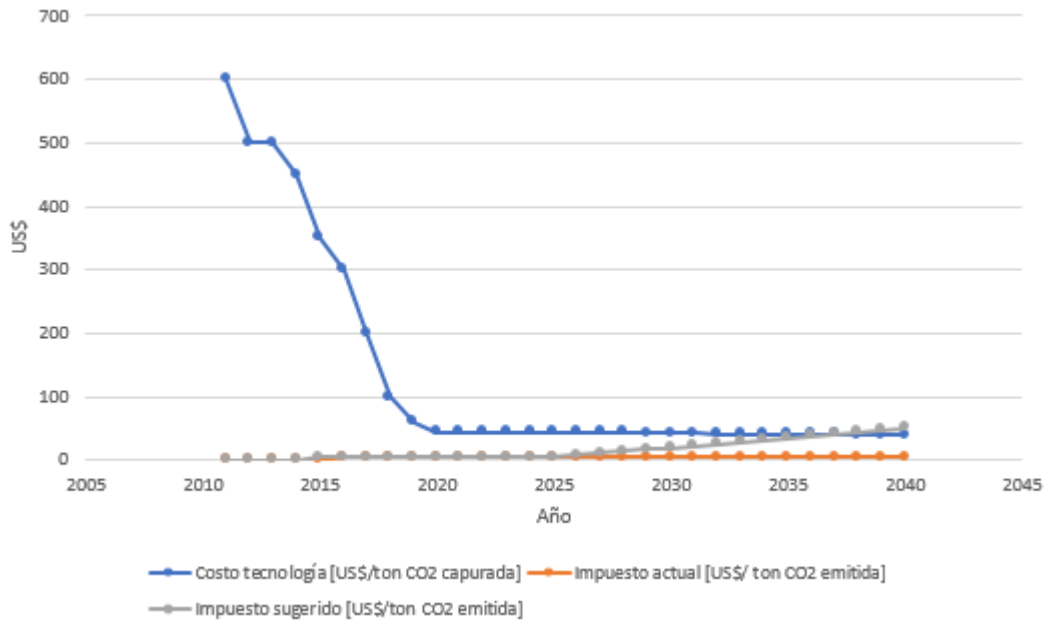


Gráfico 5: *Evolución del precio de capturar dióxido de carbono versus el precio del impuesto actual y sugerido en Chile.* ***Fuente:*** *Elaboración Propia.*

El gráfico 5 se trabaja bajo la información planteada anteriormente, considerando que la captura de carbono internacional se fijó en 600 dólares en un comienzo y ha sufrido una disminución paulatina hasta llegar a los 45 dólares según los últimos estudios presentados. Además, se deja de manifiesto la condición actual de los 5 dólares que implica emitir dióxido de carbono en Chile, y un impuesto sugerido que hace el quiebre con la condición actual considerando que en la nueva reforma tributaria que se tiene pensada el valor se mantendrá hasta 2025, es por esto que se sugiere ir incrementando dicho impuesto año tras año en un valor de 3 dólares por tonelada emitida hasta llegar a 2040. A su vez, a los valores planteados del costo de capturar dióxido de carbono se le irá disminuyendo un dólar cada tres años por motivo de eficiencia tecnológica.

Para poder encontrar el punto de inflexión, tanto en el costo como en el año de implementación eficiente es que se le realiza un ajuste potencial a la curva de “costo de

tecnología", y a su vez se le realiza un ajuste lineal a la curva de "impuesto sugerido", obteniendo así lo siguiente:

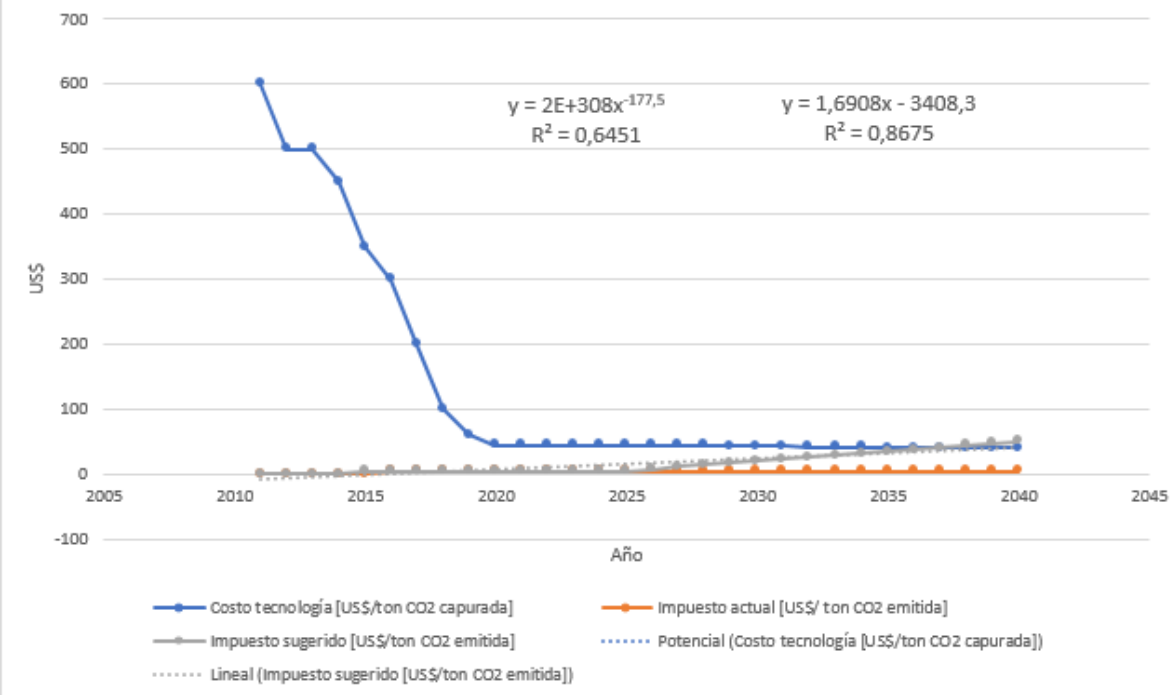


Gráfico 6: Curvas ajustadas para el costo de la tecnología e impuesto sugerido, según su tendencia gráfica. **Fuente:** Elaboración propia.

