



PRESUPUESTOS DE CARBONO: UNA OPORTUNIDAD PARA AMPLIAR LA AMBICIÓN CLIMÁTICA DEL SECTOR ELÉCTRICO

CONeCC

Conectando energía y cambio climático

La colaboración de la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH con la Iniciativa Climática de México (ICM) para este proyecto se realizó bajo el marco del Proyecto "Convergencia de la Política Energética y de Cambio Climático en México (CONECC)" el cual forma parte de la Iniciativa Internacional de Protección del Clima (IKI). El Ministerio Federal de Medio Ambiente, Protección de la Naturaleza y Obras Públicas (BMU) apoya la Iniciativa por una decisión del Parlamento Alemán. Las opiniones expresadas en este documento son de exclusiva responsabilidad de las personas autoras y no necesariamente representan la opinión de la GIZ o de la Iniciativa Climática de México. Se autoriza la reproducción parcial o total, siempre y cuando sea sin fines de lucro y se cite la fuente de referencia.

GIZ / Iniciativa Climática de México

Presupuestos de carbono: Una oportunidad para ampliar la ambición climática del sector eléctrico. Ciudad de México, 17 de octubre de 2019

Edición y Supervisión: Jonas Russbild. Juan Carlos Mendoza Reyes. Quentin Bayart
Autor(es): Fernando N. Ramones Fernández, Luisa Sierra Brozon, Daniel Chacón y Rodrigo Palacios
Diseño: Spora

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Dag-Hammerskjöld-Weg 1-5
65760 Eschborn/Alemania
www.giz.de

Oficina de Representación de la GIZ en México

Torre Hemicor, PH
Av. Insurgentes Sur 826
Col. del Valle, Alcaldía Benito Juárez
C.P. 03100, Ciudad de México

T +52 55 55 36 23 44 giz-México@giz.de

Iniciativa Climática de México

Amores 1120, oficina 102
Col. Del Valle
C.P. 03100, Ciudad de México, México.

Los autores agradecen el apoyo en la elaboración de este informe a Pedro Hernández, Felipe Borja, Dahely Castelán, Alejandra Bolde y Zyanya Alanis Sánchez (GIZ).

Índice



Resumen Ejecutivo	7
--------------------------------	----------



Introducción	12
---------------------------	-----------



1. Presupuestos de carbono en el contexto global, nacional y sub-nacional	18
--	-----------

1.1 Fundamento científico del presupuesto de carbono.....	20
---	----

1.2 Modelos de evaluación integrados (IAMs).....	20
--	----

1.3 Ejemplos nacionales y subnacionales de presupuestos de carbono	22
--	----



2. Hacia un presupuesto de carbono para México	23
---	-----------

2.1 Selección de modelos y escenarios.....	25
--	----

2.2 Presupuesto de carbono para México	32
--	----

2.3 Resultados obtenidos bajo una trayectoria de 2°C.....	34
---	----

2.4 Resultados obtenidos bajo una trayectoria de 1.5°C	35
--	----

2.5 Propuesta de metas de mitigación nacional para el periodo 2019-2030.....	36
--	----



3. Presupuesto de carbono para el sector eléctrico	38
---	-----------

3.1 Resultados obtenidos bajo una trayectoria de 2°C y 1.5 grados	39
---	----

3.2 Propuesta de meta de mitigación del sector eléctrico para el periodo 2019 - 2030	40
---	----



4. Evaluación de una mayor penetración de energías renovables para el cumplimiento del presupuesto de carbono del sector eléctrico nacional	44
--	-----------

4.1 Análisis del PRODESEN 2019-2033 bajo el cumplimiento del presupuesto de carbono	45
--	----

4.2 Portafolio de tecnologías de energías renovables para el cumplimiento del presupuesto de carbono.....	50
--	----

4.3 Estimación de curvas de costo de abatimiento marginal.....	53
--	----



Conclusiones	56
---------------------------	-----------



Recomendaciones y siguientes pasos	58
---	-----------



Anexos	61
---------------------	-----------

Anexo 1. Metodología Iniciativa Climática de México: presupuesto de carbono nacional y del sistema eléctrico de México para mantener la temperatura media global en 2°C.....	62
--	----

Anexo 2. Metodología de la Iniciativa Climática de México: presupuesto de carbono nacional y del sistema eléctrico de México para mantener la temperatura media global en 1.5°C.....	69
--	----

Anexo 3. Taller de Socialización de Presupuestos de Carbono	71
---	----



Referencias	73
--------------------------	-----------

Índice de Tablas

Tabla 1: Metodología de línea base versus presupuesto de carbono	17
Tabla 2: Presupuestos de carbono del Reino Unido	22
Tabla 3: Descripción de los modelos IAM del grupo P1(*).....	25
Tabla 4: Descripción de los modelos IAM que presentan escenarios SSPx-1.9	30
Tabla 5: Comparativo del presupuesto de carbono global de ICM respecto a estimaciones de diferentes autores obtenidas a través de la trayectoria RCP2.6.....	33
Tabla 6: Metas de mitigación nacional para el periodo 2019-2030 para mantener la TMG en 2°C y 1.5°C (MtCO ₂ e).....	36
Tabla 7: Metas de mitigación del sector de generación de electricidad para el periodo 2019-2030 para mantener el aumento de la TMG en 2°C y 1.5°C (MtCO ₂ e)	40
Tabla 8: Metas de mitigación no condicionadas (NDC) comparadas con el presupuesto de carbono anual estimado del sector de generación de electricidad 2019-2030 de 2°C y 1.5°C (MtCO ₂ e).....	41
Tabla 9: Participación porcentual en la capacidad adicional 2018-2032 del Escenario de 2°C por tecnología.....	51
Tabla 10: Emisiones acumuladas de CO ₂ del periodo 2012 al 2100 compatible con las concentraciones atmosféricas simuladas en los CMIP5 Modelos del Sistema de la Tierra.	62
Tabla 11: Mediana, percentil 10 y percentil 90 de las proyecciones de los escenarios P1 utilizados en el reporte AR5-IPCC.....	64
Tabla 12. Comparativo de estimaciones de presupuesto de carbono global de ICM respecto a diferentes autores que son obtenidos a través de la trayectoria RCP2.6.....	66

Índice de Figuras

Figura 1 Emisiones netas de dióxido de carbono globales.....	21
Figura 2 Emisiones proyectadas a partir del año 2005 al 2100 para dióxido de carbono y dióxido de carbono equivalente para el escenario RCP2.6 con una probabilidad mayor o igual a 66%.....	28
Figura 3 Emisiones proyectadas del 2005 al 2100 de dióxido de carbono equivalente para mantener la temperatura media global a 1.5°C con una probabilidad mayor o igual a 66%.....	31
Figura 4 Emisiones excedidas del 2010 al 2018 (MtCO ₂ e).....	34
Figura 5 Metas de mitigación nacional para el periodo 2019-2030 para mantener la TMG en 2°C y 1.5°C (MtCO ₂ e).....	37
Figura 6 Metas de mitigación no condicionadas (NDC) comparadas con el presupuesto de carbono anual estimado del sector de generación de electricidad 2019-2030 de 2°C y 1.5°C (MtCO ₂ e).....	42
Figura 7 Comparación del escenario tendencial, meta no condicionada, presupuesto de carbono del sector de generación de electricidad de 2°C y 1.5°C para el año 2030 (MtCO ₂ e).....	43
Figura 8 Evolución de la generación eléctrica 2019-2033 (GWh).....	46
Figura 9 Emisiones PRODESEN 2019 - 2033 y metas de mitigación para mantener la TMG en 2°C (MtCO ₂ e).....	47
Figura 10 Participación porcentual en la capacidad adicional acumulada del PRODESEN 2019-2033 por tecnología.....	48
Figura 11 Evolución de la capacidad instalada 2019-2033 (MW).....	49
Figura 12 Evolución de la generación 2018-2032 del Escenario 2°C (GWh).....	50
Figura 13 Evolución de la capacidad instalada 2018-2032 del Escenario 2°C (MW).....	52
Figura 14 Curva de Costos de Abatimiento Marginal 2032 de penetración de energías renovables en el Sistema Eléctrico Nacional (USD/tCO ₂ e).....	54

Listado de Abreviaturas

CO ₂	Dióxido de carbono
CO ₂ e	Dióxido de carbono equivalente
GEI	Gases de efecto invernadero
GIZ	Cooperación Alemana al Desarrollo Sustentable
Gt	Gigatonelada
GtC	Gigatonelada de Carbono
GWh	Gigawatt-hora
IAM	Modelo de evaluación integrado (por sus siglas en inglés)
ICM	Iniciativa Climática de México
IIASA	Instituto Internacional para el Análisis de Sistemas Aplicados (por sus siglas en inglés)
INECC	Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático
IPCC	Panel Intergubernamental de Cambio Climático
IPCC-AR5	Quinto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental de Cambio Climático
Mt	Megatonelada
MW	Megawatt
Mmusd	Miles de millones de dólares americanos
NDC	Contribución Nacionalmente Determinada (por sus siglas en inglés)
PRODESEN	Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional
RCP	<i>Representative Concentration Pathways</i>
SEN	Sistema Eléctrico Nacional
SSP	<i>Shared Socio-economic Pathways</i>
TMG	Temperatura media global
TCRE	Respuesta climática a las emisiones acumuladas de carbono (por sus siglas en inglés)
USD	Dólares americanos



Resumen Ejecutivo



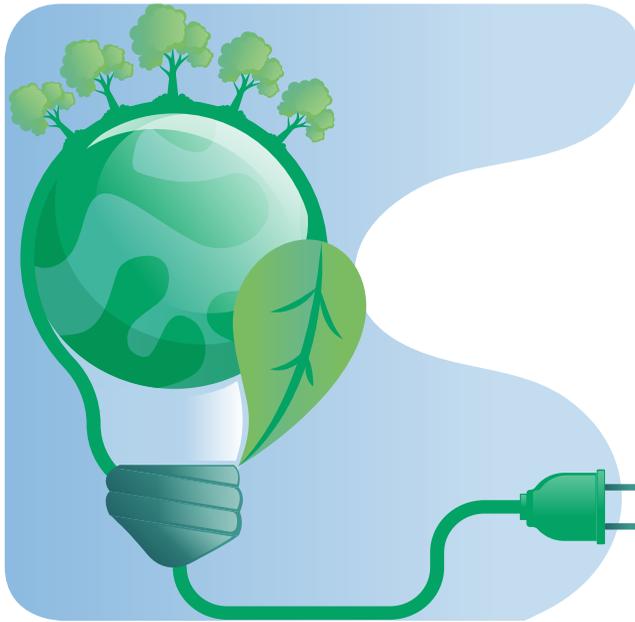
En los últimos años, el concepto de presupuesto de carbono ha ganado importancia como una métrica para definir las metas de reducción de emisiones a nivel global, y como un indicador para evaluar su cumplimiento.

La falta de un referente sobre la cantidad de dióxido de carbono equivalente (CO₂e) que es posible emitir en los próximos años para mantener el aumento de la temperatura media global en un rango determinado, entre otras variables, ha dado como resultado que los compromisos climáticos de las economías que contribuyen con el 90% de las emisiones globales y más del 80% de la producción económica a nivel mundial (G20) sobrepasen los límites de temperatura establecidos en el Acuerdo de París.

Con el objetivo de alimentar los esfuerzos de planeación transversal que permitan alinear la política energética y la política climática en México con las metas internacionales, en el presente trabajo se presenta la metodología desarrollada por la Iniciativa Climática de México para estimar presupuestos de carbono a nivel nacional y sectorial. Dicha metodología fue utilizada para estimar el presupuesto de carbono de México y del sector eléctrico, con el fin de que los resultados presentados sirvan de insumos para el desarrollo de políticas públicas orientadas a alcanzar las trayectorias de mitigación que limiten el aumento de la temperatura media global en 2°C y 1.5°C.

En la primera sección se presenta la importancia del presupuesto de carbono como concepto, y los beneficios que existen de utilizar esta metodología versus la correspondiente a utilizar una línea base para establecer metas de reducción de emisiones. Además, se presenta una breve introducción del fundamento metodológico detrás de la estimación de un presupuesto de carbono y el papel de los modelos integrados de evaluación, así como, una descripción breve de algunos casos en los que el presupuesto de carbono se ha utilizado para definir metas de mitigación nacionales y subnacionales. Posteriormente, se presenta una descripción del alcance de la metodología desarrollada por ICM y sus limitaciones, enfatizando el proceso de obtención de datos para la estimación del presupuesto de carbono. Después se presentan los resultados de la estimación del presupuesto de carbono nacional para 2°C y 1.5°C con una propuesta de metas de mitigación para el periodo 2019 - 2030. En la sección siete se presentan los resultados de la estimación del presupuesto de carbono para el sector de generación eléctrica del país, con una propuesta de metas de mitigación para el periodo 2019 - 2030. Con base en los presupuestos de carbono de 2°C y 1.5°C estimados para el sector de generación

de electricidad, se presenta un análisis del PRODESEN 2019-2033, su pertinencia en el cumplimiento de las trayectorias de 2°C, y se propone una matriz de generación eléctrica que cumpla con la disminución de emisiones de GEI resultante del presupuesto de carbono del sector eléctrico alineando al presupuesto de carbono de 2°C.



Uno de los resultados más importantes de este trabajo fue la estimación del presupuesto de carbono para México y para el sector eléctrico. Si México quiere cumplir con el objetivo de limitar el aumento de temperatura media global por debajo de 2°C establecido en el Acuerdo de París, debe limitar sus emisiones a 22.2 GtCO₂e para el periodo 2019 – 2100. Asimismo, debe seguir los esfuerzos para limitar dicho aumento por debajo de 1.5°C, lo que requeriría que el país no emita más de 8.9 GtCO₂e en el mismo periodo. Para cumplir lo anterior, la asignación sectorial juega un rol importante, ya que establece de manera clara objetivos específicos para que cada sector se apropie de ellos. En el caso del sector eléctrico, el presupuesto de carbono que tiene disponible para el periodo 2019 – 2100 es de 3.9 GtCO₂e

y 1.6 GtCO₂e, para los escenarios de 2°C y 1.5°C, respectivamente. Como se observa, las cifras obtenidas de este estudio se encuentran lejanas a las establecidas en la Contribución Nacionalmente Determinada (NDC, por sus siglas en inglés) que México presentó en 2015, lo que enfatiza la necesidad de adquirir compromisos de mitigación más ambiciosos.

La siguiente Tabla muestra como la meta establecida en la NDC para el sector eléctrico no es suficiente para estar en línea con una trayectoria de 2°C. Para lograrlo, el sector debería incrementar su ambición y reducir por lo menos 159MtCO₂e más de lo establecido en la NDC para el periodo 2019 - 2030.

Metas de mitigación no condicionadas comparadas con el presupuesto de carbono anual del sector de generación de electricidad 2019-2030 de 2°C y 1.5°C (MtCO₂e)

Año	Metas de mitigación no condicionadas del sector de generación de electricidad (MtCO ₂ e) *	Estimación anual del presupuesto de carbono del sector de generación de electricidad 2°C (MtCO ₂ e) *	Estimación anual del presupuesto de carbono del sector de generación de electricidad 1.5°C (MtCO ₂ e) *
2019	123	114	104
2020	124	113	102
2021	124	112	100
2022	124	111	98
2023	126	110	96
2024	128	109	94
2025	131	107	92
2026	135	106	90
2027	137	105	87
2028	141	103	85
2029	142	102	82
2030	139	100	80

NOTA: * Valores redondeados a su entero próximo.

Utilizando como referencia el presupuesto de carbono de 2°C, a través de un modelo de optimización (Plexos) que minimiza los costos del sistema eléctrico, fue posible obtener una propuesta de matriz de generación eléctrica donde se espera que la generación total en el año 2032 sea de 497,977 GWh. Para lograr dicha generación y cumplir con

las emisiones permitidas de la trayectoria de 2°C, se requiere una participación del 51% de energías renovables, 4% de energías limpias y 45% de tecnologías convencionales. En donde, la energía solar fotovoltaica, la generación solar distribuida y la energía eólica para el año 2032, se espera que generen 65,159 GWh, 23,563 GWh y 96,854 GWh, respectivamente.

A pesar del esfuerzo realizado para calcular un presupuesto de carbono con escenarios de referencia a 2°C y 1.5°C, una estimación más precisa del presupuesto de carbono y de una matriz de generación eléctrica para esa trayectoria requerirá una ampliación del análisis de las siguientes acciones:



Generar conocimiento sobre el despliegue e incorporación de las baterías (almacenamiento de energía) para el Sistema Eléctrico de México en el marco de un presupuesto de carbono sectorial de 1.5°C.

Considerar en las medidas de mitigación, acciones de eficiencia energética, así como otras acciones tales como desplazamiento de la demanda, y la llamada demanda controlable.



Estudiar el tema de electro-movilidad y estimar la tasa de penetración que tendrá dicha tecnología en México para poder considerarla dentro de las variables utilizadas para estimar la futura demanda eléctrica.

Utilizar nuevamente el modelo PLEXOS con las nuevas alternativas para alcanzar una matriz energética alineada a un presupuesto de carbono de 1.5°C y establecer la ruta necesaria de descarbonización del sector para lograrlo.



Estimar nuevas curvas de costo de abatimiento marginal de las tecnologías necesarias para alcanzar una matriz energética alineada a la trayectoria de 1.5°C.



Introducción



El cambio climático es uno de los grandes retos de la humanidad, que requiere de acciones inmediatas que reduzcan las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

El fracaso en la resolución oportuna del problema puede resultar en un daño irreversible tanto para el planeta como para las actividades humanas ocasionando la migración forzada de alrededor de mil millones de personas, la aparición de hambrunas, y una ola de extinciones, por mencionar algunos ejemplos (Harvey, 2018). Ante esto, hasta el 2019, 185 países han ratificado su participación en el Acuerdo de París, el cual busca limitar el incremento de la temperatura media global por debajo de 2°C respecto a los niveles preindustriales e incrementar los esfuerzos para limitar ese aumento a 1.5°C, de acuerdo con lo expuesto por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) en 2018.

La mejora de las herramientas para el análisis del impacto de las actividades humanas en el clima permite establecer el concepto de presupuesto de carbono. Este presupuesto representa la máxima cantidad de emisiones de dióxido de carbono equivalente, que se pueden acumular en la atmósfera a lo largo de un periodo para mantener la temperatura de la Tierra dentro de un cierto rango. En los últimos años, el concepto de presupuesto de carbono ha ganado importancia como una métrica para definir las metas de reducción de emisiones a nivel global, y como indicador para evaluar su cumplimiento. La falta de un referente sobre la cantidad a emitir de dióxido de carbono equivalente en los próximos años ha dado como resultado que los compromisos climáticos de las economías que contribuyen con el 90% de las emisiones globales y más del 80% de la producción económica a nivel mundial sobrepasen los límites de temperatura establecidos en el Acuerdo de París, ya que, de cumplirse, llevarían a un incremento promedio en la temperatura global de 3.2°C (CTI, 2018).