Donde para la curva de "costo tecnología" e "impuesto sugerido" tienen un coeficiente de determinación de $R^2 = 0{,}6451$ y R^2=0,8675 respectivamente, haciendo así posible la búsqueda del impuesto deseado, cruzando dichas curvas con las respectivas regresiones obtenidas.

Ante lo cual se obtiene, que para el año 2037 y con un impuesto equivalente de 41 dólares por tonelada emitida a las industrias, la tecnología de captura de carbono comenzará a ser viable en el país. Esto lleva a pensar que antes de ese año ya se va a estar preparando el mercado para recibir este impacto, ya que liberar emisiones de gases de efecto invernadero no va a salir tan barato como lo era en un comienzo.

Dicho lo anterior, cabe destacar el plan de descarbonización de la matriz eléctrica que el gobierno tiene planeado, ya que se propone cerrar todas las termoeléctricas a carbón antes del 2040, y existe presión desde distintos actores (tanto políticos como de la sociedad civil) para adelantar esta meta al 2030. En cualquiera de los dos escenarios se hace muy poco atractivo invertir en una planta de captura de dióxido de carbono debido a que no habrán grandes emisoras, aunque si la tecnología CCS podría alargar la vida de operación de una de estas centrales, especialmente IEM (infraestructura Energética Mejillones) que se puso en operación este año.

Para adelantar la entrada del CCS en Chile, debido a que esta medida no está considerada dentro de las proyecciones para lograr nuestra NDC (contribuciones nacionales determinadas), el gobierno podría generar ITMOS para tranzar bajo el artículo 6, se espera que estos certificados alcancen el orden entre los 40 y 60 USD/ton CO_2, esto podría adelantar la entrada del CCS, pero siempre y cuando esté fuera de las proyecciones de la NDC.

6. CONCLUSIONES

En un mundo que va tomando consciencia en que las acciones que realiza, tienen consecuencias para el futuro, es importante que se vayan tomando medidas para mitigar los daños que se han ido provocando y han contribuido a la crisis climática mundial, y a Chile. Considerando que cerca del 90% de las emisiones de gases de efecto invernadero corresponden a dióxido de carbono, y estas en general van aumentando año tras año debido a la quema de combustibles fósiles, es que toman relevancia los proyectos y el desarrollo tecnológico, para hacerle frente a este problema, y es en dicho tema donde va tomando relevancia la captura del dióxido de carbono, en vez de ser liberado al medio ambiente.

Si bien Chile no se encuentra dentro de los países top en cuanto a emisiones de GEI, es un país altamente vulnerable al cambio climático, debido a su geografía, por lo tanto, debe proponer medidas y seguir modelos de éxito que estén rindiendo frutos en el resto del mundo. Dichas características van acorde a la diversidad, ya que presenta zonas áridas, zonas de bosques, distinción hídrica entre las diferentes regiones, zonas urbanas y rurales ampliamente marcadas, ecosistemas montañosos, etc.

Es por esto, que Chile hace referencia a la adopción de protocolos internacionales, ya que el intercambio de tecnología es relevante para el país, como la implementación de más de 100 proyectos a lo largo de las regiones por el programa MDL, lo cual lleva de la mano la venta de bonos de carbono en países del primer mundo para de cierta forma mitigar las acciones de sus emisiones de GEI. El desarrollo de estos proyectos va desde la instalación de

plantas de energías renovables no convencionales, hasta abastecer pueblos rurales con tecnologías menos contaminantes que las que desarrollan actualmente.

El desarrollo de la captura de carbono a nivel mundial, se encuentra aún en fase exploratoria, sin adquirir grandes compromisos más haya de plantas pilotos, como lo fue en Europa, donde mayormente fracasaron dichos proyectos. Pero en base a la experiencia que se adquirió, destaca el tipo de proyectos que se pueden realizar en la industria chilena, donde ya sea en el reacondicionamiento de plantas, o bien la creación de nuevos proyectos, se obtiene que la tecnología debe ser por pre-combustión o bien post-combustión, donde la primera corresponde a capturar el gas antes de la reacción química obteniendo principalmente CO_2 e Hidrógeno, en cambio el segundo método una vez realizada la combustión del combustible, se generan gases los cuales mediante absorción selectiva retienen el dióxido de carbono producido, el cual debe separarse después aplicando calor. Existe un tercer método que es por oxicombustión, en el cual inyecta oxigeno puro a la mezcla de gases, pero dichos procesos se encuentran en fase de estudio y de laboratorio aun, lo cual los hace tener un alto costo. Por lo tanto, los primeros dos métodos son los más desarrollados y con mayor madurez tecnológica, además de capturar entre el $80 - 90$ % de dióxido de carbono emitido. Además, que pueden ser aplicadas en termoeléctricas, que es una de las industrias más contaminantes en el país debido a la dependencia de la matriz de los combustibles fósiles.

Para ver la factibilidad global de implementar estos proyectos en la actualidad del país, hay que plantear que no se encuentran preparadas las condiciones, y que sería un fracaso el tratar de imponerlas. Esto debido a que, si bien las políticas del presidente y del Ministerio de Medio Ambiente van en un correcto lineamiento, aun falta mucho por hacer. Principalmente porque no existen incentivos económicos para las empresas de adoptar dichas

tecnologías, debido a que el costo inicia es altísimo para hacerle frente en el corto plazo. Y como se menciono anteriormente, Chile solo se ha beneficiado de los proyectos de Mecanismo para un Desarrollo Limpio. En cuanto a términos legales, el cual es el principal motivo de fracaso de proyectos en el extranjero, Chile no contempla una base robusta de leyes y reformas que garanticen la seguridad de la captura, transporte y el almacenamiento de dióxido de carbono, ya que hace falta generar responsabilidades serias y garantizar la seguridad de la población y el medio ambiente, ya que no se obtiene nada si se va a resolver un problema como lo son las emisiones de GEI, y se van a generar nuevos problemas que deban ser solucionados a futuro.

Es por esto que se elabora una hoja de ruta para la implementación de estos proyectos en las diferentes empresas, pasando primero por reformas que debe enfrentar el país, debido a que no se encuentra preparado para enfrentar estos desafíos. Donde dicho plan, pasa por el establecimiento de objetivos y definición de actores importantes para el desarrollo del plan, generar normativa legal, y la realización de estudios de prefactibilidad y factibilidad, debido a que una vez capturado el CO_2 se debe transportar hasta lugares seguros para su almacenamiento. Hasta la elaboración de un proyecto piloto y el estudio y divulgación de los resultados obtenidos.

Como se menciono anteriormente, Chile no se encuentra preparado, y mucho menos las empresas para hacer frente a la implementación de esta tecnología. Actualmente resulta más conveniente pagar el impuesto verde, el cual posee un costo menor. Y esta tendencia se mantendrá por unos años más debido a la nueva reforma tributaria que establece dicho impuesto en 5 dólares por emitir una tonelada de CO_2, hasta el año 2025. Ahora bien, la tecnología para capturar dicho gas, ha ido en una constante baja llegando actualmente al valor

de 45 dólares por tonelada capturada, lo cual comparando dichas situaciones genera incompatibilidad financiera entre ambos valores. Debido principalmente a lo mencionado al comienzo de este párrafo. Donde al realizar una proyección básica se obtiene que, en el año 2037, es decir en 18 años más va a ser viable si se mantienen los costos sin alteraciones.

Lo anterior, pese a ser contradictorio para el país por los planes que se poseen al 2030 y al 2050, no lo es del todo, debido a que se poseen grandes planes de reforestación, electro movilidad, la restructuración de la matriz energética a energías renovables y que el porcentaje de estas sea mayor, lo cual va de la mano del cierre de generadoras de energía a carbón para el año 2040 en su totalidad, todo esto con el fin de conseguir la carbono neutralidad para el año 2050. Lo cual da a entender que con más apoyo y divulgación de información se pueden conseguir los objetivos propuestos tanto en esta memoria, como a nivel país. Además de dejar planteado que los lineamientos están siendo correctos.

Por último, las limitaciones de este estudio se encuentran en la elaboración de un presupuesto para la generación de una planta con la cual se pueda capturar dióxido de carbono, el diseño de una red de transporte de dicho gas, y por último el estudio de los lugares aptos poder almacenar lo obtenido, ya sea tanto a nivel geográfico como submarino, ya que se enfoco en cuales eran las experiencias y estudios internacionales en base a la tecnología, y como poder replicarlas en Chile.

7. REFERENCIAS

Agencia Internacional de Energia (2004). A Review of Global Capacity Estimates for the Geological Storage of Carbon Dioxide, IEA Greenhouse Gas R&D Programme Technical Review (TR4), March 23, 2004, 27pp.

Arriols, E., (2018). Qué son los mercados de carbono: tipos y cómo funcionan. [en línea] <https://www.ecologiaverde.com/que-son-los-mercados-de-carbono-tipos-y-como-funcionan-1628.html> [consulta: 23 junio 2019]

Asociación de Generadoras de Chile (2019). Boletín del mercado eléctrico Sector Generación. Recuperado de: http://generadoras.cl/media/page-files/817/Boletin%20Sector%20Generacion%20Marzo%202019.pdf

ASTE. Fiorella. ¿En qué consiste el acuerdo de Paris? [en línea] La Tercera en internet. 31 de mayo, 2017. https://www.latercera.com/noticia/consiste-acuerdo-paris/ [consulta: 10 marzo 2019]

Banco Mundial (2015). Informe anual 2015. Recuperado de: https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/22550/WBAnnualReport2015SP.pdf

BBC Mundo (2011). Reducir carbono negro, “la estrategia más rápida contra el calentamiento”[en línea] https://www.bbc.com/mundo/noticias/2011/09/110905_carbono_negro_am [consulta: 19 agosto 2019]

Bennaceur, k., Gupta, N., Sakurai, S., Whittaker, S., Monea, M., Ramakrishnan, T. & Randen, T. (2004). Captación y almacenamiento de CO_2: Una solución al alcance de la mano. *Oilfield Review*, 16(4), 48-65.

Biblioteca del Congreso Nacional (1994). Aprueba ley sobre bases generales del medio ambiente. [en línea] < https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=30667&idParte=0> [consulta: 2 septiembre 2019]

Biblioteca del Congreso Nacional (1994). Aprueba reglamento de laboratorios de medición y análisis de emisiones atmosféricas provenientes de fuentes estacionarias. [en línea] < https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=19019&idParte=0> [consulta: 2 septiembre 2019]

Biblioteca del Congreso Nacional (2013). Aprueba reglamento para la dictación de normas de calidad ambiental y de emisión. [en línea] < https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=1053036&idParte=0> [consulta: 2 septiembre 2019]

Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (2018). Implementación del impuesto verde en Chile. Recuperado de: https://www.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/26723/1/BCN___Implementacion_de_Impuesto_Verde_en_Chile.pdf

CAIT Climate Data Explorer (2017). Emisiones de gases de efecto invernadero. Washington DC: Instituto de Recursos Mundiales. Recuperado de: http://cait.wri.org

Castro, L. & Arana, V. (2013). “Inyección de CO_2 como método de recuperación mejorada”. Recuperado de: http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/6747/TESIS_FINAL.pdf?sequence=1

Chen, C., Habert, G., Bouzidi, Y., Jullien, A., 2010. Environmental impact of cement production: detail of the different processes and cement plant variability evaluation. J. Clean. Prod. 18, 478e485.

Ciclo del Carbono (2019). Consumo energético e impacto ambiental de la captura y almacenamiento de carbono. [en línea] <https://www.ciclodelcarbono.com/consumo_energtico_e_impacto_ambiental_de_la_captura_y_almacenamiento_de_carbono> [consulta: 1 septiembre 2019]

Clemente, M. & Naharro, J., (2009). Comparación de las tecnologías de captura y almacenamiento de CO_2 en la generación de energía. Anales de Real Academia de Doctores de España. Volumen 13, pp.19-29, 2009.