Es importante recordar que México forma parte de los 185 países que ratificaron el Acuerdo de París y se comprometió a través de su Contribución Nacionalmente Determinada (NDC, por sus siglas en inglés) a reducir de manera no condicionada el 22% de sus emisiones de GEI para 2030 de acuerdo con el escenario tendencial (INECC, 2015). Sin duda, México ha logrado importantes avances en su marco legal e institucional, entre los que destacan la elaboración de la Estrategia Nacional de Cambio Climático: Visión 10-20-40 y la reforma a la Ley General de Cambio Climático que incorpora los objetivos del Acuerdo de París y las metas de la NDC (Julio 2018).

Sin embargo, de acuerdo con la Sexta Comunicación Nacional de Cambio Climático, la reducción de emisiones para el periodo 2013 – 2017 totalizó 70MtCO₂e anuales, cifra aún lejos de la mitigación necesaria de 185.39 MtCO₂e¹, de acuerdo con los límites establecidos por la primera estimación de presupuesto de carbono alineado a una trayectoria de 2°C. Lo anterior indica que el país debe incrementar su ambición y sumar esfuerzos en todos los niveles y sectores.

El sector energético juega un rol fundamental en los esfuerzos de mitigación, ya que, de acuerdo con el IPCC, entre los años 2000 y 2010 los sectores de energía e industria en países de ingreso medio-alto (de los cuales México es parte) fueron responsables del incremento de emisiones de GEI globales en un 60 % (IPCC, 2014). Particularmente en México, las emisiones asociadas a la generación de energía eléctrica representan, de acuerdo con el Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero 1990-2015 (INEGyCEI), un 18% de las emisiones totales emitidas del país.

A pesar de la importancia del sector eléctrico en México para reducir las emisiones de GEI, las metas establecidas para el sector se encuentran lejos de lo requerido para cumplir con la trayectoria de emisiones que limiten la temperatura media global en 2°C y 1.5°C. Asimismo, el planteamiento de las metas nacionales de mitigación de GEI para este sector no detalla una relación directa

de la meta no-condicionada de la NDC con una trayectoria de mitigación alineada con la meta de 2°C del Acuerdo de París.

Por lo anterior, es necesario que los ejercicios de planeación sean transversales y de largo plazo de manera que instrumentos como el Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN) no sólo estén orientados al cumplimiento de las metas nacionales de energías limpias (de 35% para 2024) y climáticas (límite de emisiones de 139 MtCO₂e para 2030), sino vinculados de manera directa a las trayectorias dictadas por los límites de temperatura establecidos en el Acuerdo de París para el resto del siglo.

Con la finalidad de contribuir a los esfuerzos de planeación transversal que permitan alinear la política energética y climática del país con las metas internacionales, en este trabajo se presenta la estimación de presupuestos de carbono para México tanto a nivel nacional como para el sector eléctrico. La Iniciativa Climática de México (ICM) ha realizado estudios previos en este tema². En este trabajo se alcanza una mayor precisión en los estimados de presupuestos de carbono nacional y del sector eléctrico con el objetivo de que los resultados presentados sirvan de insumos para el desarrollo de políticas públicas orientadas a alcanzar las trayectorias de mitigación que limiten el aumento de la temperatura media global en 2°C y 1.5°C acorde con el Acuerdo de París y el reporte especial del IPCC (2018) respectivamente.

1 Para mayor información, ver Figura 3, donde al sumar las diferencias entre las emisiones históricas y el presupuesto de carbono del periodo 2013 al 2017 resulta en una cantidad de 185.39 millones de toneladas de dióxido de carbono equivalente.

2 Chacón, Daniel; Emisiones de GEI del Sector Eléctrico; Energía a Debate; Año 13, Edición 74, mayo/junio 2016.



En este documento, se presenta en primer lugar la relevancia del presupuesto de carbono y los beneficios que existen al utilizar esta metodología respecto a una línea base.

En la sección uno, se presenta el sustento científico de un presupuesto de carbono y el papel de los modelos integrados de evaluación, así como una descripción breve de algunos casos en los que el presupuesto de carbono se ha utilizado para definir metas de mitigación nacionales y subnacionales.



Posteriormente, en la sección 2 se presenta una descripción del alcance de la metodología y sus limitaciones, enfatizando el proceso de obtención de datos para la estimación del presupuesto de carbono.



En la sección tres se presentan los resultados de la estimación del presupuesto de carbono nacional para escenarios de referencia 2°C y 1.5°C con una propuesta de metas de mitigación para el periodo 2019 -2030. Complementando lo anterior, se presentan los resultados de la estimación del presupuesto de carbono para el sector de generación eléctrica del país, con una propuesta de metas de mitigación para el periodo 2019 – 2030.



En la sección cuatro, y con base en los presupuestos de carbono de 2°C y 1.5°C estimados para el sector de generación de electricidad, se presenta un análisis del PRODESEN 2019-2033. Para esta sección, se analizó la pertinencia del PRODESEN 2019-2033 en el cumplimiento de las trayectorias de 2°C, y se propone una matriz energética que cumpla con la disminución de emisiones de GEI resultante del presupuesto de carbono del sector eléctrico. Dicha propuesta tiene una mayor proporción de energías renovables y, por ende, resulta más costo-efectiva.



Finalmente se presentan las conclusiones del documento y se realizan algunas sugerencias para próximos desarrollos.

Presupuestos de carbono como metodología para la cuantificación de reducción de emisiones

La definición de la NDC de México y las metas de reducción de emisiones de GEI está basada en una línea base. Esta línea base, de acuerdo con el IPCC (2014), se construye a través de proyecciones de emisiones de GEI considerando los principales factores de crecimiento de las actividades económicas y su evolución en el futuro sin considerar la adopción de acciones de mitigación.

En el caso de los escenarios de línea base relacionados con el sector eléctrico, los principales factores que impactan en el futuro sobre las emisiones se basan, entre otros, en el crecimiento poblacional, la demanda de electricidad, el Producto Interno Bruto (PIB), la intensidad energética de los productos consumidos en la economía mexicana, y el tipo de tecnología y de combustibles utilizados para la generación eléctrica.

La metodología de línea base limita la medición del cumplimiento de las metas debido al establecimiento de escenarios de crecimiento hipotéticos (ver Tabla 1). Estos escenarios tienen un alto grado de incertidumbre, son

cambiantes, y relativizan la mitigación de emisiones a esos cambios e incertidumbres.

Por el contrario, la definición de un presupuesto de carbono permite el establecimiento de metas claras y no ligadas a los supuestos antes mencionados. Asimismo, el presupuesto de carbono visibiliza, en términos de temperatura planetaria, el grado de ambición de las medidas y trayectorias de mitigación. Este conocimiento puede conducir al establecimiento de metas más ambiciosas, a través de la definición de planes de descarbonización sectorial, y la identificación de actores y acciones específicas para su cumplimiento (ver Tabla 1). El presupuesto de carbono permite monitorear y evaluar el progreso de las acciones climáticas en el país para alinearse a los compromisos firmados en el Acuerdo de París.

Tabla 1: Metodología de línea base versus presupuesto de carbono

	Línea Base	Presupuesto de Carbono
Definición	Son proyecciones de GEI basadas en la evolución de factores socioeconómicos. No considera la adopción de acciones explícitas para reducir las emisiones.	Representa una cantidad acumulada de emisiones de CO ₂ e, permitidas a lo largo de un periodo para mantener la temperatura media de la Tierra en un cierto rango.
Ventajas	Permite proyectar una composición tendencial del sector energético y el uso de suelo, que sirve como punto de referencia para medir los esfuerzos necesarios de mitigación.	Permite definir las metas de reducción de emisiones nacionales en línea con las metas climáticas globales. Es un indicador cuantitativo para evaluar y monitorear el cumplimiento de las metas climáticas.
Desventajas	Las proyecciones están sujetas constantemente a ajustes, y generalmente existe divergencia en su medición y supuestos.	Es un concepto que genera resistencias en ciertos ambientes acostumbrados al <i>status quo</i> de las líneas bases ³ . Asimismo, el punto de partida de la modelación se encuentra determinada por las proyecciones realizadas por el IPCC y sus modelos IAMS lo cual significa que a la hora de crear la metodología se viene cargando las incertidumbres asociadas a los modelos de evaluación integrado.

Fuente: elaboración propia, 2019.

El presupuesto de carbono permite definir metas cuantitativas de reducción de emisiones a nivel nacional, subnacional y sectorial en línea con el presupuesto de carbono global. Antes de presentar las estimaciones para México, en la siguiente sección se presentarán algunos resultados de presupuesto de

carbono global estimados por diferentes autores. Asimismo, se explicará con mayor precisión algunos aspectos científicos sobre la estimación del presupuesto de carbono global y se mostrarán algunos de los casos nacionales y subnacionales que estimaron presupuestos de carbono.

³ Por resistencias se refiere que, aun y cuando existe aceptación de una metodología diferente al de línea base, al introducir el concepto de presupuesto de carbono en diferentes instituciones gubernamentales existe resistencia debido a la inversión en tiempo y desarrollo de capacidades.



1. Presupuestos de carbono en el contexto global, nacional y sub-nacional



Uno de los fundamentos básicos del cambio climático establece que existe una relación directa entre el aumento de la temperatura y las emisiones acumuladas de CO₂e.

Para limitar el calentamiento causado por las emisiones de GEI por debajo de un límite de temperatura determinado, las emisiones acumuladas de todas las fuentes antropogénicas tienen que ser restringidas a una cantidad específica. Esta restricción es también conocida como un presupuesto de carbono (Friedlingstein, 2016). En otras palabras, es necesario establecer un límite de emisiones de CO₂e para detener el aumento de la temperatura media global. Las emisiones globales de CO₂e anuales tendrán que llegar a un valor que sea netamente cero en algún punto en el tiempo (Rogelj et al., 2015).

Las diferentes aproximaciones que existen para calcular presupuestos de carbono conllevan sus propias fortalezas y limitaciones. Entender qué nos puede guiar a diferentes estimaciones de presupuesto⁴ es crítico para evitar una imprecisa interpretación de los números (Friedlingstein, 2016). Teniendo en cuenta la necesidad de contar con estimaciones robustas de presupuesto de carbono, a continuación, se presentan algunas estimaciones de diversos autores.

Rogelj et al. (2015) mencionan que para restringir el calentamiento por debajo de los 2°C con al menos un 66 % de probabilidad, la mediana de las emisiones acumuladas de CO₂ del 2011 al 2100 debe de ser de 790 GtCO₂, con un rango intercuartil de 470-1085 GtCO₂. Por su parte, Knutti y Rogelj (2015) establecen que para mantener (probabilidad mayor al 66 %) el incremento de la temperatura por debajo de los 2°C relativo a niveles preindustriales, el presupuesto de carbono debe de ser de alrededor de 800 GtC⁵. En el caso de Millar y Friedlingstein (2018), y con base en su estimación de respuesta climática a las emisiones acumuladas de carbono efectiva (TCRE, por sus siglas en inglés) históricas⁶ de 1.84°C/TtC, estimaron el presupuesto de carbono en 520 GtC restantes (significando aproximadamente 47 años de emisiones actuales) para alcanzar un aumento de la temperatura media global de 2°C y 250 GtC (aproximadamente 23 años de emisiones actuales) para 1.5°C.

4 Por ejemplo: su definición, los datos utilizados y modelados, la selección del escenario, escalas de tiempo de respuestas de temperatura y la trayectoria alineada del CO₂ y las emisiones diferentes al CO₂.

5 Gigatonelada de carbono, corresponde a 3.66 GtCO₂.

6 Histórico ya que se refiere a una estimación realizada en el periodo de 2007 al 2016.

1.1 Fundamento científico del presupuesto de carbono

Para entender mejor la relación que existe entre la acumulación de emisiones de GEI y el calentamiento de la Tierra, es preciso definir el concepto de sensibilidad climática, el cual mide la respuesta que tiene el sistema climático ante un forzamiento radiativo constante⁷. Lo anterior significa el grado de aumento de la temperatura media global en respuesta a una variación, entre otras variables, de la concentración atmosférica de dióxido de carbono en comparación

con los niveles preindustriales. La definición del presupuesto de carbono se basa en la respuesta climática a las emisiones acumuladas de carbono (TCRE, por sus siglas en inglés), que define la relación existente entre la sensibilidad climática y el presupuesto de carbono, definiéndose como el cambio de la temperatura promedio de la superficie por unidad de emisiones totales acumuladas de dióxido de carbono antropogénicas.

1.2 Modelos de evaluación integrados (IAMs)

Una herramienta que se utiliza para representar matemáticamente los fenómenos antes expuestos y así construir escenarios de trayectorias de emisiones de GEI y sus impactos en el sistema climático del planeta, son los modelos de evaluación integrados (IAMs, por sus siglas en inglés). Estos modelos, de acuerdo con Van Vuuren et al. (2011), tratan de explicar las relaciones complejas entre el medio ambiente, y los factores sociales y económicos que afectan el comportamiento climático de la Tierra. Los IAMs proveen información valiosa sobre la posibilidad de alcanzar los objetivos de mediano y largo plazo con base a las acciones de mitigación planeadas en diferentes regiones (L. Clarke et al., 2009). Geels et al. (2016) sustenta la idea previa mencionando que las fortalezas analíticas de los IAMs son la capacidad de mezclar ciencia, ingeniería, información económica y trayectorias futuras de diversos

factores (por ejemplo, de la dinámica demográfica, crecimiento económico e interacciones dentro de los sectores productivos) que intervienen en el aumento o disminución de las emisiones de GEI.

Dentro de los ejercicios de simulación que se han llevado a cabo a nivel internacional, se encuentra el trabajo de Foley et al. (2016), en el que los autores utilizaron un modelo de ciclo de carbono, GENIEem, junto con un modelo IAM, PLASIMENTSem para evaluar trayectorias de descarbonización del sector eléctrico. Dicho ejercicio encontró que en un escenario donde el 90 % del sistema eléctrico está descarbonizado para el 2050, existe una posibilidad de limitar para el 2100 un aumento de temperatura de 2°C.

Los IAMs se han utilizado para la formulación de escenarios que proveen información

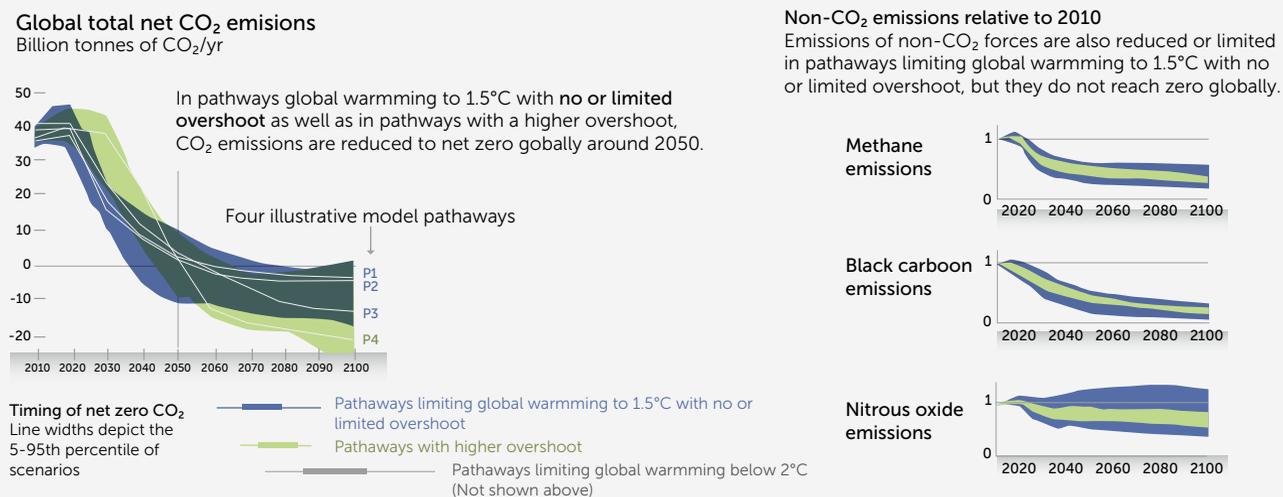
7 El concepto forzamiento radiativo se refiere a la diferencia entre la insolación absorbida por la tierra y la energía irradiada al espacio. Se expresa en Wm^{-2} .

sobre los forzamientos radiativos que logran mantener la temperatura media global a ciertos niveles. Para el reporte AR5 del IPCC se crearon las trayectorias “Representative Concentration Pathways” (RCP), las cuales fueron divididas en 4 escenarios dependiendo de su forzamiento radiativo: 2.6, 4.5, 6 y 8.5 Wm⁻². Para realizar la metodología de presupuesto de carbono se utiliza el RCP2.6 ya que dicha trayectoria es capaz de limitar el incremento de la temperatura a 2°C.

Por otra parte, en el desarrollo de nuevos escenarios para el Reporte Especial de Calentamiento Global de 1.5°C rumbo al Reporte de Evaluación 6 del IPCC se crearon los escenarios “Shared Socioeconomic

Pathways” con la finalidad de facilitar el análisis integrado de futuros impactos climáticos, vulnerabilidades, adaptación y mitigación (Raihi et al., 2017). Se incluyeron 5 narrativas: la trayectoria de sustentabilidad (SSP1), la trayectoria de retos medianos de mitigación y adaptación (SSP2), la trayectoria de rivalidad regional (SSP3), la trayectoria que toma en consideración la desigualdad (SSP4) y la trayectoria de un desarrollo de alto consumo de combustibles fósiles (SSP5). Para la estimación del presupuesto de carbono de 1.5°C, se utilizaron las narrativas antes mencionadas, específicamente aquellas que fueron alineadas a una trayectoria para mantener el forzamiento radiativo en 1.9 Wm⁻² a finales del siglo (ver Figura 1).

Figura 1 Emisiones netas de dióxido de carbono globales.



Fuente: IPCC (2018), Reporte Especial sobre Calentamiento Global 1.5°C.

NOTA: (*) Como se puede observar, las rutas mencionadas están divididas en P1, P2, P3 y P4. Por P1 se refiere a la ruta con una baja demanda de energía; por P2 se refiere al SSP1 el cual es una ruta de desarrollo sostenible; por P3 se refiere a la ruta SSP2 la cual identifica un desarrollo mediano y retos medianos de mitigación; y P4 se refiere a la ruta SSP5 la cual es alta en consumo de combustibles fósiles y alta intensidad energética.

1.3 Ejemplos nacionales y subnacionales de presupuestos de carbono

Un caso importante de estimación de presupuesto de carbono a nivel nacional es el realizado por el Reino Unido que ha sido el primer país en establecer un presupuesto de carbono con carácter vinculante. El presupuesto de carbono ha sido establecido para periodos de cinco años, con el objetivo

de alcanzar emisiones netas cero hacia el año 2050. Desde el 2008, el Reino Unido ha determinado las metas a alcanzar para cada periodo con una metodología de "abajo hacia arriba" (diferente a la propuesta por el IPCC). A continuación, en la Tabla 2 se presentan dichas metas hacia el 2032.

Tabla 2: Presupuestos de carbono del Reino Unido

Periodo	Nivel de presupuesto de carbono (MtCO ₂ e)
Primer presupuesto (2008-2012)	3,018
Segundo presupuesto (2013-2017)	2,782
Tercero presupuesto (2018-2022)	2,544
Cuarto presupuesto (2023-2027)	1,950
Quinto presupuesto (2028-2032)	1,725

Fuente: Committee on Climate Change. Reducing UK emissions: 2018 Progress Report to Parliament. 2018.

Por otro lado, la iniciativa *C40 Cities* llevó a cabo estimaciones de presupuestos de carbono para 84 ciudades en el mundo para el periodo 2016 -2100 (incluida la Ciudad de México) para mantener la temperatura media

global entre 1.5°C y 2°C⁸. Cabe mencionar que, a diferencia del Reino Unido, la metodología utilizada por el *C40 Cities* fue a través de un procedimiento "arriba hacia abajo" (C40, 2017).

8 Es importante señalar que las estimaciones realizadas por *C40 Cities* fueron en términos agregados y no individuales, para el caso de 2°C la estimación de presupuesto de carbono de las ciudades incluidas fue de 67 GtCO₂e, mientras que, para el presupuesto de carbono de 1.5°C la estimación fue de 22 GtCO₂e (C40, 2017).



2. Hacia un presupuesto de carbono para México



El presente estudio estuvo enfocado en realizar una estimación para el presupuesto de carbono del sector eléctrico de México bajo distintos parámetros y supuestos.

En este presupuesto se incorpora la literatura más reciente, así como estimaciones realizadas por instituciones de investigación líderes a nivel internacional.

Un paso fundamental para desarrollar este estudio fue la utilización y análisis de la base de datos del Quinto Informe de Evaluación (específicamente el capítulo⁹ correspondiente al Grupo de Trabajo III) y del Reporte Especial sobre Calentamiento Global de 1.5°C del IPCC. Cabe mencionar, que esta base de datos contiene trayectorias de emisiones estimadas por distintos modelos matemáticos que describen tanto la física de la Tierra como la interacción de las economías a nivel internacional. Con el fin de conocer en cabalidad las razones de las diferentes trayectorias se realizó una revisión exhaustiva de los supuestos detrás de las estimaciones de dichas trayectorias en los diferentes modelos.

Como se presentó en la sección anterior, los escenarios estimados por los modelos que están en línea con las metas climáticas son los escenarios denominados RCP2.6 y SSPx-1.9¹⁰. Es importante resaltar que, para el caso del RCP2.6, dicha trayectoria fue alcanzada a través de una combinación de modelos IAM y escenarios con diferentes años de referencia para implementar medidas inmediatas de mitigación.

Considerando lo anterior, se presenta a continuación una breve descripción de los modelos seleccionados, así como los escenarios incorporados en la base de datos que será utilizada para establecer las trayectorias de emisiones tanto nacional como del sector eléctrico que cumplan con las metas de limitar el aumento de la temperatura.

⁹ Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change.

¹⁰ Se denota como SSPx, ya que de acuerdo con la nueva nomenclatura estas trayectorias pueden ser evaluadas en 5 diferentes escenarios.

2.1 Selección de modelos y escenarios

Para la elaboración del presupuesto de carbono de 2°C, se utilizó como referencia la trayectoria RCP2.6. Esta trayectoria de emisiones de GEI se caracteriza por considerar el forzamiento radiativo con un pico de 3 Wm⁻² a mediados del siglo que se reduce a 2.6 Wm⁻² para el año 2100. Lo anterior se espera que mantenga la temperatura media global (TMG) por debajo de 2°C con una probabilidad mayor o igual a 66% (Van Vuuren et al., 2011).

Las trayectorias de emisiones utilizadas se tomaron de la base de datos “AR5 Scenario Database” (IIASA, 2014) del Instituto Internacional de Análisis de Sistemas Aplicados (IIASA, por sus siglas en inglés).

Esta base de datos reúne los resultados revisados de los modelos y escenarios al 2100 del IPCC-AR5 del Grupo de Trabajo III.

Particularmente, se seleccionaron las proyecciones de las emisiones de dióxido de carbono y dióxido de carbono equivalente de aquellos modelos y escenarios pertenecientes al grupo P1¹¹ del documento “Technical Annex – Synthesis report on the aggregate effect of the intended nationally determined contributions” de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. A continuación, en la Tabla 3, se muestra una descripción de cada uno de estos modelos y escenarios.

Tabla 3: Descripción de los modelos IAM del grupo P1(*)

Modelo ⁽⁺⁾	Evaluación asociada	Descripción del modelo
<i>Global Change Assessment Model Version 3.0 (GCAM 3.0)</i>	<i>EMF27-450-FullTech₁</i>	Es un modelo global que representa el comportamiento y las interacciones de cinco sistemas: el sistema de energía, del agua, de agricultura, de uso de suelo, de la economía y del clima. Fue desarrollado principalmente por el Joint Global Change Research Institute de la Universidad de Maryland.
<i>Global Change Assessment Model Version 3.1 (GCAM 3.1)</i>	<i>LIMITS-500₂</i>	La característica principal de la Versión 3.0 sobre versiones anteriores es la habilidad del modelo para simular escenarios en periodos de tiempo variables y la sub-regionalización del uso del suelo (Kyle et al., 2011). Para la Versión 3.1, el modelo cuenta con la misma base teórica y operativa que la Versión 3.0. Sin embargo, presenta una mejora en las bases de datos y algunas extensiones. Actualmente el modelo se encuentra en su quinta versión.

11 Por P1 se refiere al escenario que al implementar inmediatamente medidas globales de mitigación durante el 2010 existe una probabilidad mayor o igual a 66% de mantener la TMG por debajo de los 2°C.

<p><i>Integrated Model to Assess the Global Environment Version 2.4 (IMAGE 2.4)</i></p>	AME 2.6 W/ m2 OS ₃	<p>El modelo IMAGE 2.4 tiene como sistemas socio-económicos, los principales factores demográficos, económicos mundiales, de agricultura, comercio y oferta y demanda de energía que interactúan con los sistemas geofísicos de la Tierra.</p> <p>Lo anterior hace posible que se pueda tener una caracterización de los impactos climáticos, degradación de suelo, estrés del agua, biodiversidad y contaminación de aire y agua.</p>
	AMPERE2-450-FullTech-OPT ₄	
	AMPERE3-CF450 ₅	
	EMF27-450-FullTech	
	LIMITS-450 ₆	
<p><i>Model for Evaluating Regional and Global Effects of GHG reductions policies (MERGE-ETL_2011)</i></p>	AMPERE2-450-FullTech-OPT	<p>Es un modelo integrado de evaluación que combina una descripción de abajo hacia arriba (bottom-up) del sistema de energía desagregado y un modelo de arriba hacia abajo (top-down) a través de funciones de producción y un ciclo climático simplificado.</p> <p>Originalmente este modelo fue creado por Manne et al., desde 1995. Actualmente el desarrollador de este modelo es el Energy Economics Group del Paul Scherrer Institut.</p>
	AMPERE2-450-LimSW-OPT ₇	
	AMPERE2-450-LowEI-OPT ₈	
	AMPERE2-450-NucOff-OPT ₉	
	AMPERE3-CF450	
<p><i>Regional Model of Investments and Development Version 1.5 (REMIND 1.5)</i></p>	EMF27-450-FullTech	<p>Es un modelo híbrido que empareja un modelo de crecimiento económico (modelo Ramsey de crecimiento óptimo donde el bienestar intertemporal es maximizado) con un modelo detallado del sistema energético y un modelo simple climático.</p> <p>Una característica principal sobre otros modelos de evaluación integrados es el detalle con el cual modelan el sistema energético global.</p> <p>Actualmente se encuentra en la versión 1.6.</p>
	LIMITS-450	

Nota (*): Por motivo de simplicidad, a continuación se describirán de manera breve los modelos asociados expuestos en la tabla anterior:

1 *Stanford Energy Modelling Forum Study 27 considerando un límite de concentración de GEI en la atmósfera de 450 ppm y una descarbonización completa;*

2 *Low Climate Impact Scenarios and the Implications of Required Tight Emission Control Strategies considerando un límite de concentración de GEI en la atmósfera de 500 ppm;*

3 *Asia Modeling Exercise con un forzamiento radiativo de 2.6 Wm⁻² excedido después del siglo 21;*

4 *Assessment of Climate Change Mitigation Pathways and Evaluation of the Robustness of Mitigation Cost Estimates paquete de trabajo 2;*

5 *Assessment of Climate Change Mitigation Pathways and Evaluation of the Robustness of Mitigation Cost Estimates paquete de trabajo 3;*

6 *Low Climate Impact Scenarios and the Implications of Required Tight Emission Control Strategies considerando un límite de concentración de GEI en la atmósfera de 450 ppm;*

7 *Assessment of Climate Change Mitigation Pathways and Evaluation of the Robustness of Mitigation Cost Estimates paquete de trabajo 2;*

8 *Assessment of Climate Change Mitigation Pathways and Evaluation of the Robustness of Mitigation Cost Estimates paquete de trabajo 2; y*

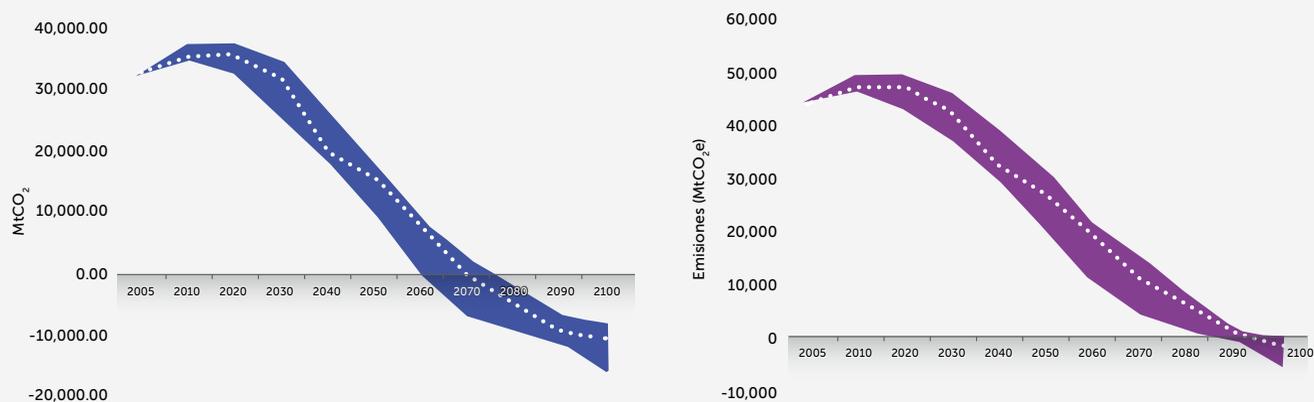
9 *Assessment of Climate Change Mitigation Pathways and Evaluation of the Robustness of Mitigation Cost Estimates paquete de trabajo 2.*

NOTA: (+) Los nombres de los modelos se encuentran escritos por su nombre original.

A partir de la selección y obtención de la base de datos de proyecciones de emisiones de dióxido de carbono y dióxido de carbono equivalente para la trayectoria RCP2.6 (escenario P1), se realizó un análisis

estadístico y se calculó la mediana¹² y los intervalos de confianza asociados con los percentiles¹³ 10 y 90 respectivamente. La Figura 2 muestra lo anterior.

Figura 2 Emisiones proyectadas a partir del año 2005 al 2100 para dióxido de carbono y dióxido de carbono equivalente para el escenario RCP2.6 con una probabilidad mayor o igual a 66%.



Fuente: Elaboración propia con información del banco de información del PIK.

12 Por mediana se refiere al valor de la variable de posición central en un conjunto de datos ordenados.

13 Por percentil se refiere a una medida de posición usada en estadística que indica, una vez ordenados los datos de menor a mayor, el valor de la variable por debajo del cual se encuentra un porcentaje dado de observaciones de un grupo de observaciones.

Los resultados presentados anteriormente, representan las trayectorias de emisiones que limitan el aumento de la TMG en 2°C. De acuerdo a Rogelj et al. (2018) entre un mundo con un calentamiento de 1.5°C y 2°C, existen diferencias significativas en los impactos climáticos negativos¹⁴. Por ello se deben realizar esfuerzos para incrementar la ambición en las trayectorias de descarbonización y frenar el incremento de temperatura a sólo 1.5°C (Rogelj et al., 2018).

La elaboración del presupuesto de carbono que limita el aumento de la temperatura media global en 1.5°C, requirió utilizar como referencia los escenarios SSPx-1.9. Las trayectorias de emisiones de GEI en estos escenarios limitan el forzamiento radiativo en 1.9 Wm⁻² para finales del siglo XXI con una probabilidad mayor o igual de

66% (Rogelj et al., 2018) de manera que la TMG se encuentre por debajo de 1.5°C.

Se llevó a cabo un análisis del material suplementario del Capítulo 2¹⁵ del Reporte Especial sobre Calentamiento Global de 1.5°C del IPCC, y se revisaron los modelos utilizados que buscan, a través de los “*shared socio-economic pathways*” (IIASA, 2018), una meta de 1.9 Wm⁻² de forzamiento radiativo para el año 2100 (escenarios SSPx-1.9). Este proceso se lleva a cabo, dado a que en el taller de socialización del concepto entre las recomendaciones destaco la precisión de conceptos y supuestos en la metodología de presupuestos de carbono. En la siguiente tabla se presenta una breve descripción de los modelos y escenarios utilizados que cumplen con el objetivo antes mencionado.

14 En diferentes regiones y particularmente subsistemas, tales como los arrecifes de coral pueden tener un impacto negativo considerable si se considera un escenario donde se mantiene la TMG en 2°C.

15 *Mitigation pathways compatible with 1.5°C in the context of sustainable development.*

Tabla 4: Descripción de los modelos IAM que presentan escenarios SSPx-1.9

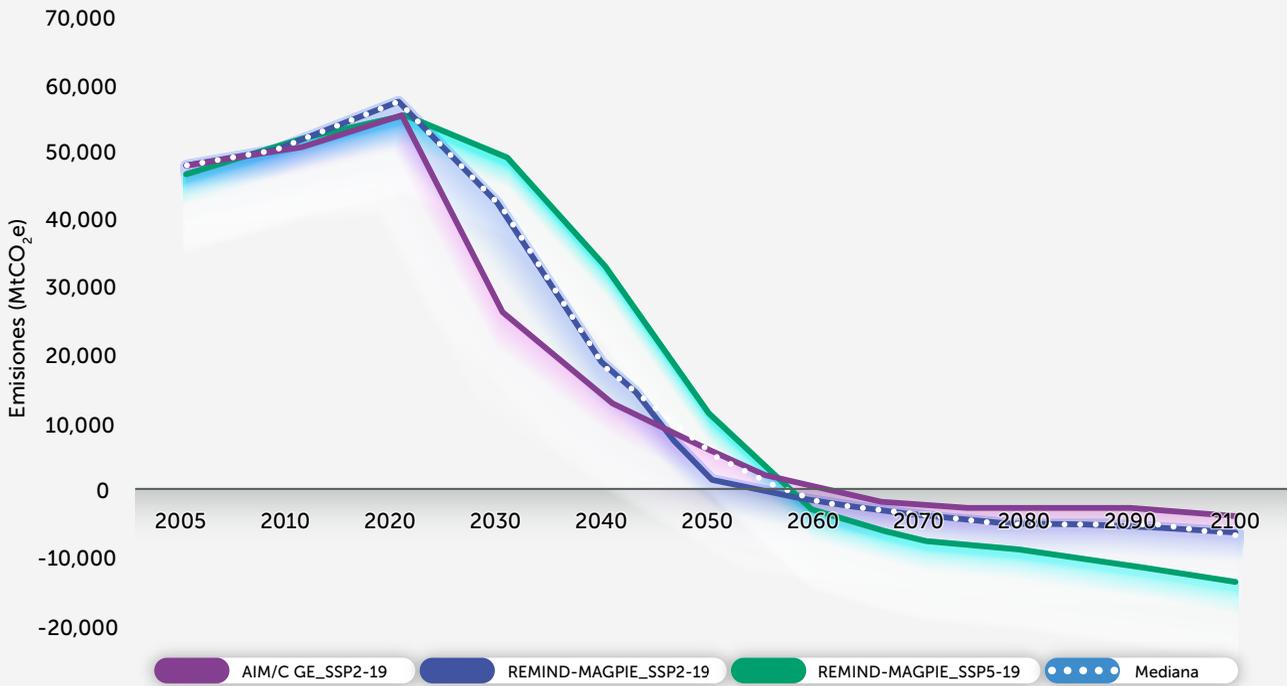
Modelo	Escenarios utilizados	Descripción del modelo
<i>Asia-Pacific Integrated Model (AIM)</i>	SSP1, SSP2	Este modelo fue desarrollado con la finalidad de analizar escenarios de mitigación y su impacto en el clima. El sistema de energía se encuentra desagregado al igual que el sector de agricultura. El modelo está diseñado para realizar un análisis global.
<i>Global Change Assessment Model Version 4.0 (GCAM4)</i>	SSP1, SSP2, SSP5	A diferencia de lo presentado en la Tabla 3, en esta versión se presentan algunas extensiones.
<i>Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impact – Global Biosphere Management (MESSAGE-GLOBIOM)</i>	SSP1, SSP2	Este modelo es un marco integrado de evaluación diseñado para valorar la transformación de los sistemas de energía y suelo en conjunto con los retos del cambio climático y de sustentabilidad.
<i>Regional Model of Investments and Development – Model of Agricultural Production and its Impact on the Environment (REMIND-MagPIE)</i>	SSP1, SSP2, SSP5	En este modelo (ver Tabla 3) se suma el modelo MagPIE, el cual es un modelo de asignación global de uso de suelo. El modelo genera proyecciones de patrones espaciales de uso de suelo, cosechas y costos regionales de producción agrícola.
<i>World Induced Technical Change Hybrid – Global Biosphere Management (WITCH-GLOBIOM)</i>	SSP1, SSP2, SSP4	Este modelo evalúa los impactos de las políticas climáticas en sistemas económicos globales y regionales y provee información sobre las respuestas óptimas de estas economías ante el cambio climático. El modelo considera externalidades positivas a partir de cambios tecnológicos.