CNN Español (2017). Estos son los países de América Latina que más CO_2 emiten [en línea] <https://cnnespanol.cnn.com/2017/06/08/estos-son-los-paises-de-america-latina-que-mas-co2-emiten/> [consulta: 20 noviembre 2018]

Comisión Económica para América Latina (CEPAL) (2009). La economía del cambio climático en Chile: síntesis. Naciones Unidas, Santiago de Chile. Recuperado de: https://www.cepal.org/es/publications/list?search_fulltext=cambio%20clim%C3%A1ti-co&page=12

Comisión Europea (2017). Proyectos de Captura y Almacenamiento de CO_2 del PEER. Recuperado de: http://ec.europa.eu/energy/eepr/projects/files/carbon-capture-and-storage/ccs-eepr-summary_es.pdf

Cooperativa (2019). ENAP busca perforar 60 pozos en Magallanes para explotar gas natural y petróleo. [en línea] < https://www.cooperativa.cl/noticias/pais/region-de-magallanes/enap-busca-perforar-60-pozos-en-magallanes-para-explotar-gas-natural-y/2019-07-29/170212.html> [consulta: 29 agosto 2019]

CORVALÁN. Marcela, FIERRO. Pamela, PÉREZ-CUETO. Constanza. Cómo contribuyen las empresas chilenas a la sustentabilidad. [en línea] La Tercera en internet. 22 de abril, 2015. http://www2.latercera.com/noticia/como-contribuyen-las-empresas-chilenas-a-la-sustentabilidad/ [consulta: 22 octubre 2018].

Ecoosfera (2015). ¿Cuáles países son los que emiten más CO_2 a la atmósfera? [en línea] <https://ecoosfera.com/2015/06/cuales-paises-son-los-que-emiten-mas-co2-a-la-atmosfera/> [consulta: 20 noviembre 2018]

Educar Chile (2019). Explotación y uso del gas natural en Chile. [en línea] < https://www.aprendeconenergia.cl/explotacion-y-uso-del-gas-natural-en-chile/> [consulta: 29 agosto 2019]

Energías Renovables (2018). El periodismo de las energías limpias. Diez años de fracaso para la captura y almacenamiento de CO_2. [en línea] <https://www.energias-renovables.com/panorama/diez-anos-de-fracaso-para-la-captura-20181023> [consulta: 10 junio 2019]

Fundación de Ecología y Desarrollo (2009). Guía desarrollo limpio. Recuperado de: https://ecodes.org/component/option,com_phocadownload/Itemid,340/id,13/view,category/#

General, P. (2015). Definición del Protocolo de Kioto [en línea]. Recuperado de: <https://conceptodefinicion.de/protocolo-de-kioto/> [consulta: 5 marzo 2019]

González, C. (2019). Chile Carbono Neutral: Expertos piden mayor esfuerzo al sector transporte y un acuerdo nacional para capturar CO_2 con reforestación (país circular). [en línea] <http://www.cr2.cl/chile-carbono-neutral-expertos-piden-mayor-esfuerzo-al-sector-transporte-y-un-acuerdo-nacional-para-capturar-co2-con-reforestacion-pais-circular/> [consulta: 23 agosto 2019]

GÓMEZ, Marcela. El novedoso impuesto verde que recauda y apunta al cambio de conductas. [en línea] Pauta en internet, 19 agosto, 2019. https://www.pauta.cl/economia/como-sera-impuesto-verde-a-emisiones-contaminantes-reforma-tributaria

Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (2019). La captación y el almacenamiento de dióxido de carbono. Resumen para responsables de políticas y Resumen técnico. Recuperado de: https://archive.ipcc.ch/pdf/special-reports/srccs/srccs_spm_ts_sp.pdf

Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC) (2014). 5° Informe de Evaluación del Clima (AR5, 2013/14). Recuperado de: http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/

Gutiérrez, P. Vigil, M. & Burgos, S. (2014). Tecnologías de captura de CO_2. *DYNA*, 89(4), 360-365.

Instituto de Investigación sobre Evolución Humana (2018). El costo de la captura de carbono disminuye. [en línea] <http://www.iieh.com/noticias/noticias-737136/noticias/la-captura-de-carbono-se-abarata> [consulta: 25 septiembre 2019]

Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile (2019). ICH presentó Hoja de Ruta 2019 para industria del cemento. [en línea] <https://ich.cl/ich/noticias-ich/ich-presento-hoja-de-ruta-2019-para-industria-del-cemento/> [consulta: 24 agosto 2019]

Instituto Nacional de Estadistica (2019). El índice de producción industrial decreció 0,8% interanualmente en marzo de 2019. [en línea] < https://www.ine.cl/prensa/detalle-prensa/2019/04/30/el-%C3%ADndice-de-producci%C3%B3n-industrialdecreci%C3%B3-0-8-interanualmente-en-marzo-de-2019> [consulta: 24 agosto 2019]

International CCS Knowledge Centre (2018). El costo de capturer CO(2) se reduce en un 67% para a próxima planta de captura de carbono. [en línea] < https://www.efe.com/efe/america/comunicados/el-costo-de-capturar-co-2-se-reduce-en-un-67-para-la-proxima-planta-captura-carbono/20004010-3827625> [consulta: 25 septiembre 2019]

Jackson, R., Le Quéré, C., Andrew, R., Canadell, J., Peters, G., Roy, J. y Wu, L. (2017). Warning signs for stabilizing global CO_2 emissions. *Environmental Research Letters*. 12 (2017).

Jakobsen, J., Roussanaly, S., Anantharaman, R., (2017). A techno-economic case study of CO2 capture, transport and storage chain from a cement plant in Norway. Journal of Cleaner Production 144 (2017) 523-539.

Khan Academy (2017). El ciclo del carbon [en línea] <https://es.khanacademy.org/science/biology/ecology/biogeochemical-cycles/a/the-carbon-cycle> [consulta: 24 marzo 2019].

Kwak, D., & Kim, J. (2017). Techno-economic evaluation of CO2 enhanced oil recovery (EOR) with the optimization of CO2 supply. International Journal of Greenhouse Gas Control, 58, 169-184.

Labastie, A. (2011). Increasing Recovery Factors: A Necessity. *Society of Petroleum Engineers.*

Le Quéré, C., Andrew, R., Friedlingstein, P., Sitch, S. Pongratz, J., Manning, A. et al. (2017). Global Carbon Budget 2017. *Earth System Science Data.*

Lei, L., Ning, Z., Wei, W., & Yuhan , S. (2011). A review of research progress on CO_2 capture, storage and utilization in Chinese Academy of Sciences. *Fuel.* Fuel 108 (2013)112-130.