Nota: Elaboración propia con información del material suplementario del Capítulo 2 del Reporte Especial sobre Calentamiento Global de 1.5°C del IPCC.

La revisión de los modelos y los escenarios de la base de datos de IIASA, hizo posible establecer una trayectoria de dióxido de carbono y dióxido de carbono equivalente hasta el año 2100 de manera que el aumento de la TMG fuera menor a 1.5°C. Una vez analizada la base de datos, se

seleccionaron los modelos representativos para la trayectoria de dióxido de carbono equivalente los cuales fueron: AIM/CGE – SSP2-1.9, REMIND-MagPIE - SSP2-1.9 y REMIND-MagPIE – SSP5-1.9. En la siguiente figura, se puede observar el comportamiento de cada trayectoria y su mediana.

Figura 3 Emisiones proyectadas del 2005 al 2100 de dióxido de carbono equivalente para mantener la temperatura media global a 1.5°C con una probabilidad mayor o igual a 66%



Fuente: Elaboración propia, con información de IIASA.

Finalmente, con la información de trayectorias de emisiones de GEI tanto para un aumento de la TMG de 2°C, un aumento de la TMG de 1.5°C, y las metas de mitigación para México correspondientes para los años 2018 – 2030, se procedió a calcular el presupuesto de carbono para el país. Es importante recalcar que se realizó un

ejercicio de validación metodológica con las proyecciones obtenidas anteriormente para generar estimaciones sustentadas sobre los procesos del IPCC incluidos en el Quinto Informe de Evaluación y el Reporte de Especial de Calentamiento Global de 1.5°C.

2.2 Presupuesto de carbono para México

En seguimiento a la obtención de datos y su análisis, en esta sección se presenta la metodología¹⁶ desarrollada por ICM para la estimación de un presupuesto de carbono nacional. Dichas estimaciones permitirán proponer metas de mitigación nacionales para el periodo 2019 – 2030 más ambiciosas que las actuales y que se espera que puedan ser utilizadas como insumo para la nueva NDC que México debe presentar en 2020, de acuerdo con lo mandatado en el Acuerdo de París.

Un elemento fundamental en el proceso de estimación del presupuesto de carbono fue la validación de la metodología empleada por ICM de manera que los resultados tuvieran un alto grado de certidumbre y fueran robustos. Esto se logró utilizando la base de datos¹⁷ de la trayectoria de dióxido de carbono obtenida del

“AR5 Scenario Database” para el presupuesto de carbono de 2°C y del “SSP Public Database Version 2.0” para el caso de 1.5°C. Para el presupuesto de carbono de 2°C, al utilizar la metodología ICM, se estimó un presupuesto de carbono global de 1,007.48 GtCO₂, el cual es muy similar al establecido por parte del Grupo de Trabajo III del IPCC (990 GtCO₂), con una desviación sobre la estimación del IPCC de 1.8%. Asimismo, al comparar la cifra calculada con otros valores de diferentes autores se observó que la estimación obtenida se encuentra dentro de un rango razonable en consideración con los resultados obtenidos por esos autores (ver Tabla 5).

16 Referir al anexo metodológico (Anexo 1).

17 Para mayor información de cómo se llevó a cabo el análisis y obtención de las bases de datos favor de referirse a la Sub-sección 2.1 del documento.

Tabla 5: Comparativo del presupuesto de carbono global de ICM respecto a estimaciones de diferentes autores obtenidas a través de la trayectoria RCP2.6

Autor (es)	Años	Presupuesto de carbono (GtCO ₂)
Iniciativa Climática de México	2011 - 2100	1,007.48 GtCO ₂
AR5-IPCC Grupo de Trabajo III	2011 - 2100	990 GtCO ₂
Rogelj et al. (2015)	2011 - 2100	790 GtCO ₂
Knutti y Rogelj (2015)	2013 - 2100	969 GtCO ₂
Millar y Friedlingstein (2018)	2016 - 2100	823 GtCO ₂
Gignac y Matthews (2015)	2014 - 2100	930 GtCO ₂

Ahora bien, para el presupuesto de carbono de 1.5°C, se llevó a cabo el mismo procedimiento que para 2°C, con la excepción de que se consideraron los valores proyectados de emisiones de dióxido de carbono producidos por la quema de combustibles fósiles en el sector energía e industria de la base de datos del "SSP Public Database Version 2.0"¹⁸. Dicho esto, al utilizar la metodología ICM se encontró un presupuesto de carbono de 402.26 GtCO₂ que en comparación con el valor estimado en el Capítulo 2 del Reporte Especial de Calentamiento Global de 1.5°C de 420 GtCO₂, presentó una desviación de 4.2% sobre el valor estimado.

Validada la metodología para las dos estimaciones, el siguiente paso fue tomar como referencia la base de datos de las proyecciones de dióxido de carbono

equivalente para cada trayectoria (RCP2.6 y SSPx-1.9) y escalar los valores a una cantidad de emisiones de GEI que fuera proporcional a la contribución histórica de las emisiones de México. Para lograr esto se utilizó la base de datos del *Potsdam Institute for Climate Impact Research* (PIK) y se estimó que la contribución histórica del país representa el 1.39%¹⁹ de las emisiones globales emitidas desde el año de 1850. En las siguientes subsecciones, se presentan los resultados del presupuesto de carbono de 2°C y 1.5°C para México.

¹⁸ Para mas información favor de referirse a la Sub-sección 2.1 del documento.

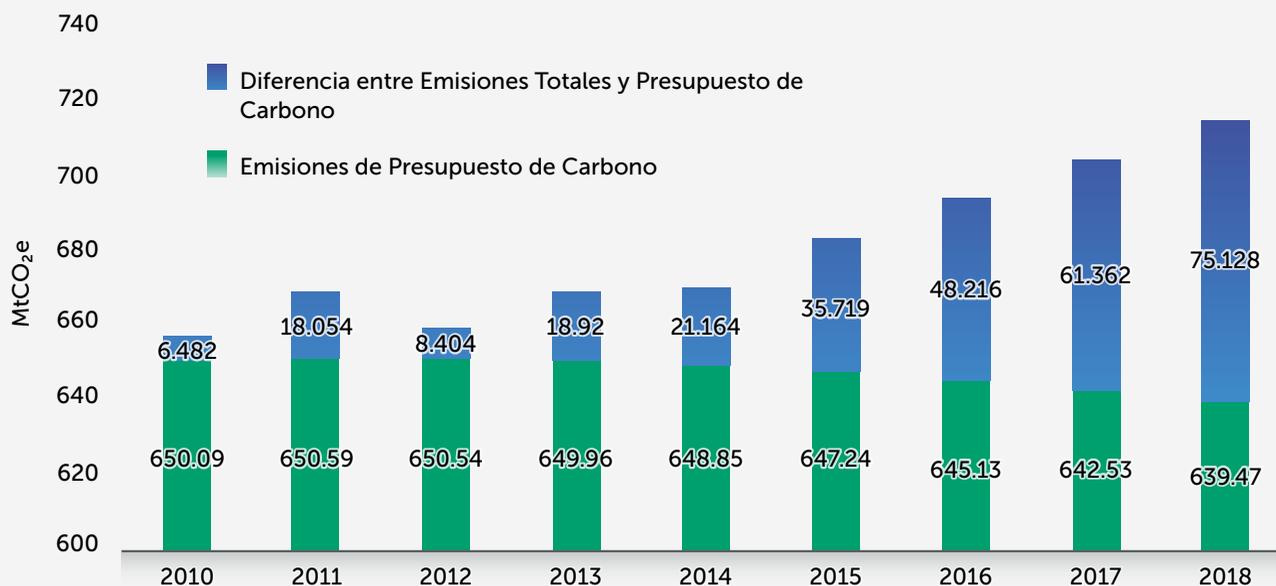
¹⁹ Sobre el porcentaje antes mencionado, es importante señalar que existe una discusión en como determinar la proporción si de manera equitativa o por justa parte, para esto es necesario considerar las siguientes variables: responsabilidad histórica, vulnerabilidad, costo, aptitud, capacidad, necesidades y progresividad.

2.3 Resultados obtenidos bajo una trayectoria de 2°C

Una vez estimada la trayectoria de emisiones para México y utilizando la metodología ICM, se obtuvo la primera estimación de presupuesto de carbono para el país, con una cantidad de 22.7 GtCO₂e para el periodo 2019-2100. Sin embargo, las bases de datos de las diferentes trayectorias inician desde 2010 por lo que se obtiene el uso del presupuesto de carbono disponible para el país de 8 años. Con el fin de tomar en cuenta este

desgaste del presupuesto, se consideraron las emisiones acumuladas del año 2010 al 2018 para realizar un ajuste de la trayectoria y del presupuesto de carbono restante disponible. Las emisiones en este período se tomaron del Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero 1990-2015 del INECC, (ver Figura 4) donde se obtuvo una cantidad acumulada de 293.47 MtCO₂e.

Figura 4 Emisiones excedidas del 2010 al 2018 (MtCO₂e)



Con el excedente anteriormente calculado, se llevó a cabo el mismo procedimiento de la primera estimación realizada. Lo anterior resultó en un presupuesto de carbono nacional, ajustado a la baja,

de 22.2 GtCO₂e para el periodo 2019 al 2100. El ajuste fue equivalente a una reducción de 0.5 GtCO₂e en el presupuesto original. Este resultado hace necesaria la adopción de medidas de mitigación adicionales

y políticas públicas más ambiciosas para mantener las emisiones de GEI del país en una trayectoria que mantenga el aumento de la TMG debajo de 2°C.

Cuadro 1

Presupuesto de carbono 2°C nacional

Para el periodo 2019 – 2100, el presupuesto de carbono es de 22.2 GtCO₂e.

2.4 Resultados obtenidos bajo una trayectoria de 1.5°C

Una de las conclusiones del taller de socialización²⁰, fue la importancia de contar con un presupuesto de carbono para 1.5°C y no sólo para 2°C. Para ello, se analizaron las bases de datos de los escenarios que limitaron el forzamiento radiativo en 1.9 Wm⁻², y se seleccionaron aquellas trayectorias que pudieran alcanzar emisiones netas cero para el año 2060/2062²¹, resultando elegidas 3 trayectorias de las 13 disponibles de los modelos establecidos en la Tabla 4.

Con esta base de datos se estimó el presupuesto de carbono del país para el periodo 2019 al 2100. Dicha estimación consideró el excedente de emisiones históricas del año 2010 al 2018. Este ajuste permitió estimar con mayor precisión el presupuesto de carbono para una trayectoria de emisiones que mantenga debajo de 1.5°C el aumento de

la TMG. El presupuesto de carbono estimado fue de 8.89 GtCO₂e para el periodo 2019-2100.

De acuerdo con este resultado, se observa que entre lo calculado para el presupuesto de carbono de 2°C y el 1.5°C existe una diferencia sustancial de 13.3 GtCO₂e. El reto será establecer una mayor ambición de mitigación de manera inmediata para lograr emisiones netas cero, alrededor de los años 2061-2062²².

Como señalan Millar et al. (2017), para el año 2020 a nivel global tendrán que fortalecerse significativamente las NDCs de todos los países para protegerse contra el riesgo de una respuesta climática de mayor impacto que la esperada. Se deben resolver los impedimentos económicos, técnicos y políticos que eviten lograr las reducciones de emisiones requeridas después del año 2030.

20 Ver Anexo 3: Conclusiones del taller de socialización de la metodología de estimación de presupuestos de carbono realizado con el apoyo del proyecto CONECC GIZ para la elaboración de este estudio.

21 Se seleccionó dicho periodo ya que los resultados de las proyecciones de los modelos de integración evaluados solo alcanzaban las emisiones netas cero durante esos años en particular.

22 Se establecen dichos años, ya que las trayectorias de referencia utilizadas llegan a emisiones netas cero en los años 2061 y 2062.

2.5 Propuesta de metas de mitigación nacional para el periodo 2019-2030

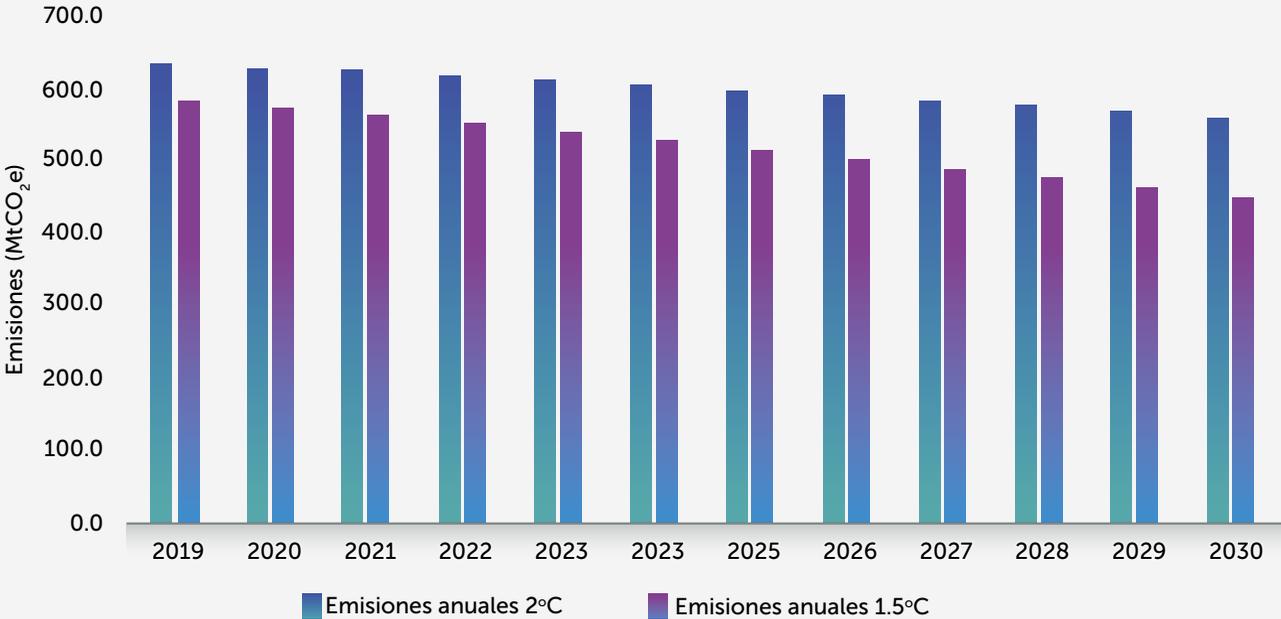
Actualmente, los compromisos adquiridos por México en el marco del Acuerdo de París son insuficientes para mantener el aumento de la temperatura media global por debajo de los 2°C (Peters et al., 2017). Por tal motivo, utilizando como punto de partida la metodología ICM de estimación

de presupuesto de carbono nacional y los resultados obtenidos en la sub-sección 2.3 y 2.4, se presentaron nuevas metas de mitigación anualizadas (ver Tabla 6 y Figura 5) que ofrecen una perspectiva clara de la necesidad de una mayor ambición de reducción de emisiones por parte del país.

Tabla 6: Metas de mitigación nacional para el periodo 2019-2030 para mantener la TMG en 2°C y 1.5°C (MtCO₂e)

Año	Límite de emisiones nacionales para mantener el aumento de la TMG en 2°C (MtCO ₂ e)	Límite de emisiones nacionales para mantener el aumento de la TMG en 1.5°C (MtCO ₂ e)
2019	636.53	584.68
2020	631.31	574.38
2021	625.72	563.62
2022	619.78	552.45
2023	613.51	540.87
2024	606.89	528.90
2025	599.97	516.57
2026	592.74	503.89
2027	585.21	490.89
2028	577.39	477.58
2029	569.31	463.99
2030	560.96	450.13
TOTAL	7,219.35	6,248

Figura 5 Metas de mitigación nacional para el periodo 2019-2030 para mantener la TMG en 2°C y 1.5°C (MtCO₂e)



Como se puede observar en la Tabla 6 y Figura 5, el presupuesto de carbono acumulado de 2°C y 1.5°C disponible para México en el periodo 2019 al 2030 es 7,219.35 MtCO₂e y 6,248 MtCO₂e, respectivamente. A nivel anual, existe una diferencia promedio porcentual de 13.60%

entre los dos escenarios, considerando que la diferencia entre los presupuestos anuales va en aumento conforme se incrementa el tiempo. La estimación presentada en esta sección indica claramente la necesidad del fortalecimiento de la NDC en el año 2020.



3. Presupuesto de carbono para el sector eléctrico

Siguiendo la misma metodología utilizada en la Sección 2, en la presente sección se presenta el cálculo del presupuesto de carbono del sector de generación de electricidad, que corresponde al segundo emisor de GEI en el país (el primer emisor es el sector transporte).

Este sector contribuye con el 18% de las emisiones nacionales de acuerdo con el Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero 1990-2015 del INECC.



Para realizar el cálculo, las emisiones de dióxido de carbono equivalente nacionales obtenidas en las secciones anteriores (considerando el ajuste) fueron multiplicadas por un factor de 0.18²³ con el objetivo de crear una serie de tiempo para los escenarios de 2°C y 1.5°C. En las siguientes secciones se presentan los resultados para cada presupuesto de carbono de este sector.

3.1 Resultados obtenidos bajo una trayectoria de 2°C y 1.5 grados

A través de la metodología ICM²⁴, el presupuesto de carbono estimado del sector eléctrico para el escenario que mantiene el aumento de la TMG en 2°C fue de 3.9 GtCO₂e para el periodo 2019-2100.

Replicando el mismo ejercicio, ahora con la serie de tiempo del escenario de 1.5°C, el presupuesto de carbono del sector de generación eléctrica se estimó en una cantidad de 1.6 GtCO₂e para el periodo 2019-2100. Al comparar esta cifra con lo calculado para el escenario de 2°C, se observa una reducción del presupuesto de carbono de 59%.

23 Dicho factor se obtiene de la contribución que tiene en un 18% el sector de generación de electricidad sobre las emisiones nacionales.

24 Referir al anexo metodológico (Anexo 2).

**Cuadro
3****Presupuesto de carbono 2°C y 1.5°C del sector de generación eléctrica**

Para el periodo 2019-2100, se estimó un presupuesto de 3.9 GtCO₂e para mantener el aumento de la TMG en 2°C, mientras que, para 1.5°C se estimó una cantidad de 1.6 GtCO₂e.