Ministerio de Energía (2018). Cuarta mesa de descarbonización analizó los efectos del retiro de unidades de carbón. Recuperado de: http://www.energia.gob.cl/tema-de-interes/cuarta-mesa-de-descarbonizacion

Ministerio de Medio Ambiente (2010). Mecanismo de Desarrollo Limpio. Recuperado de: https://mma.gob.cl/cambio-climatico/mecanismo-de-desarrollo-limpio/

Ministerio de Medio Ambiente (2015). Contribución nacional tentativa de Chile (INDC) para el acuerdo climático Paris 2015. Recuperado de: http://portal.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2016/05/2015-INDC-web.pdf

Ministerio de Medio Ambiente (2017). Plan de acción nacional de cambio climático 2017-2022. Recuperado de: http://portal.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2018/06/PANCCv3-19-10-baja.pdf

Ministerio de Medio Ambiente (2018). Tercer informe bienal de actualización de Chile sobre cambio climático 2018. Recuperado de: https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2018/12/3rd-BUR-Chile-SPanish.pdf

Nationa Geographic (2015). El incierto futuro de la captura y almacenamiento de carbono. [en línea] <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/el-incierto-futuro-de-la-captura-y-almacenamiento-de-carbono> [consulta: 25 septiembre 2019]

Organización de Naciones Unidas (1995). Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático. Recuperado de: https://unfccc.int/resource/docs/convkp/convsp.pdf

Organización de Naciones Unidas (1997). Protocolo de Kioto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático. Recuperado de: https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf

Organización de Naciones Unidas (2013). Convención Marco de Las Naciones Unidas sobre El Cambio Climático. CDM Project Cycle. *Clean Development Mechanism (CDM) Training Workshop.* Monrovia, Liberia, 23-24 September 2013. Recuperado de: https://cdm.unfccc.int/stakeholder/rcc/workshops/lome/03.pdf

Organización de Naciones Unidas (2015). Acuerdo de París. Recuperado de: https://unfccc.int/sites/default/files/spanish_paris_agreement.pdf

Organización de Naciones Unidas (2016). GEO-6. Resumen de las evaluaciones regionales del sexto informe sobre las perspectivas del medio ambiente mundial: Resultados principales y mensajes políticos. Recuperado de: https://cnnespanol2.files.wordpress.com/2017/06/resumen_de_las_evaluaciones_regionales_del_sexto_informe_sobre_las_perspectivaas_del_medio_ambiente_mundial_geo-6__resultados_principales_y_mensajes_-1.pdf

Organización de Naciones Unidas (2018). Día internacional de la preservación de la capa de ozono, 16 de septiembre [en línea]. Recuperado de: <http://www.un.org/es/events/ozoneday/background.shtml> [consulta: 10 marzo 2019].

Organización Mundial de la Salud (2005). Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. Recuperado de: http://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/69478/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_spa.pdf;jsessionid=2B9B64BDCC52B3EF5BBC1018E9910D77?sequence=1

Parra, F. (2019). Impuesto verde: Precio que fijó el gobierno es 8 veces menor a lo que se recomienda para alcanzar las metas del Acuerdo de París. [en línea] < https://www.eldesconcierto.cl/2019/08/22/impuesto-verde-precio-que-fijo-el-gobierno-es-8-veces-menor-a-lo-que-se-recomienda-para-alcanzar-las-metas-del-acuerdo-de-paris/> [consulta: 25 septiembre 2019]

Patrickson, C. (2019). Artículo 6 del Acuerdo de París, mecanismos de mercado y Ley de cambio climático [en línea]. Recuperado de: < http://leycambioclimatico.cr2.cl/wp-content/uploads/2019/06/Policy-brief-Christian-Patrickson.pdf> [consulta: 5 septiembre 2019]

Quintana, J., Aceituno, P. (2012). Changes in the rainfall regime along the extratropical west coast of South America (Chile): 30-43 °S. *Atmosfera* 25(3450): 1-22.

Registro de emisiones y transferencia de contaminantes (2017). Análisis de emisiones por proceso (fuentes puntuales 2017). Recuperado de: https://datosretc.mma.gob.cl/group

Revista Energética de Chile (2019). Chile y su meta de ser carbono neutral en 2050: El ambicioso camino de los otros países que también se propusieron serlo. [en línea] <http://www.revistaei.cl/2019/06/20/chile-y-su-meta-de-ser-carbono-neutral-en-2050-el-ambicioso-camino-de-los-otros-paises-que-tambien-se-propusieron-serlo/#> [consulta: 30 septiembre 2019]

Roca, J. (2017). El sueño europeo de captura de carbono se desvanece tras el fracaso de Engie y Uniper en Holanda. [en línea] <https://elperiodicodelaenergia.com/el-sueno-europeo-de-captura-de-carbono-se-desvanece-tras-el-fracaso-de-engie-y-uniper-en-holanda/> [consulta: 11 junio 2019]

Rodríguez, J. (2012). ¿Qué es el CO_2? [en línea] <https://www.concienciaeco.com/2012/02/20/que-es-el-co2/> [consulta: 4 marzo 2019]

Romeo, L. & Bolea, I. (2015). Captura de CO_2 en procesos postcombustión. Recuperado de: http://www.gecarbon.org/boletines/articulos/BoletinGEC_035_art2.pdf

Rosa, A., Martínez, M., & Jiménez, J. (2016). Impacto del desarrollo de tecnologías de captura, transporte y almacenamiento de CO_2 en el sector eléctrico. Revista de Economía Aplicada, vol. XXIV, num. 72, 2016, pp. 57-85. Universidad de Zaragoza. Zaragoza. España.

Rubin, E., & De Coninck, H. (2005). IPCC special report on carbon dioxide capture and storage. *UK: Cambridge University Press. TNO (2004): Cost Curves for CO2 Storage, Part, 2*.

Saldívar, S., Cabrera, J., Reta, M. (2017). Tecnologías de captura y almacenamiento de dióxido de carbono. *Revista de Ciencias Naturales y Agropecuarias.* 2017, 4-12: 22-34.