3.2 Propuesta de meta de mitigación del sector eléctrico para el periodo 2019 - 2030

Utilizando la misma herramienta de cálculo que fue empleada para determinar la propuesta de metas nacionales en la sub-sección 2.5,

la Tabla 7 presenta las metas de mitigación anuales para el sector de generación eléctrica en México para el periodo 2019-2030.

Tabla 7: Metas de mitigación del sector de generación de electricidad para el periodo 2019-2030 para mantener el aumento de la TMG en 2°C y 1.5°C (MtCO₂e)

Año	2°C (MtCO ₂ e)	1.5°C (MtCO ₂ e)
2019	114.11	104.34
2020	113.14	102.45
2021	112.10	100.47
2022	110.99	98.42
2023	109.84	96.30
2024	108.62	94.11
2025	107.34	91.86
2026	106.01	89.55
2027	104.63	87.18
2028	103.20	84.76
2029	101.72	82.28
2030	100.19	79.77
TOTAL	1,291.92	1,111.48

Como se puede observar en la Tabla 7, el presupuesto de carbono acumulado para los escenarios de 2°C y 1.5°C del sector de generación de electricidad en el periodo

2019 al 2030 es de 1,291.92 MtCO₂e y 1,111.48 MtCO₂e, respectivamente. Como se observa, existe una diferencia entre los dos escenarios de 180.44 MtCO₂e.

El cálculo de presupuestos anuales provee un punto de comparación con lo establecido en la NDC. Se puede observar que al comparar las metas no condicionadas de mitigación del

documento PRODESEN 2019-2033²⁵ contra las cifras estimadas en la Tabla 8, es evidente la necesidad de una mayor ambición en el sector.

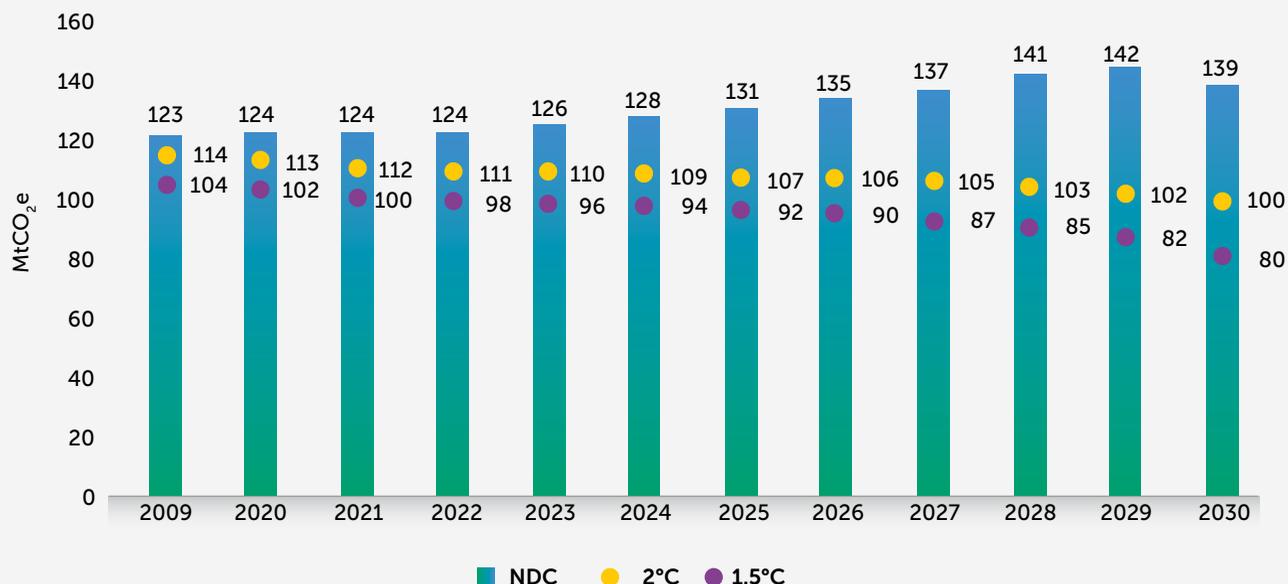
Tabla 8: Metas de mitigación no condicionadas (NDC) comparadas con el presupuesto de carbono anual estimado del sector de generación de electricidad 2019-2030 de 2°C y 1.5°C (MtCO₂e)

Año	Metas de mitigación no condicionadas del sector de generación de electricidad –NDC (MtCO ₂ e) *	2°C (MtCO ₂ e) *	1.5°C (MtCO ₂ e) *	Diferencia porcentual 2°C (%)	Diferencia porcentual 1.5°C (%)
2019	123	114	104	-7.23	-15.17
2020	124	113	102	-8.76	-17.38
2021	124	112	100	-9.60	-18.98
2022	124	111	98	-10.48	-20.63
2023	126	110	96	-12.83	-23.57
2024	128	109	94	-15.14	-26.48
2025	131	107	92	-18.06	-29.88
2026	135	106	90	-21.47	-33.67
2027	137	105	87	-23.63	-36.37
2028	141	103	85	-26.81	-39.89
2029	142	102	82	-28.37	-42.05
2030	139	100	80	-27.92	-42.61

NOTA: * Valores redondeados a su entero próximo.

25 Se mantienen las cifras del PRODESEN 2018-2032 ya que no ha existido un cambio sobre las metas no condicionadas por parte del INECC.

Figura 6 Metas de mitigación no condicionadas (NDC) comparadas con el presupuesto de carbono anual estimado del sector de generación de electricidad 2019-2030 de 2°C y 1.5°C (MtCO₂e)

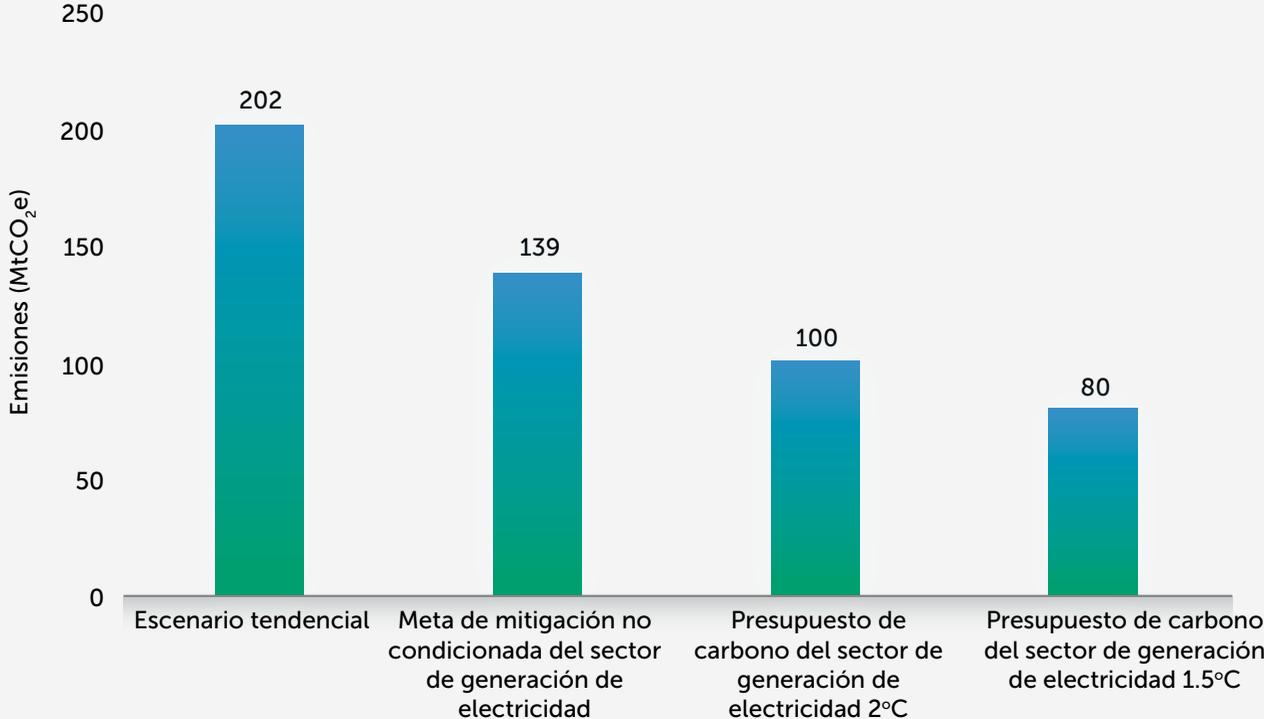


En la Tabla 8 y Figura 6 se puede observar que en el año 2030 la meta de mitigación no condicionada es de 139 MtCO₂e, mientras que los valores anuales otorgados por la herramienta de presupuesto de carbono del sector de generación de electricidad de 2°C y 1.5°C es de 100 MtCO₂e y 80 MtCO₂e, respectivamente. En 2030 se deberán de disminuir las emisiones un 27.92% para el escenario de 2°C mientras que para el escenario de 1.5°C se tendría que reducir 42.61% adicional al 31% establecido en la NDC

con respecto a la trayectoria inercial (BAU, por sus siglas en inglés) (ver Figura 7). Estas cifras podrán apoyar para demostrar la necesidad de un replanteamiento de la NDC utilizando la metodología de presupuesto de carbono, específicamente para el sector de generación eléctrica, dichos resultados, abona a lo sugerido durante el taller de socialización de buscar cifras claras que sirvan para aumentar la ambición de las metas de mitigación del país²⁶.

26 Ver Anexo 3: Conclusiones del Taller de Socialización.

Figura 7 Comparación del escenario tendencial, meta no condicionada, presupuesto de carbono del sector de generación de electricidad de 2°C y 1.5°C para el año 2030 (MtCO₂e)



Con el conocimiento de las necesidades de mitigación adicionales que el sector de generación de electricidad tendrá que realizar para alinearse a la trayectoria de 2°C y 1.5°C, la siguiente pregunta a contestar es ¿cómo traducir las nuevas metas de mitigación en acciones concretas para reducir emisiones? Para ello, en la siguiente sección

se evaluarán medidas de mitigación que incluyen una mayor penetración de energías renovables en el Sistema Eléctrico Nacional (SEN), teniendo en consideración algunas observaciones que resultaron del primer taller de socialización sobre las estimaciones preliminares del presupuesto de carbono²⁷.

²⁷ Ver Anexo 3: Conclusiones del Taller de Socialización.



4. Evaluación de una mayor penetración de energías renovables para el cumplimiento del presupuesto de carbono del sector eléctrico nacional

Al identificar las metas de mitigación que el sector de generación de electricidad en México tiene que cumplir para alcanzar con lo establecido en el Acuerdo de París, el siguiente reto es evaluar las medidas de política pública costo-efectivas que puedan reducir las emisiones de GEI de este sector.

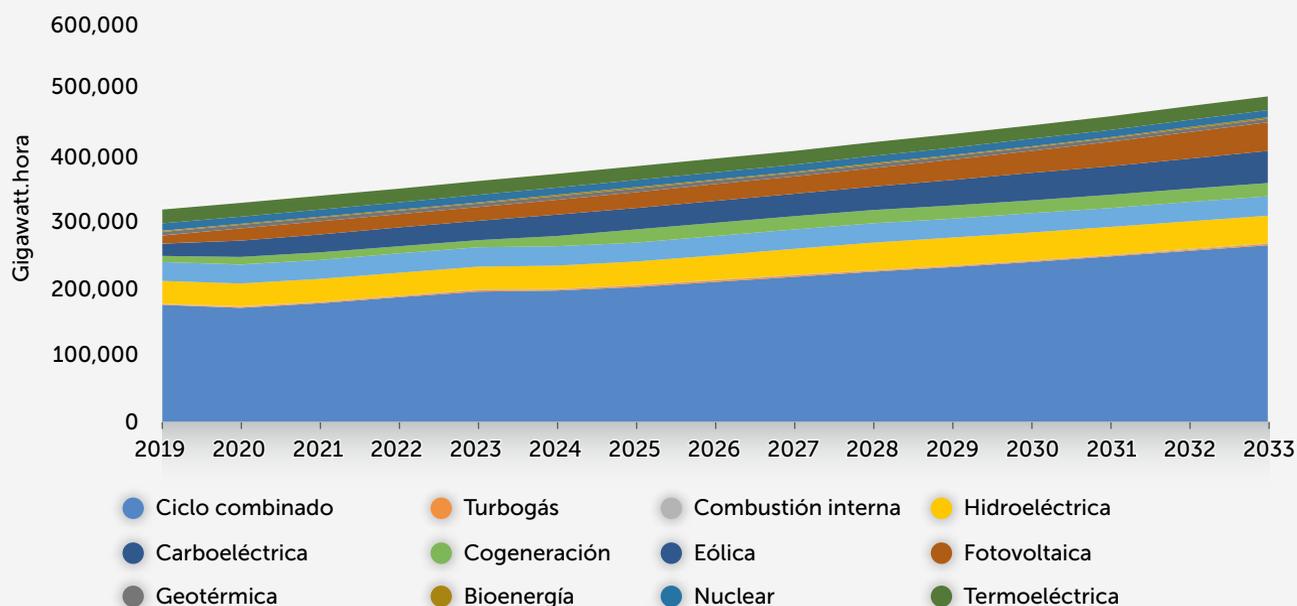
Sin embargo, antes de presentar y evaluar un portafolio de medidas, es importante determinar el punto de partida en el cual se encuentran las energías renovables dentro del Sistema Eléctrico Nacional (SEN) de acuerdo con el PRODESEN 2019 – 2033. Lo anterior con la finalidad de estimar la magnitud de reducciones necesarias sobre la planeación del SEN, bajo la condición de cumplimiento de un presupuesto de carbono.

4.1 Análisis del PRODESEN 2019-2033 bajo el cumplimiento del presupuesto de carbono

El análisis de los sistemas eléctricos se hace desde dos perspectivas diferentes pero complementarias: análisis de la generación y análisis de la capacidad. Desde el punto de vista de cambio climático, el primer análisis resulta de mayor importancia ante su asociación directa con las emisiones. Desde el punto de vista económico, el análisis de capacidad instalada es de mayor relevancia dada su relación con el tema de inversión inicial a la hora de construir la planta. Dado que este documento tiene como propósito trazar una ruta de mitigación de GEI para el sector eléctrico, se abordará fundamentalmente el análisis de la generación de electricidad.

Para estimar la generación de energía eléctrica y con la limitante del nuevo documento del PRODESEN 2019-2033 donde no presenta la evolución de la generación por tecnología, fue necesario asumir los factores de planta promedio del PRODESEN 2018-2032 en el periodo de planeación de referencia. A continuación, en la Figura 8 se muestra dicha evolución por tecnología.

Figura 8 Evolución de la generación eléctrica 2019-2033 (GWh)

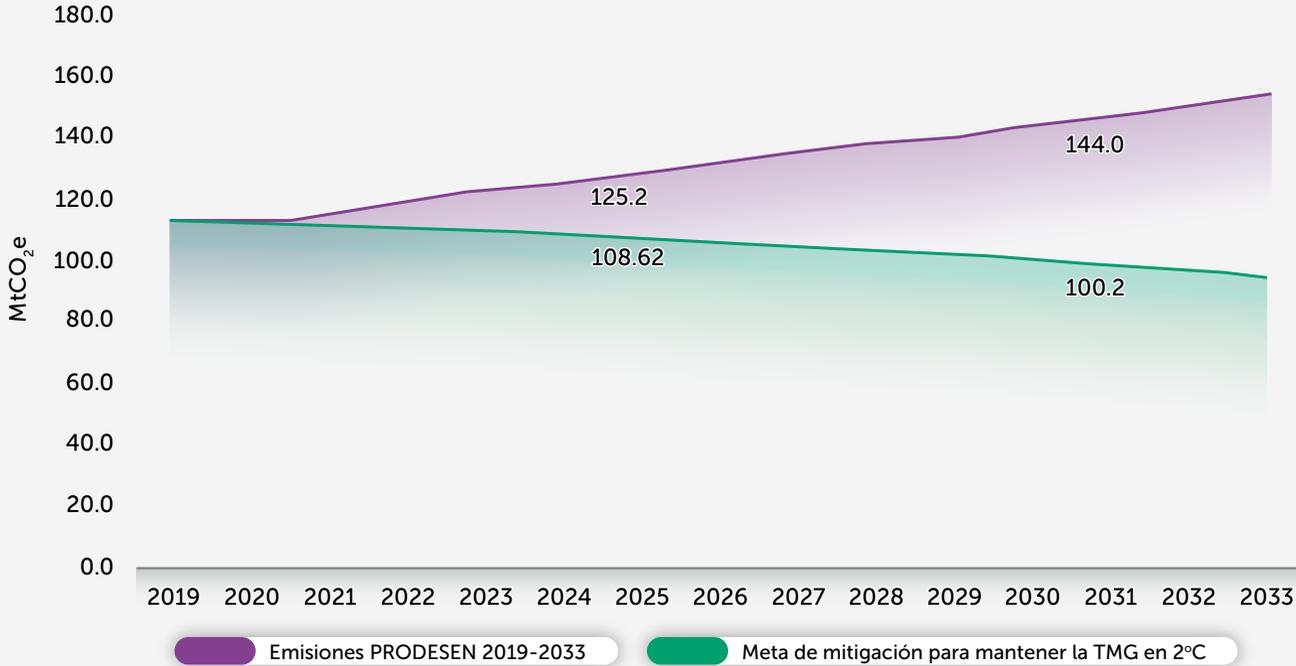


Fuente: Elaboración propia con información del PRODESEN 2019-2033, 2019

Como se puede observar en la figura anterior, la tecnología de ciclo combinado representa, al final del periodo estudiado, el 54.25% del total de la matriz de generación eléctrica. Asimismo, la energía renovable variable representa para el año 2033 el 18.75% del total de generación. **Ahora bien, tomando como referencia el año 2024 para el que se establece una meta de 35% de energías limpias sobre el total de la matriz energética (Ley de Transición Energética), se observa que, en ese año, las energías limpias representan el 33.16%. Esta cifra se encuentra 1.84% debajo de la meta establecida por la ley.**

Lo antes mencionado, nos indica que es necesario incrementar la ambición a través de una detallada planeación en donde se establezcan las acciones necesarias para el cumplimiento de la meta del 2024. Ya que las acciones establecidas en el documento de planeación actual (PRODESEN 2019-2033) nos llevaría a tener una matriz de generación eléctrica que no cumple con el objetivo de limitar el aumento de la TMG en 2°C (ver Figura 9).

Figura 9 Emisiones PRODESEN 2019 – 2033 y metas de mitigación para mantener la TMG en 2°C (MtCO₂e)



Fuente: Elaboración propia con información del PRODESEN 2019-2033; (*) Es importante aclarar que las emisiones del PRODESEN 2019-2033 fueron obtenidas utilizando los factores de emisión del PRODESEN 2018-2032, ya que en el documento más reciente no venía dicha información.

De acuerdo con la metodología de presupuesto de carbono, se puede observar en la Figura 9 una diferencia significativa entre la tendencia de las emisiones de la matriz energética de generación establecida en el PRODESEN 2019-2033²⁸ y las emisiones que se deberían tener para limitar el aumento de la TMG en 2°C. Por ejemplo, en el año 2024

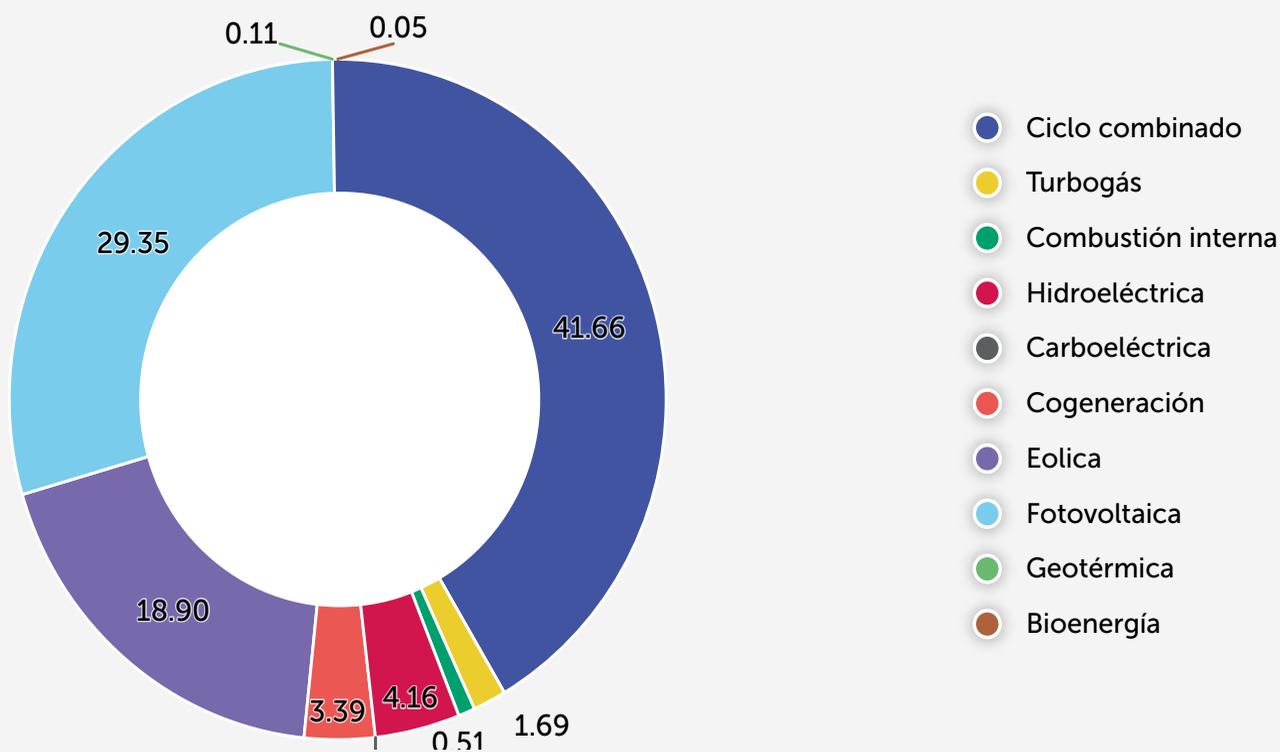
las emisiones se encuentran 17 MtCO₂e por encima del presupuesto de carbono. Asimismo, para el 2030, las emisiones del PRODESEN 2019-2033 se encuentran 5 MtCO₂e por arriba de la meta no condicionada establecida en la NDC de 139 MtCO₂e y 44 MtCO₂e por encima de lo establecido para mantener el aumento de la TMG en 2°C.

²⁸ Es importante destacar que al revisar los datos de emisiones del Capítulo VII en el PRODESEN 2019-2033, las cantidades no se encuentran alineadas a los factores de emisión establecidos por cada tecnología.

Retomando lo discutido en el taller de socialización²⁹, las cifras antes mencionadas pueden servir como mensaje clave para los tomadores de decisión, permitiéndoles demostrar la urgencia de incrementar la participación de las energías renovables en la matriz energética del país. En la siguiente sección se presenta una propuesta de matriz energética que cumple con el presupuesto de carbono asignado en este trabajo.

En cuanto al análisis de capacidad, de acuerdo con el PRODESEN 2019-2033, para el año 2033 se espera una adición total de capacidad de 70,316 MW, de los cuales el 48.25% son energías renovables variables, donde la solar fotovoltaica tiene una adición de 20,640 MW (29.35%) y la energía eólica de 13,289 MW (18.90%). Si se suma la participación de todas las fuentes de energías limpias, las adiciones para el año 2033 representan el 52.57% (ver Figura 10).

Figura 10 Participación porcentual en la capacidad adicional acumulada del PRODESEN 2019-2033 por tecnología



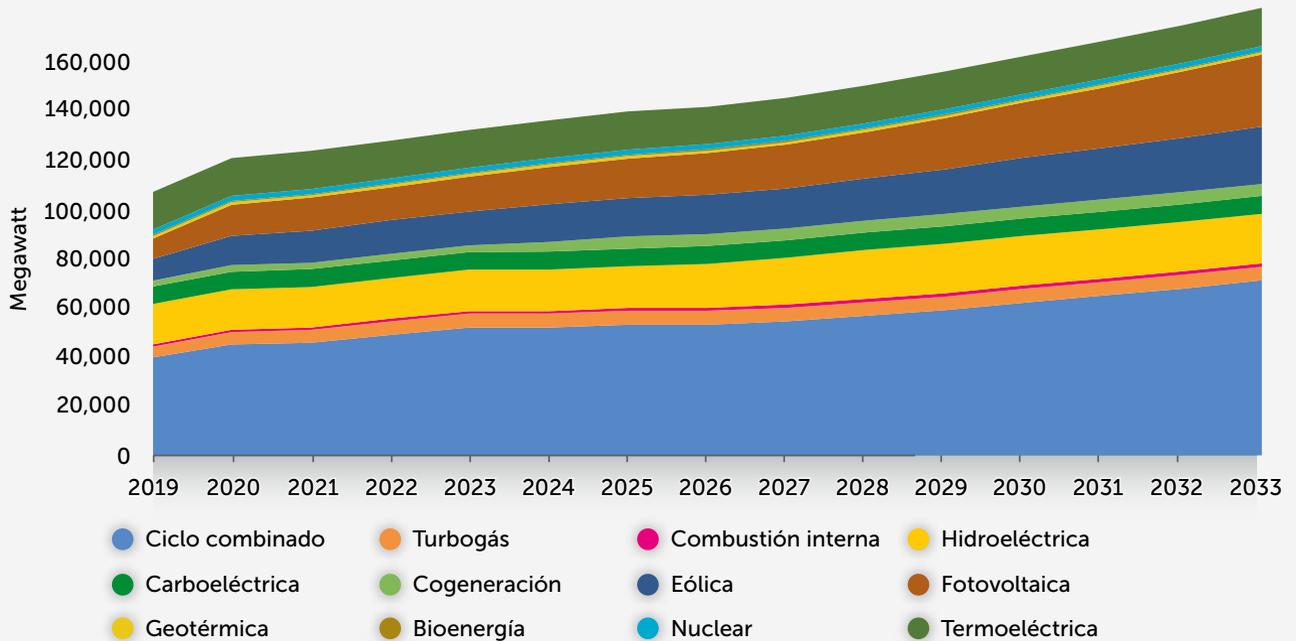
Fuente: Elaboración propia con información del PRODESEN 2019-2033

29 Ver Anexo 3: Conclusiones del Taller de Socialización.

Las adiciones anteriormente mencionadas, considerando los niveles de capacidad instalada del año 2018 establecidos en el

capítulo 5 del PRODESEN 2019 – 2033, tienen una evolución en el periodo de planeación que se presenta a continuación en la Figura 11.

Figura 11 Evolución de la capacidad instalada 2019-2033 (MW)



Fuente: Elaboración propia con información del PRODESEN 2019-2033

En la Figura 11, destaca que la tecnología predominante es ciclo combinado con una proporción promedio de 38%. Mientras que, las energías renovables variables representan en el caso de la energía eólica un 11% y la energía solar fotovoltaica un 12% en promedio para el periodo 2019-2033. Otra tecnología con una participación

importante en la capacidad instalada es la energía hidroeléctrica con una proporción promedio de 13% para el periodo. Ahora bien, para el 2033, se espera una capacidad total instalada de 140,369 MW, lo cual representa un incremento de 57,678 MW en comparación con la capacidad total del 2019.

4.2 Portafolio de tecnologías de energías renovables para el cumplimiento del presupuesto de carbono

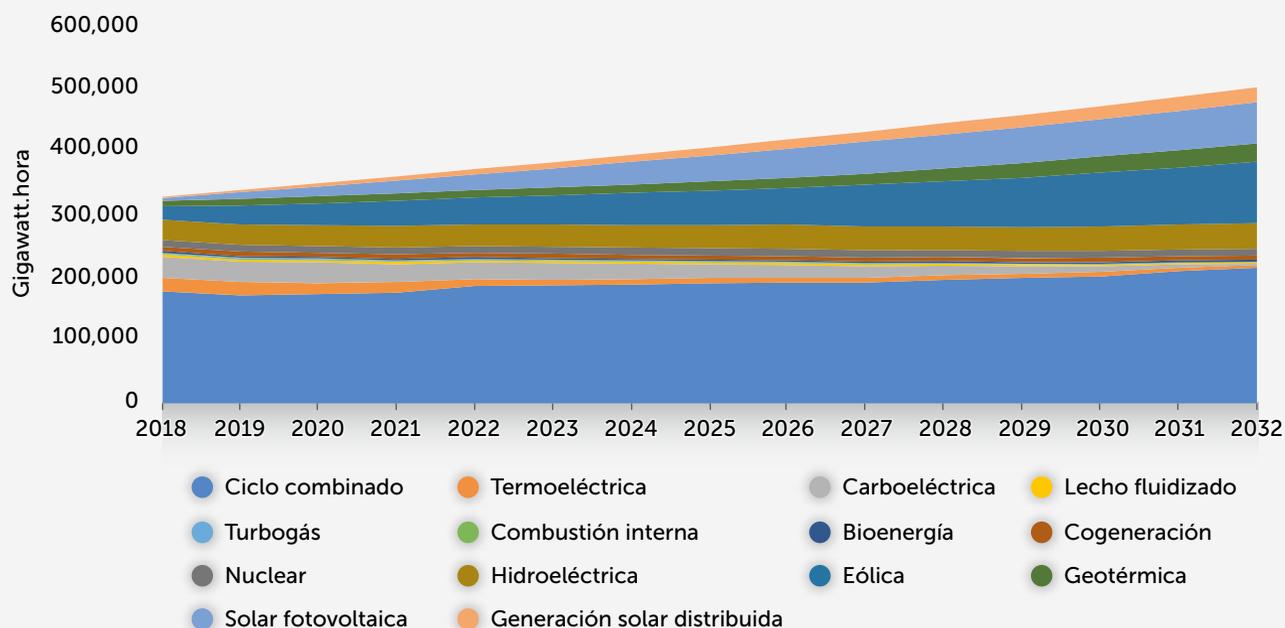
En relación con el análisis de la sub-sección 4.1 y lo alejado que se encuentra la matriz energética de generación del PRODESEN 2019-2033 de limitar el aumento de la TMG en 2°C, a continuación, se presenta una matriz alternativa que tiene como objetivo alcanzar las metas de emisiones establecidas de acuerdo con las estimaciones obtenidas del presupuesto de carbono de 2°C.

La matriz que se propone se obtuvo a través de un modelo³⁰ que optimiza la

generación de electricidad mediante nuevas construcciones y retiro de plantas eléctricas a través de la minimización de los costos totales del sistema durante un horizonte de planeación a largo plazo (15 años).

La Figura 12 presenta la propuesta de generación de la nueva matriz energética acorde con las emisiones necesarias para cumplir con el presupuesto de 2°C.

Figura 12 Evolución de la generación 2018-2032 del Escenario 2°C (GWh)



³⁰ El modelo utilizado fue PLEXOS.

Como se observa en la Figura 12, en el escenario de 2°C se espera que la generación total en el año 2032 se encuentre en 497,977 GWh³¹. Se requiere que la matriz eléctrica cuente con una participación del 51.1% de energías renovables, 4.0% de energías limpias³² y 44.9% de tecnologías convencionales. Particularmente, la energía solar fotovoltaica a gran escala, la generación solar distribuida y la energía eólica para el 2024 deberán generar 30,605 GWh, 9,275 GWh y 46,506 GWh, respectivamente. Mientras que, para el año 2032, se espera que generen 65,159 GWh, 23,563 GWh y 96,854 GWh, respectivamente.

En cuanto a la capacidad del sistema, los resultados del ejercicio de planeación indican que se requieren 95,881 MW de capacidad adicional para satisfacer la demanda de energía eléctrica en el periodo 2018-2032³³ (ver Tabla 9). De esta capacidad el 82.8% corresponde a tecnologías renovables, mientras que el 17.1% a tecnologías convencionales. Particularmente, las tecnologías renovables variables como la solar fotovoltaica y la eólica son las predominantes con 35,617 MW y 24,831 MW respectivamente. Por su parte, la generación distribuida alcanza a representar el 13.7% de la capacidad instalada acumulada al año 2032.

Tabla 9: Participación porcentual en la capacidad adicional 2018-2032 del Escenario de 2°C por tecnología

Tecnología	Adición de capacidad 2018-2032 en MW	Participación porcentual de la capacidad adicional
Ciclo combinado	16,092	16.78
Turbogás	340	0.35
Hidroeléctrica	2,665	2.78
Eólica	24,831	25.90
Geotérmica	3,140	3.27
Solar fotovoltaica	35,617	37.15
Generación distribuida	13,196	13.76
TOTAL	95,881	100

31 En comparación con la cantidad estimada del PRODESEN 2019-2033 existe una diferencia de 20,386 GWh de generación eléctrica.

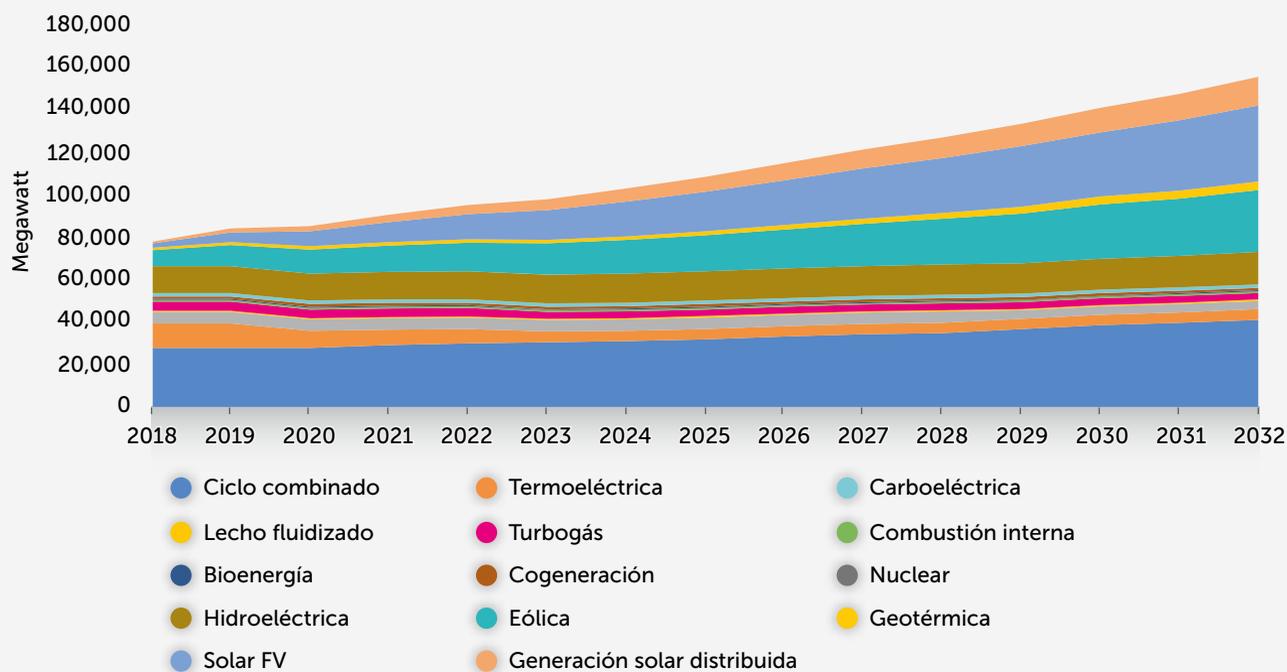
32 Por energías limpias se refiere a cogeneración, bioenergía y energía nuclear.

33 Al revisar los resultados, dado a una limitante de disponibilidad de información del PRODESEN más reciente, la propuesta que se presentará en este estudio se encuentra acotada solo hasta el año 2032.

Con base en las adiciones de capacidad que se llevarán en los siguientes 15 años, se observan dos fenómenos importantes. El primero corresponde al retiro de las plantas carboeléctricas y termoeléctricas y su sustitución por plantas de ciclo combinado, lo cual resulta en una reducción de emisiones

y mayor flexibilidad en el sistema. El segundo fenómeno corresponde a la incorporación de una mayor capacidad de energías renovables para cubrir la demanda de energía eléctrica. En la Figura 13, se observa la evolución de la capacidad instalada de las tecnologías renovables en el sistema eléctrico.

Figura 13 Evolución de la capacidad instalada 2018-2032 del Escenario 2°C (MW)



Como se puede apreciar en la Figura 13, dentro de las fuentes renovables, la energía eólica y la solar fotovoltaica son las que se incorporan a la matriz energética de manera predominante,

donde la energía eólica representa un crecimiento promedio anual de 1.6 GW, y la energía solar fotovoltaica de 2.9 GW.

4.3 Estimación de curvas de costo de abatimiento marginal

Como se observó, el Escenario de 2°C propuesto para alcanzar las metas anuales establecidas por el presupuesto de carbono representa un despliegue importante de energías renovables en el Sistema Eléctrico Nacional. Por tal motivo, es necesario evaluar el costo-beneficio de una política pública de implementación ambiciosa de energías renovables³⁴. Una herramienta para llevar a cabo esta evaluación es la determinación de costos marginales de abatimiento de emisiones de GEI, que pueden representarse de manera gráfica a través del potencial de abatimiento de las medidas y su costo para evitar la emisión de una tonelada de CO₂e. Esta curva es conocida como la curva de costo de abatimiento marginal (CCAM).