Santamaría, C. (2018). Recuperación Mejorada de Petróleo Mediante la Inyección de Dióxido de Carbono Antropogénico. Recuperado de: https://petroquimex.com/PDF/JulAgo18/EOR-Con-CO2.pdf

Santibañez, E., (2014). Captura y almacenamiento de carbono para mitigar el cambio climático: modelo de optimización aplicado a Brasil. Revista internacional de contaminación ambiental. 30(3), 235-245. Recuperado de: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S01884999201400030001&lng=es&tlng=es

Sanz, I. (2013). La captura y almacenamiento de carbono: una novedosa técnica de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero regulada por la Unión

Europea. Pontificia Universidad Católica de Perú. Revista de la facultad de derecho. n°70, 2013. Pp. 165-186.

Senado (2019). COP25: Cómo se financia y cuáles son los beneficios de este encuentro en Chile. [en línea] <https://www.senado.cl/cop25-como-se-financia-y-cuales-son-los-beneficios-de-este-encuentro-en/senado/2019-04-05/123715.html> [consulta: 30 septiembre 2019]

Serrano, G., Pérez, J., Marmolejo, D. (2017). Análisis de oportunidades para la captura de CO_2, almacén y uso del CO_2 (CCS O CCUS) para una central termoeléctrica nacional. *Jóvenes en la ciencia*. Vol. 2 no. 1, Verano de investigación científica, 2016.

Servicios de Información y Noticias Científicas (SINC) (2017). ¿Cuántos gases de efecto invernadero emite África? Recuperado de: https://www.agenciasinc.es/Noticias/Cuantos-gases-de-efecto-invernadero-emite-Africa

Silvestre-Albero, J., Silvestre-Albero, A., Casco, M., Reinoso, F. (2014). Retos actuales para la captura y almacenamiento de CO_2. *In Anales de la Real Sociedad Española de Química* (No. 1, pp. 30-34). Real Sociedad Española de Química.

SolidWorks (2010). Materia anisotrópico. [en línea] <http://help.solidworks.com/2010/spanish/solidworks/cosmosxpresshelp/AllContent/SolidWorks/NonCore/SimulationXpress/c_Anisotropic_Material.html> [consulta: 22 enero 2019]

T13 (2019). [Video] Gobierno compromete el cierre de 8 centrales a carbón en cinco años. [en línea] <https://www.t13.cl/noticia/nacional/gobiero-anuncia-cierre-ocho-centrales-carbon-proximos-cinco-anos> [consulta: 28 agosto 2019]

Teffer, P. (2017). Tras gastar 587 millones de euros, la UE tiene cero plantas de almacenamiento de CO_2. [en línea] <https://euobserver.com/investigations/139257> [consulta: 11 junio 2019]

Temple, J. (2018). Así comienza la era de la captura y almacenamiento de carbono. [en línea] < https://www.technologyreview.es/s/10011/asi-comienza-la-era-de-la-captura-y-almacenamiento-de-carbono> [consulta: 25 septiembre 2019]

Tribunal de Cuentas Europeo (2018). Demostración de captura y almacenamiento de carbono y energías renovables innovadoras a escala comercial en la UE: en los últimos diez años no se han conseguido los avances previstos. [en línea] <https://www.eca.europa.eu/Lists/ECADocuments/SR18_24/SR_CCS_ES.pdf> [consulta: 10 junio 2019]

Universidad de Chile (2016). ¿Qué es una economía circular? [en línea] < http://ingenieria.uchile.cl/noticias/122856/que-es-una-economia-circular> [consulta: 20 noviembre 2018]

Universidad Técnica Federico Santa María (2019). Chile será uno de los países más afectados por el cambio climático en América Latina. [en línea] <https://noticias.usm.cl/2019/01/30/chile-sera-uno-de-los-paises-mas-afectados-por-el-cambio-climatico-en-america-latina/> [consulta: 2 septiembre 2019]

VERRA (2018). Verified Carbon Standard, The VCS Program. [en linea] < https://verra.org/project/vcs-program/> [consulta: 25 junio 2019]

VILDÓSOLA Patricia. Biomasa: Una opción energética a mirar. [en línea] El Mercurio en internet. 20 de Julio, 2017. http://www.elmercurio.com/campo/noticias/noticias/2017/07/20/biomasa-una-opcion-energetica-a-mirar.aspx [consulta: 23 agosto 2019]

World Resources Institute (2015). Infografía: ¿Cómo se ven las emisiones de tu país? [en línea] <https://www.wri.org/blog/2015/06/infographic-what-do-your-countrys-emissions-look> [consulta: 20 noviembre 2018]

Yaumi, A., Bakar, A. & Hameed, B. (2017). Recent advances in functionalized composited solid materials for carbon dioxide capture. *Energy*.Energy 124 (2017) 461-480.

8. ANEXOS

3.1 Anexo I: Detalle de emisiones de gases de efecto invernadero en Chile, tanto por sector como por gas emitido.

Sector	1990	2000	2010	2013	2014	2015	2016
1. Energía	33.679,7	52.511,9	68.623,5	79.993,7	77.417,0	83.713,4	87.135,6
2. IPPU	3.295,4	6.243,6	5.492,5	6.144,0	6.233,9	6.584,8	6.939,3
3. Agricultura	12.071,4	14.008,7	13.244,1	12.848,4	12.419,1	12.210,6	11.801,6
4. UTCUTS	-50.061,0	-62.676,4	-71.930,9	-71.887,5	-55.722,4	-44.972,4	-65.492,3
5. Residuos	2.969,3	3.822,4	4.502,2	5.318,4	5.403,9	5.734,5	5.801,1
Balance	1.955,0	13.910,3	19.931,4	32.416,9	45.751,5	63.270,9	46.185,2
Total	52.015,9	76.586,7	91.862,3	104.302,7	101.473,9	108.243,3	111.677,5

Figura A.I: INGEI de Chile: emisiones y absorciones de GEI ($kt\ CO_2\ eq$) por sector, serie 1990-2016. **Fuente:** Ministerio de Medio Ambiente (2018).