Para entender de manera sencilla cómo deben de ser construidas las curvas CCAM, se toma como referencia lo establecido por Travis Bradford (2018) quien explica que, para calcular el costo de abatimiento de una acción o una tecnología, ésta requiere del entendimiento de dos factores:

- 1) La naturaleza de la acción y/o de la tecnología.
- 2) El escenario base de emisiones de carbono por el cual se está comparando o llevando a cabo su medición.

Por ejemplo, en el caso de la implementación de una tecnología de energía renovable, el costo a considerar sería el costo relativo de las tecnologías emisoras de carbono y las tecnologías de cero emisiones³⁵ dividido entre el número de toneladas de carbono abatido por la cantidad de generación. Esta operación resulta en un valor con la unidad de dólares por tonelada de dióxido de carbono equivalente abatido³⁶.

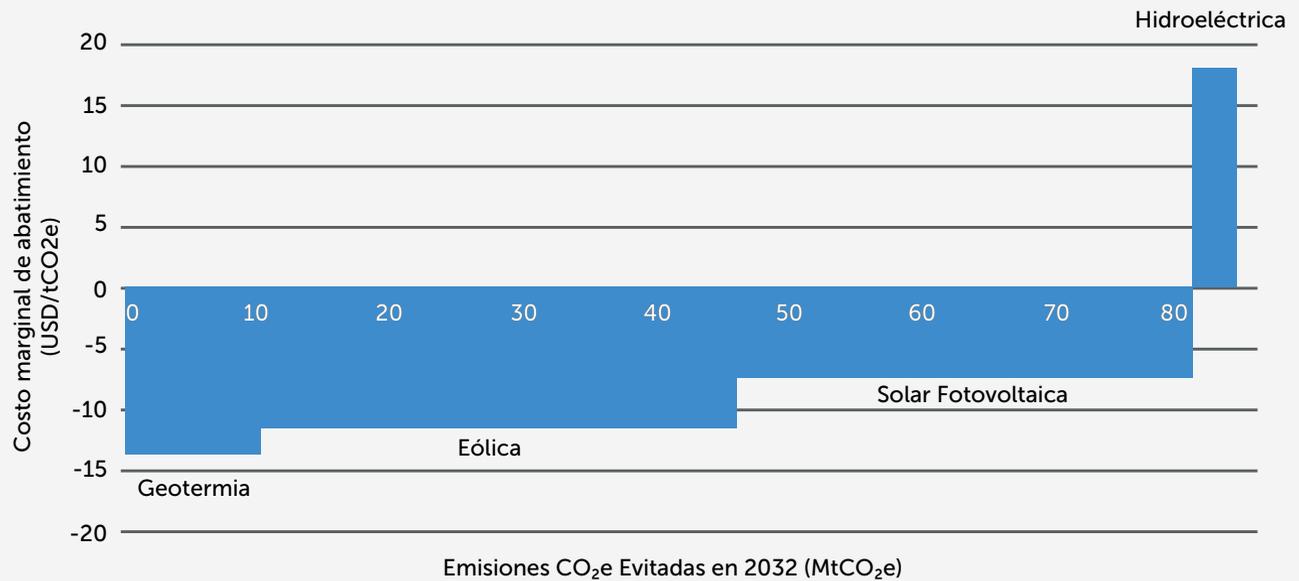
Las tecnologías de energías renovables consideradas en este análisis fueron: geotermia, eólica, solar fotovoltaica e hidroeléctrica. A continuación, en la Figura 14 se muestra la CCAM para estas tecnologías.

³⁴ Es importante señalar, que existen una diversidad de opciones de mitigación para reducir las emisiones de tal forma que se logren alcanzar las metas establecidas por el presupuesto de carbono, sin embargo, dado a que el modelo de optimización utilizado en la sub-sección 4.2 fue diseñado para abarcar la mitigación completa con la generación de energías renovables, solo se evalúa una política pública de despliegue de energías renovables.

³⁵ Basadas en una correcta estimación de todos los costos nivelados para cada una.

³⁶ Adicionalmente, modelar este tipo de costos de abatimiento sobre la gran cantidad de opciones de tecnologías y en el tiempo es complicado, por tal motivo es necesario tomar en cuenta un número de supuestos que logran simplificar su cálculo. Según Bradford (2018), algunos de estos supuestos son: el horizonte de tiempo, los precios de los energéticos, tasas de aprendizaje para nuevas tecnologías y la tasa de descuento.

Figura 14 Curva de Costos de Abatimiento Marginal 2032 de penetración de energías renovables en el Sistema Eléctrico Nacional (USD/tCO₂e)



Fuente: Elaboración propia con información de costos del PRODESEN 2018-2032.

En la Figura 14 se puede observar en el eje horizontal las emisiones de dióxido de carbono equivalente evitadas para cada tecnología en el año 2032. El potencial de abatimiento para la geotermia es de 10.03 MtCO₂e, mientras que para la energía eólica es de 35.96 MtCO₂e, la energía solar fotovoltaica de 34.27 MtCO₂e, y la energía hidroeléctrica de 3.10 MtCO₂e. La diferencia que existe entre las emisiones evitadas por cada tecnología presentada se debe principalmente a la cantidad de adiciones de capacidad que tienen en el año 2032 cada una de estas tecnologías.

En el eje vertical, se observa el costo marginal de abatimiento para cada tecnología en dólares por tonelada de dióxido de carbono equivalente, resaltando que dichos valores se

grafican ordenando las medidas de mitigación de menor a mayor costo marginal de abatimiento. En este sentido el costo marginal de la geotermia es de -13.44 USD/tCO₂e, la energía eólica de -11.10 USD/tCO₂e, la energía solar fotovoltaica de -6.72 USD/tCO₂e y la energía hidroeléctrica de 17.95 USD/tCO₂e. Como se puede ver, los costos marginales de tres tecnologías tienen valores negativos. Estos valores representan un ahorro que se da principalmente por el ahorro en el gasto que se tendría que hacer al comprar combustibles fósiles de la alternativa de referencia. Es decir, que los ahorros en costos de combustibles son mayores que las inversiones necesarias para las tecnologías renovables, con lo que estas inversiones pueden pagarse.

Asociado a los costos de abatimiento marginal, también es importante considerar el costo del sistema eléctrico³⁷ al implementar una ruta de descarbonización como la establecida en el escenario de 2°C. En el periodo del 2019 al 2032 se espera que el costo total del sistema propuesto ascienda a una cantidad de 237.96 mil de millones de dólares (mmusd), donde la energía renovable variable representa una cantidad de 77.13 mmusd. Específicamente, la energía solar fotovoltaica

tendría un costo de implementación de 36.89 mmusd, mientras que, la energía eólica tendría un costo de 40.25 mmusd. Por tal motivo, el despliegue de las tecnologías renovables, principalmente solar y eólica, si bien representa una considerable inversión inicial, estas reducen de manera importante los costos de operación y de combustibles, la cual se debe principalmente al desplazamiento de la generación de electricidad mediante fuentes convencionales.

37 Para el costo total se toman en cuenta las siguientes variables: costo de inversión, costos fijos de operación y mantenimiento, costos variables, costos de combustibles y costos de la energía esperada no suministrada.



Conclusiones

Este trabajo busca sentar las bases para desarrollar una metodología para estimar presupuestos de carbono nacionales y sectoriales.

Este esfuerzo se suma a una serie de acciones que han permitido incrementar la relevancia y la adopción de este concepto a nivel global. En el caso de México, este trabajo, apoyado por la Cooperación Alemana al Desarrollo Sustentable (GIZ), es uno de los primeros pasos para que México sea parte de ese esfuerzo global.

Como parte de los resultados, el presupuesto de carbono estimado para que México pueda cumplir con el objetivo de limitar el aumento de temperatura media global por debajo de 2°C establecido en el Acuerdo de París fue de 22.2GtCO₂e para el periodo 2019 – 2100. Asimismo, para limitar dicho aumento por debajo de 1.5°C, el presupuesto de carbono estimado fue de 8.9 GtCO₂e en el mismo periodo.

En el caso del sector eléctrico, el presupuesto de carbono que tiene disponible para el periodo 2019 – 2100 es de 3.9 GtCO₂e y 1.6 GtCO₂e, para los escenarios de 2°C y 1.5°C, respectivamente.

El cumplimiento de las metas antes presentadas no es sencillo. Sin embargo, el uso de una herramienta compleja de optimización del sistema eléctrico mostró que es técnica y económicamente factible cumplir con el presupuesto de carbono alineado a una trayectoria de 2°C sin comprometer la estabilidad de la red. Para lograrlo, es necesario incrementar la participación de fuentes renovables en la matriz de generación a 49% en 2032; reducir la participación actual de fuentes fósiles tales como carboeléctricas, lecho fluidizado, termoeléctricas convencionales y turbo gas; considerar una mayor expansión de la Red Nacional de Transmisión y definir el rol que jugarán las tecnologías que pueden contribuir a la flexibilidad del Sistema Eléctrico Nacional.

Asimismo, se presentó a través del cálculo de costos marginales de abatimiento, que alternativas tecnológicas renovables como la energía solar, eólica y geotérmica tienen costos de abatimiento negativos, es decir, que a pesar de que presenten costos de inversión altos, los beneficios tanto ambientales como en el ahorro de combustibles fósiles, pagan esta inversión y traen beneficios económicos adicionales.

México debe incrementar la ambición de sus metas de mitigación si desea cumplir con el Acuerdo de París. El 2020, representa un año clave para hacerlo ya que los países deben presentar sus nuevas NDCs ante la Convención Marco. Si bien se reconocen las limitantes de este trabajo y las áreas de mejora, podemos concluir que la metodología es lo suficientemente robusta para ser utilizada como una herramienta para la toma de decisiones y como un insumo para los procesos de revisión y actualización de las metas climáticas de México.



Recomendaciones y siguientes pasos

Socializar y capacitar a tomadores de decisión sobre el concepto y los beneficios de utilizar presupuestos de carbono como metas de mitigación.

Elaborar rutas de descarbonización sectoriales alineadas al presupuesto de carbono de 2°C y 1.5°C

Continuar con el desarrollo de la metodología y explorar la posibilidad de hacerlo como un proceso iterativo de la mano de las rutas de descarbonización sectoriales.

Las lecciones aprendidas al realizar este trabajo nos indican que es necesario ampliar el análisis y llevar a cabo las siguientes acciones

Utilizar la metodología propuesta para estimar presupuestos de carbono para los gobiernos subnacionales que permita el desarrollo de planes de acción climática y estrategias sectoriales.

Profundizar en el análisis comparativo entre la metodología de línea base versus la metodología de presupuesto de carbono.

Desarrollar un análisis que identifique los co-beneficios asociados al cumplimiento del presupuesto de carbono.

Por otro lado, se identificó que para poder plantear una matriz de generación eléctrica alineada a una trayectoria de 1.5°C es necesario:

Generar conocimiento sobre la viabilidad técnica y económica del despliegue e incorporación de las baterías (almacenamiento de energía) en el Sistema Eléctrico de México.

Considerar en las medidas de mitigación, acciones de eficiencia energética, así como otras acciones tales como desplazamiento de la demanda y demanda controlable.

Estudiar el tema de electro-movilidad y estimar la tasa de penetración que tendrá dicha tecnología en México para poder considerarla dentro de las variables utilizadas para estimar la futura demanda eléctrica, así como el impacto de incentivos para modular los horarios de carga y el papel de una política industrial para el desarrollo de esta tecnología en México.

Utilizar nuevamente el modelo PLEXOS para estimar una matriz energética alineada a un presupuesto de carbono de 1.5°C y establecer la ruta necesaria de descarbonización del sector para lograrlo.

Estimar nuevas curvas de costo de abatimiento marginal de las tecnologías necesarias para alcanzar una matriz energética alineada a la trayectoria de 1.5°C.



Anexos

Anexo 1. Metodología Iniciativa Climática de México: presupuesto de carbono nacional y del sistema eléctrico de México para mantener la temperatura media global en 2°C.

Para la presente metodología se utilizan los valores obtenidos en el Quinto Informe de Evaluación del IPCC del Grupo de Trabajo III. En dicho reporte los resultados de los multimodelos muestran que para limitar el calentamiento inducido por el ser humano a una cantidad menor que 2°C relativo al periodo 1861-1880 con una probabilidad mayor a 66 %, se requerirá que se mantengan

las emisiones acumuladas de CO₂ de todas las fuentes antropogénicas por debajo de aproximadamente 2900 GtCO₂ (con un rango de 2550 a 3150 GtCO₂ dependiendo en los factores diferentes a CO₂). Aclarando que, aproximadamente se han emitido hasta el 2011, 1900 GtCO₂ (IPCC, 2014). En la siguiente tabla se muestran otras estimaciones del reporte del IPCC:

Tabla 10: Emisiones acumuladas de CO₂ del periodo 2012 al 2100 compatible con las concentraciones atmosféricas simuladas en los CMIP5 Modelos del Sistema de la Tierra.

Escenario	Emisiones Acumuladas de CO ₂ del 2012 al 2100			
	GtC(*)		GtCO ₂ e	
	Promedio	Rango	Promedio	Rango
RCP2.6	270	140 a 410	990	510 a 1505
RCP4.5	780	595 a 1005	2860	2180 a 3690
RCP6.0	1060	840 a 1250	3885	3080 a 4585
RCP8.5	1685	1415 a 1910	6180	5185 a 7005

Nota: (*) 1 Giga tonelada de carbono = 1 GtC = 10¹⁵ gramos de carbono. Esto corresponde a 3.66 GtCO₂

Como se puede observar en la Tabla 10, existen diferentes estimaciones de emisiones acumuladas dependiendo del escenario, entre mayor sea el forzamiento radiativo (Ej. 4.5, 6.0 y 8.5) mayor es el promedio de presupuesto de carbono. En el caso del RCP4.5 el presupuesto de carbono es de 2,860 GtCO₂eq (2180 a 3690 GtCO₂eq), para el RCP6.0 el presupuesto es 3,885 GtCO₂eq (3080 a 4585 GtCO₂eq) y para el RCP8.5 es de 6,180 GtCO₂eq (5185 a 7005 GtCO₂eq).

Asimismo, el reporte indica que para limitar el calentamiento causado por emisiones de CO₂ antropogénicas con una probabilidad mayor a 33%, 50% y 66% a 2°C desde el periodo 1861- 1880, se requerirá que las emisiones acumuladas de CO₂ de todas las fuentes antropogénicas se mantengan en 1570 GtC (5760 GtCO₂), 1210 GtC (4440 GtCO₂), y 1000 GtC (3670 GtCO₂), respectivamente. Estas altas cantidades son reducidas a alrededor de 900 GtC (3300 GtCO₂), 820 GtC (3010 GtCO₂), y 790 GtC (2900 GtCO₂), respectivamente, cuando se toma en cuenta

el forzamiento de los otros gases diferentes al CO₂, considerando el escenario RCP2.6. Para el 2011, una cantidad de 515 [445 a 585] GtC (1890 [1630 a 2150] GtCO₂), ha sido ya emitida.

Considerando la información anterior, el primer paso fue obtener la base de datos que nos aportara la trayectoria del escenario RCP2.6, misma que se obtuvo del documento *Technical Annex – Synthesis report on the aggregate effect of the intended nationally determined contributions* de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). Específicamente, se utilizaron las proyecciones de las emisiones de dióxido de carbono de los escenarios P1³⁸ que utilizan los modelos GCAM 3.0³⁹, GCAM3.1, IMAGE 2.4⁴⁰, MERGE-ETL_2011⁴¹ y el REMIND 1.5⁴² para los años 2005 al 2100. De esta forma, fue posible calcular la mediana y los datos de los percentiles 10 y 90 respectivamente (ver Tabla 11).

38 Por escenarios P1 se refiere aquellos con una probabilidad mayor a 66% en mantenerse por debajo de 2°C implementando acciones inmediatas de mitigación de cambio climático.

39 Es un modelo de evaluación integrado conocido como *Global Change Assessment Model*.

40 Es un modelo de evaluación integrado conocido como *Integrated Model to Assess the Global Environment*.

41 Es un modelo de evaluación integrado.

42 Es un modelo de evaluación integrado conocido como *Regionalized Model of Investments and Technological Development*.

Tabla 11: Mediana, percentil 10 y percentil 90 de las proyecciones de los escenarios P1 utilizados en el reporte AR5-IPCC

Año	Mediana (MtCO ₂)	Percentil 10 (MtCO ₂)	Percentil 90 (MtCO ₂)
2005	32826.09	31575.97	34421.17
2010	35401.68	34683.63	36939.97
2015	35823.09	35587.59	36154.56
2020	35743.74	23964.59	37037.15
2025	34342.64	25433.94	34372.51
2030	31333.30	24973.04	34357.24
2035	26890.75	23712.87	27478.06
2040	20046.02	18240.83	26664.52
2045	17893.72	15161.51	20136.93
2050	15374.09	9665.13	17669.06
2055	ND	ND	ND
2060	6939.03	-466.15	8722.77
2065	ND	ND	ND
2070	-326.50	-6791.47	2512.10
2075	ND	ND	ND
2080	-5137.22	-9375.99	-2680.85
2085	ND	ND	ND
2090	-9597.65	-11628.70	-6929.06
2095	ND	ND	ND
2100	-10886.73	-15945.05	-8055.79

- Dados los valores encontrados, se utilizó la proporción estimada de emisiones en México, de acuerdo con las contribuciones históricas de los países que forman parte del IPCC. Es decir, se asumió la proporción de 1.39% (considerado un ajuste de dos puntos porcentuales sobre las estimaciones del INECC tomando en cuenta el banco de información de Potsdam) y teniendo los datos para México, se obtuvo una regresión capaz de explicar la trayectoria del RCP2.6 de México ($T_{\text{México}}$):

$$1 \quad T_{\text{México}} = (2.2467 * 10^{-3})t^3 - 13.8406t^2 + 28409.6464t - 19430085.48$$

Como se puede observar, la regresión (1) es una función de tercer grado, teniendo como coeficiente de determinación (R^2)⁴³ una cantidad de 0.9937. En la ecuación, la variable dependiente corresponde a las emisiones anuales de bióxido de carbono ($T_{\text{México}}$) en Megatoneladas de bióxido de carbono y la variable independiente es el tiempo (t) en años.