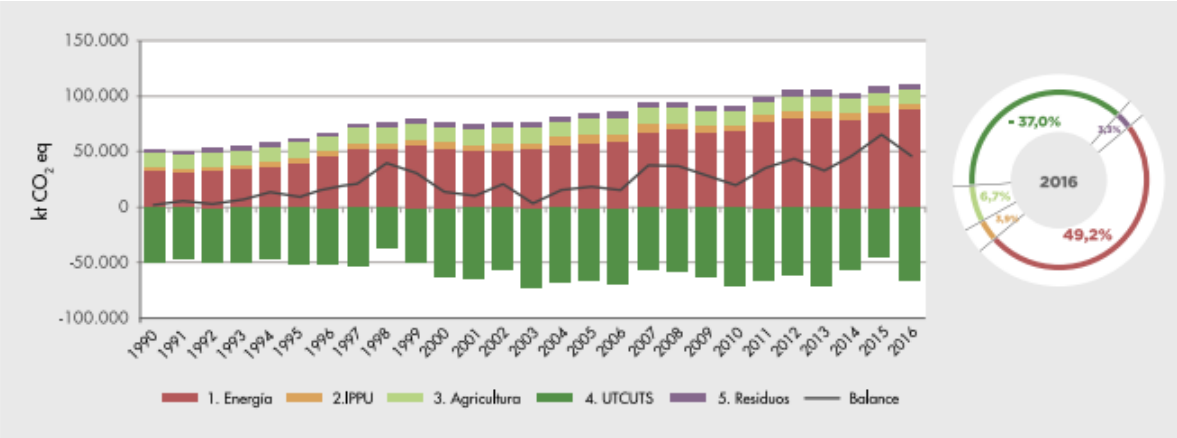


Figura A.II: INGEI de Chile: balance de GEI $(kt\ CO_2\ eq)$ por sector, serie 1990-2016.

Fuente: Ministerio de Medio Ambiente (2018).

GEI	1990	2000	2010	2013	2014	2015	2016
CO_2 (incl. UTCUTS)	-16.787,6	-7.655,8	-2.080,4	9.056,3	21.624,5	38.428,7	22.186,4
CO_2 (excl. UTCUTS)	33.490,1	55.116,9	70.137,1	81.007,7	78.032,2	84.565,5	87.889,3
CH_4 (incl. UTCUTS)	13.024,9	14.681,5	13.562,8	14.265,8	14.375,3	14.684,7	14.064,3
CH_4 (excl. UTCUTS)	12.894,5	14.623,7	13.390,7	14.227,5	13.962,9	13.983,9	13.937,7
N_2O (incl. UTCUTS)	5.656,3	6.708,6	7.206,2	6.992,8	7.181,5	7.326,4	6.792,8
N_2O (excl. UTCUTS)	5.569,9	6.670,2	7.091,7	6.967,2	6.908,5	6.862,8	6.708,8
Gases fluorados	61,3	175,9	1.242,8	2.101,9	2.570,3	2.831,1	3.141,7
HFC	NO	81,9	1.000,1	1.868,1	2.337,4	2.588,8	2.869,5
PFC	NO	NE	NE	NE	NE	NE	NE
SF_6	61,3	94,1	242,7	233,8	232,9	242,3	272,3
Balance	1.955,0	13.910,3	19.931,4	32.416,9	45.751,5	63.270,9	46.185,2
Total	52.015,9	76.586,7	91.862,3	104.304,3	101.473,9	108.243,3	111.677,5

Figura A.III: INGEI de Chile: emisiones y absorciones de GEI $(kt\ CO_2\ eq)$ por gas, serie 1990-2016. **Fuente:** Ministerio de Medio Ambiente (2018).

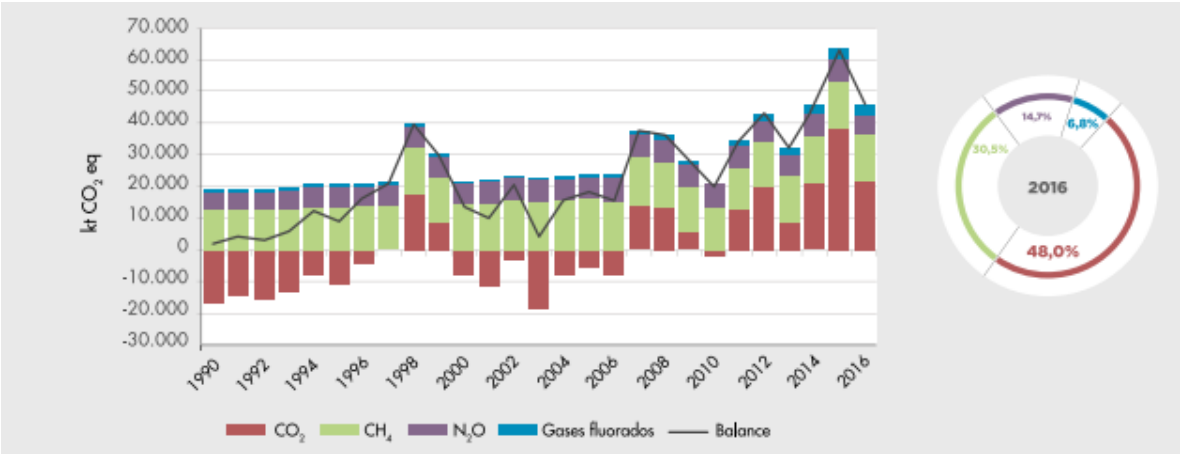


Figura A.IV: INGEI de Chile: balance de GEI ($kt\ CO_2\ eq$) por gas, serie 1990-2016.

Fuente: Ministerio de Medio Ambiente.

"Es evidente que el CO2 es el gas de efecto invernadero que mueve la tendencia, como lo demuestran los picos (años 1998, 2002, 2007, 2012 y 2015) y los valles (2003, 2010) de la serie. Llama la atención como el balance del CO2 es favorable a la absorción para los primeros años de la serie (1990- 1998) y para el periodo entre 2000 y 2007. Esto se debe a la absorción de las tierras forestales y al mayor uso de gas natural para la generación eléctrica en comparación con otros combustibles fósiles" (Ministerio de Medio ambiente, 2018).

3.2 Anexo II: Detalle por región de la cantidad de empresas que son afectadas por el impuesto verde.

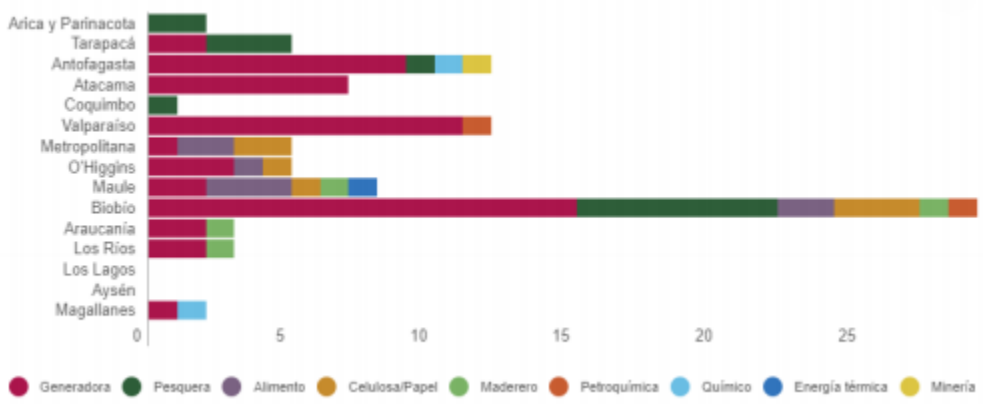


Figura A.V: Establecimientos afectos al pago de impuestos verdes según rubro, para el año 2017. **Fuente:** Biblioteca del Congreso Nacional, 2018.

Según el tipo de contaminante emitido por las industrias afectadas, se obtuvo que el 88% corresponde a CO_2, 8% a $material\ particulado$, 3% a NO_x y 1% a SO_2.

3.3 Anexo III: Valor de impuesto pagado y compensaciones recibidas.

Compensación por empresa SIC - SING							
Empresa	Impuesto pagado			Compensación			
	SIC	SING	Total	SIC	SING	Total	Porcentaje
AES GENER	$ 14.612.058.220	$ 5.390.984.190	$ 20.003.042.410	$ 628.077.646	$ 577.894.020	$ 1.205.971.666	6,03%
ESSA	$ 2.975.984.735		$ 2.975.984.735	$ 419.676.069	$ -	$ 419.676.069	14,10%
ENEL GENERACION	$ 14.293.614.936	$ -	$ 14.293.614.936	$ 1.311.262.527	$ -	$ 1.311.262.527	9,17%
COLBUN	$ 14.041.445.855	$ -	$ 14.041.445.855	$ 219.168.940	$ -	$ 219.168.940	1,56%
ENGIE	$ -	$ 11.702.344.592	$ 11.702.344.592	$ -	$ 6.367.162.378	$ 6.367.162.378	54,41%
GUACOLDA	$ 10.721.452.230	$ -	$ 10.721.452.230	$ 2.490.283.188	$ -	$ 2.490.283.188	23,23%
ANGAMOS	$ -	$ 9.464.687.481	$ 9.464.687.481	$ -	$ 214.558.520	$ 214.558.520	2,27%
COCHRANE	$ -	$ 7.688.296.418	$ 7.688.296.418	$ -	$ 1.202.059.967	$ 1.202.059.967	15,63%
ARAUCOBIOENERGIA	$ 3.778.631.853	$ -	$ 3.778.631.853	$ 2.689.976	$ -	$ 2.689.976	0,07%
HORNITOS	$ -	$ 3.369.745.236	$ 3.369.745.236	$ -	$ 892.518.034	$ 892.518.034	26,49%
ANDINA	$ -	$ 3.299.462.405	$ 3.299.462.405	$ -	$ 472.701.509	$ 472.701.509	14,33%
GASATACAMA	$ -	$ 2.143.825.989	$ 2.143.825.989	$ -	$ 517.911.887	$ 517.911.887	24,16%
BIOENERGIAS FORESTALES	$ 2.012.979.896	$ -	$ 2.012.979.896	$ 25.414.077	$ -	$ 25.414.077	1,26%
PETROPOWER	$ 1.980.687.079	$ -	$ 1.980.687.079	$ -	$ -	$ -	0,00%
TAMAKAYA ENERGÍA	$ -	$ 1.217.912.051	$ 1.217.912.051	$ -	$ 795.301.560	$ 795.301.560	65,30%
SGA	$ 155.689.005	$ -	$ 155.689.005	$ 71.504.614	$ -	$ 71.504.614	45,93%
ELÉCTRICA NUEVA ENERGÍA S.A.	$ 113.189.007	$ -	$ 113.189.007	$ -	$ -	$ -	0,00%
COMASA S.A.	$ 77.713.796	$ -	$ 77.713.796	$ 254.471	$ -	$ 254.471	0,33%
ENERGÍA BIO BIO	$ 64.382.292	$ -	$ 64.382.292	$ -	$ -	$ -	0,00%
ORAFTI	$ 61.230.491	$ -	$ 61.230.491	$ 54.616.493	$ -	$ 54.616.493	89,20%
CARDONES SA	$ 35.795.670	$ -	$ 35.795.670	$ 21.112.923	$ -	$ 21.112.923	58,98%
Energía Pacífico S.A.	$ 30.654.686	$ -	$ 30.654.686	$ -	$ -	$ -	0,00%
MASISA S.A.	$ 15.680.598	$ -	$ 15.680.598	$ -	$ -	$ -	0,00%
COLMITO	$ 24.477.191	$ -	$ 24.477.191	$ 11.412.539	$ -	$ 11.412.539	46,63%
Los Guindos	$ 19.646.161	$ -	$ 19.646.161	$ 3.744.851	$ -	$ 3.744.851	19,06%
SWC	$ 7.206.124	$ -	$ 7.206.124	$ 4.734.086	$ -	$ 4.734.086	65,70%
ORAZUL (DUKE)	$ 5.332.417	$ -	$ 5.332.417	$ 1.481.442	$ -	$ 1.481.442	27,78%
ENLASA	$ 3.545.791	$ -	$ 3.545.791	$ 7.238	$ -	$ 7.238	0,20%
EMELDA	$ 2.574.629	$ -	$ 2.574.629	$ 449.703	$ -	$ 449.703	17,47%
ENORCHILE	$ 1.246.990	$ -	$ 1.246.990	$ 404.942	$ -	$ 404.942	32,47%
ENERGÍA LEÓN	$ -	$ -	$ -	$ -	$ -	$ -	
Totales	$ 65.035.219.652	$ 44.277.258.362	$ 109.312.478.014	$ 5.266.295.726	$ 11.040.107.874	$ 16.306.403.600	

Figura A.VI: Valores de impuestos pagado y valores a compensar por sistema. **Fuente:**

Biblioteca del Congreso Nacional, 2018.