Una vez obtenida la regresión y la ecuación para la trayectoria de emisiones, el siguiente paso fue obtener la integral ($B_{\text{México}}$), que representa el área bajo la curva de la trayectoria del escenario RCP2.6 de México para el período 2011 al 2100. De esta forma, se determina la función integral de la regresión (1), y se evalúa para el intervalo 2011 – 2100, de la siguiente manera:

$$2 \quad B_{\text{México}} = \int_{t_0 = 2011}^{t_r = 2100} (2.2467 * 10^{-3} t^3 - 13.8406t^2 + 28409.6464t - 19430085.48)dt$$

El valor estimado del presupuesto de carbono de México es de **13,945.04 MtCO₂** o **13.945 GtCO₂**.

Sin embargo, antes de establecer dicha estimación, primero, es importante validar que el método utilizado es el adecuado para llevar a cabo los cálculos de presupuestos de carbono nacional y del sector eléctrico en México. Para esto, utilizando los valores obtenidos de la base de datos del *Technical Annex – Synthesis report on the aggregate effect of the intended nationally determined contributions* de la trayectoria del RCP2.6 (escenario P1) del IPCC global (T_{Global}), se obtuvo la siguiente regresión:

$$3 \quad T_{\text{GLOBAL}} = 1.6399 * 10^{-4} t^3 - 1.0102t^2 + 2,073.7225t - 1,418,272.022$$

43 El coeficiente determina la calidad del modelo para replicar los resultados, y la proporción de variación de los resultados que puede explicarse por el modelo.

Como se puede ver en la regresión (3), al igual que la regresión (1), es una función polinomial de grado 3 con una R^2 de 0.9937. De la misma manera que en el caso mexicano, se lleva a cabo el mismo procedimiento para obtener el presupuesto de carbono global (B_{Global}), con la diferencia que la variable independiente está valorada en Giga toneladas de bióxido de carbono, a continuación de manera resumida se expone la función integral con su respectivo resultado:

4

$$B_{GLOBAL} = \int_{2011}^{2100} (1.6399 * 10^{-4} t^3 - 1.0102t^2 + 2,073.7225t - 1,418,272.022)dt$$

Resolviendo y evaluando la función (4), se encontró una cantidad de **1,007.48 GtCO₂**, valor que se encuentra muy cercano a las estimaciones del escenario

RCP2.6 global (ver Tabla 12), el cual ayuda a darle validez a la metodología sugerida por la Iniciativa Climática de México.

Tabla 12. Comparativo de estimaciones de presupuesto de carbono global de ICM respecto a diferentes autores que son obtenidos a través de la trayectoria RCP2.6.

Autor(es)	Años	Presupuesto de carbono (GtCO ₂)
Iniciativa Climática de México	2011-2100	1,007.48 GtCO ₂
AR5-IPCC Grupo de Trabajo III	2011-2100	990 GtCO ₂
Rogelj et al. (2015)	2011-2100	790 GtCO ₂
Knutti y Rogelj (2015)	2013 – 2100	969 GtCO ₂
Millar y Friedlingstein (2018)	2016 – 2100	823 GtCO ₂
Gignac y Matthews (2015)	2014-2100	930 GtCO ₂

Fuente: Elaboración propia, 2019

Después de haber realizado la validación de la metodología del presupuesto de carbono, utilizando las unidades empleadas en los diferentes estudios, específicamente el del IPCC, a continuación, se presentará la metodología y estimaciones del presupuesto de carbono nacional y del sector eléctrico considerando las emisiones de dióxido de carbono equivalente.

Ya que fue posible validar la metodología de ICM con los valores estimados de presupuesto de carbono por el IPCC y diferentes autores,

se tiene la confianza para realizar las estimaciones de presupuesto de carbono nacional y del sector eléctrico mexicano tomando en cuenta las emisiones de GEI (en MtCO₂eq) proyectadas en el escenario P1 de los diferentes modelos de evaluación integrados del documento *Technical Annex – Synthesis report on the aggregate effect of the intended nationally determined contributions*. Para lograr lo anterior, primero se retoma el supuesto sobre la proporción de 1.39 % de emisiones globales por parte de México dada su contribución histórica de emisiones.

- Asumiendo el porcentaje de emisiones globales de dióxido de carbono equivalente de México y multiplicando dicha cantidad con las proyecciones obtenidas del escenario P1, se obtuvo la regresión polinomial que explica la trayectoria del RCP2.6 de México ($T_{México}$), dicha regresión es la siguiente:

$$5 \quad T_{México} = (2.1086 * 10^{-3})t^3 - 12.9982t^2 + 26,696.34393t - 18,268,514.77$$

Como se puede observar, la regresión (5) tiene un grado de correlación (R^2) de 0.9944. En la ecuación, la variable dependiente corresponde a las emisiones anuales de dióxido de carbono equivalentes ($T_{México}$) en Mega toneladas de dióxido de carbono equivalente y la variable independiente es el tiempo (t) en años.

Una vez obtenida la regresión para la trayectoria de emisiones, el siguiente paso fue obtener la integral ($B_{México}$), que representa el área bajo la curva de la trayectoria del escenario RCP2.6 de México para el período 2011 al 2100. De esta forma, se determina la función integral de la regresión (7), y se evalúa para el intervalo 2019 – 2100, de la siguiente manera:

$$6 \quad B_{México} = \int_{t_0 = 2019}^{t_r = 2100} (2.1086 * 10^{-3} t^3 - 12.9982t^2 + 26696.34393t - 18268514.77)dt$$

Finalmente, el valor estimado del presupuesto de carbono de México es de **22,722.21 MtCO₂e** o **22.7 GtCO₂e**.

Sin embargo, para mejorar la precisión de estimación de presupuesto de carbono, se calculó las emisiones excedentes tomando como referencia las emisiones históricas del 2010 al 2015 y haciendo una proyección con la tasa media de crecimiento (1.52%) para obtener los valores hasta el 2018. Con estos datos se restaron sobre la estimación del presupuesto de carbono anual para cada año a través de la ecuación (6), encontrando un excedente acumulado de 293.47 MtCO₂e.

Es importante señalar que al restar la cantidad de 293.47 MtCO₂e del presupuesto de carbono nacional ya estimado a través de la regresión (6), la trayectoria RCP2.6 tuvo que volver a ser estimada nuevamente, para de esta forma obtener una nueva estimación de presupuesto de carbono para México que se ajuste a las emisiones totales ya observadas del 2010-2018.

- En el caso del presupuesto de carbono nacional, la integral que nos ayuda obtener dicha estimación es la siguiente:

$$7 \quad B_{\text{México}} = \int_{t_0 = 2019}^{t_T = 2100} (1.8545 * 10^{-3} t^3 - 11.4221t^2 + 23,439.2980t - 16,025,182.84)dt$$

Obteniendo un presupuesto de carbono nacional de 22,194.19 MtCO₂e para el periodo de 2019 al 2100.

Para estimar el presupuesto de carbono para el sector eléctrico de México, se partió de la asignación sectorial establecida en la meta no condicionada de la NDC a la cual se estima se alcance para el 2030, es decir, una participación para el sector del 18% (139MtCO₂e). Señalando que existe todavía incertidumbre en cómo se definió dicho porcentaje, ya que no queda claro en la documentación de la metodología utilizada cómo obtener dicha proporción. Teniendo en cuenta lo anterior y considerando el reajuste de los excedentes de emisiones calculados anteriormente, con estos supuestos se obtuvo la regresión de la trayectoria para el sector de generación de electricidad de México:

$$8 \quad T_{\text{ELECTRICIDAD}} = 3.335 * 10^{-4}t^3 - 2.054t^2 + 4,213.544t - 2,880,040.129$$

Ahora bien, continuando con la metodología, se integra la regresión (8) para los años 2019 al 2100 y obtener el presupuesto de carbono del sector de generación de electricidad en México:

$$9 \quad B_{\text{ELECTRICIDAD}} = \int_{t_0 = 2019}^{t_T = 2100} (3.34 * 10^{-4} t^3 - 2.05t^2 + 4,213.54t - 2,880,040.13)dt$$

Resolviendo y evaluando la función (9), se encontró una cantidad de 3.94 GtCO₂e de presupuesto de carbono para el sector de generación de energía eléctrica del año 2019 al 2100.

Anexo 2. Metodología de la Iniciativa Climática de México: presupuesto de carbono nacional y del sistema eléctrico de México para mantener la temperatura media global en 1.5°C

Para el desarrollo metodológico del presupuesto de carbono para 1.5°C se utilizó el mismo procedimiento que en la subsección anterior, con la excepción que en este caso se llevó a cabo una exploración del material suplementario del Capítulo 2 del Reporte Especial sobre Calentamiento Global de 1.5°C del IPCC, esto con la finalidad de revisar los modelos utilizados que buscan a través de los “*shared socio-economic pathways*” una meta de 1.9 Wm⁻² de forzamiento radiativo para el 2100. En este sentido, como modelos de referencia se utilizaron los siguientes: *Asia-Pacific Integrated Model (AIM)*, *Global Change Assessment Model Version 4.0 (GCAM4)*, *Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impact – Global Biosphere Management (MESSAGE-GLOBIOM)*, *Regional Model of Investments and Development – Model of Agricultural Production and its Impact on*

the Environment (REMIND-MagPIE) y *World Induced Technical Change Hybrid – Global Biosphere Management (WITCH-GLOBIOM)*.

Sin embargo, se tuvieron que tomar unas decisiones al respecto sobre la base de datos seleccionadas. El primer filtro realizado fue para la trayectoria de dióxido de carbono se utilizó exclusivamente la variable emisiones de dióxido de carbono de combustibles fósiles e industria. Mientras que, para la variable de dióxido de carbono equivalente se seleccionó únicamente aquellas variables que se acercaban a las emisiones netas en el 2050. Sobre el segundo filtro, la selección de modelos para la trayectoria de dióxido de carbono equivalente quedo reducida a los siguientes modelos y escenarios: AIM/CGE – SSP2-1.9, REMIND-MagPIE – SSP2-1.9 y REMIND-MagPIE – SSP5-1.9.

- Ya definida la base de datos, se realizó el mismo procedimiento que en la sub-sección 14.1. Ahora bien, sin la necesidad de repetir el ejercicio de validación y el reajuste del excedente de emisiones a continuación se presenta la integral utilizada para estimar el presupuesto de carbono nacional de 1.5°C:

$$10 \quad B_{\text{México}} = \int_{t_0 = 2019}^{t_r = 2100} (3.2873 * 10^{-3} t^3 - 20.1480t^2 + 41,147.1961t - 27,999,957.83)dt$$

Resaltando que, la regresión dentro de la integral (10) tiene un grado de correlación (R^2) de 0.9999. Ahora bien, al evaluar la integral para el periodo 2019 al 2100 se obtiene un presupuesto de carbono de 8.89 GtCO₂e.

En el caso del presupuesto de carbono para el sector de generación eléctrica, se evaluó la siguiente integral:

$$11 \quad B_{\text{ELECTRICIDAD}} = \int_{t_0 = 2019}^{t_r = 2100} (5.9126 * 10^{-4} t^3 - 3.6229t^2 + 7,397.06561t - 5,032,307.57)dt$$

Obteniendo para el periodo 2019 al 2100 un presupuesto de carbono de 1.5°C para el sector de generación eléctrica en México de 1.6 GtCO₂e.

Anexo 3. Taller de Socialización de Presupuestos de Carbono

El desarrollo de esta investigación contó, además del análisis científico y técnico, con los insumos de un taller de socialización cuyo objetivo fue socializar y posicionar el concepto y metodología de estimación de presupuestos de carbono con Organizaciones de la Sociedad Civil e Instituciones académicas. Para tales efectos, se presentó la metodología propuesta por la Iniciativa Climática de México para estimar un presupuesto de carbono nacional y sectorial (sector eléctrico), y así contar con la retroalimentación de expertos y propiciar el intercambio de conocimiento que derivase en recomendaciones específicas. De esta dinámica se obtuvieron una diversidad de comentarios para mejorar el desarrollo metodológico y mejorar la instrumentación de política pública. El Taller se llevó a cabo el 16 de mayo de 2019 en el Hotel Novit, Ciudad de México

Entre los comentarios recibidos en una primera mesa de diálogo sobre los desafíos y restricciones de la metodología de ICM destacaron seis temas: fuentes de datos e información, incertidumbre, presupuestos sectoriales, escenarios, oportunidades de mejora y asignaciones. En el tema de fuentes de datos e información, se discutió sobre los supuestos detrás de las trayectorias estimadas, la insuficiencia de la disponibilidad de datos, la generación y desarrollo de bases de datos nacionales y una mayor comunicación con investigadores desarrolladores de metodologías similares.

Sobre la asignación sectorial se señaló que una estimación no es trivial de un presupuesto de carbono sectorial y es importante considerar la evolución tecnológica y escenarios prospectivos del sector de análisis. Finalmente,

como oportunidades de mejora se sugirió plantear el desarrollo metodológico como un proceso iterativo que analice las medidas de mitigación y la manera en la que otros países asignaron sus presupuestos, idealmente con características similares a México, así como proponer la metodología de presupuestos de carbono para la revisión de la NDC en México.

Por otra parte, en una segunda mesa de diálogo dedicada a los desafíos de implementación, se trataron fundamentalmente cuatro temas: desafíos políticos, desafíos de capacidades, los beneficios sociales, económicos y ambientales y la metodología de presupuestos de carbono en las próximas NDC. EL grupo participando señaló la importancia de clarificar los conceptos de presupuestos de carbono y el potencial de éstos para los tomadores de decisiones, de comunicar el sentido de urgencia para el cumplimiento de dichos presupuestos, la concientización y cambio de paradigma, la inclusión del concepto en la Ley General de Cambio Climático y en la NDC y la gestión de la obligatoriedad del uso de la metodología de presupuestos de carbono para la planeación de acciones climáticas. Sobre los beneficios sociales, económicos y ambientales se destacó la importancia de los presupuestos de carbono para disminuir las emisiones de contaminantes criterio mejorando la salud pública. Finalmente, para impulsar el concepto en la revisión de las próximas NDC en el 2020, se destacó la necesidad de desarrollar estrategias de comunicación específicas para distintas audiencias, incluyendo la difusión entre la ciudadanía, la elaboración de guías sectoriales de contabilización y el involucramiento de gobiernos estatales y ciudades, específicamente aquellos que se

encuentran planeando la implementación de la Agenda 2030 en sus estados.

Sin duda, dentro de las discusiones en las dos mesas de diálogo se expusieron sugerencias y comentarios que fueron tomados en cuenta en el desarrollo de este documento. Particularmente, uno de los temas que se destacó fue la necesidad de generar estimaciones de presupuesto de carbono nacional y del sector de generación eléctrica para mantener la temperatura media global en 1.5°C. Esta sugerencia se consideró para el desarrollo del presente documento y adicionalmente se calcularon los presupuestos de carbono anualizados para el periodo 2019 al 2030. Lo anterior con

la finalidad de crear una propuesta de mayor ambición de metas de mitigación para México y el sector eléctrico. Cabe destacar, que todavía existe una cantidad considerable de trabajo por realizar empezando por socializar y capacitar a tomadores de decisiones sobre el concepto de presupuestos de carbono y la necesidad de plantear rutas de descarbonización más ambiciosas para lograr cumplir las metas del Acuerdo de París.

El taller de socialización contó con la participación de entre 40 y 50 personas asistentes de organizaciones de sociedad civil, instituciones académicas, organismos internacionales e instituciones públicas.





Referencias

Bradford, Travis. *The Energy System: Technology, Economics, Markets and Policy*. MIT Press, 2018.

Clarke, Leon, et al. "International climate policy architectures: Overview of the EMF 22 International Scenarios." *Energy Economics* 31 (2009): S64-S.

Committee on Climate Change. *Reducing UK emissions: 2018 Progress Report to Parliament*. 2018.

CTI (2018) *Brown to Green Report 2018*. Climate Transparency Initiative (CTI).

C40 Cities (2018). *Deadline 2020: Method Report*.

Foley, A. M., et al. "Climate model emulation in an integrated assessment framework: a case study for mitigation policies in the electricity sector." *Earth System Dynamics* 7.1 (2016): 119.

Friedlingstein, Pierre, et al. "Persistent growth of CO₂ emissions and implications for reaching climate targets." *Nature geoscience* 7.10 (2014): 709.

Geels, Frank W., Frans Berkhout, and Detlef P. van Vuuren. "Bridging analytical approaches for low-carbon transitions." *Nature Climate Change* 6.6 (2016): 576-583.

Gignac, Renaud, and H. Damon Matthews. "Allocating a 2°C cumulative carbon budget to countries." *Environmental Research Letters* 10.7 (2015): 075004.

Harvey, Hal, Robbie Orvis, and Jeffrey Rissman. *Designing Climate Solutions: A Policy Guide for Low-Carbon Energy*. Island Press, 2018.

IIASA 2014, AR5 Scenario Database: Version 1.0.2., International Institute for Applied System Analysis, viewed 23 September 2019, < <https://tntcat.iiasa.ac.at/AR5DB/sd?Action=htmlpage&page=about#references>>

IIASA 2018, SSP Public Database: Version 2.0, International Institute for Applied

System Analysis, viewed 23 September 2019, <<https://tntcat.iiasa.ac.at/SspDb/dsd?Action=htmlpage&page=10>>

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. *Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero 1990-2015*. México (2018).

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. *Compromisos de Mitigación y Adaptación ante el Cambio Climático para el Periodo 2020-2030*. México (2015).

IPCC, 2014: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IPCC. (2014). *Climate Change Synthesis Report 2014*.

Knutti, Reto, and Joeri Rogelj. "The legacy of our CO₂ emissions: a clash of scientific facts, politics and ethics." *Climatic Change* 133.3 (2015): 361-373.

Matthews, H. Damon, Susan Solomon, and Raymond Pierrehumbert. "Cumulative carbon as a policy framework for achieving climate stabilization." *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 370.1974 (2012): 4365-4379.

México. *Ley de Transición Energética*. DOF 24-12-2015, December 2015: 40.

Millar, Richard J., et al. "Emission budgets and pathways consistent with limiting warming to 1.5°C." *Nature Geoscience* 10.10 (2017): 741.

Millar, Richard J., and Pierre Friedlingstein. "The

utility of the historical record for assessing the transient climate response to cumulative emissions." *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 376.2119 (2018): 20160449.

Riahi, Keywan, et al. "The shared socioeconomic pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: an overview." *Global Environmental Change* 42 (2017): 153-168.

Peters, Glen P., et al. "Key indicators to track current progress and future ambition of the Paris Agreement." *Nature Climate Change* 7.2 (2017): 118.

Rogelj, Joeri, et al. "Differences between carbon budget estimates unravelled." *Nature Climate Change* 6.3 (2016): 245.

Rogelj, Joeri, et al. "Zero emission targets as long-term global goals for climate protection." *Environmental Research Letters* 10.10 (2015): 105007.

Rogelj, J., D. Shindell, K. Jiang, S. Fifita, P. Forster, V. Ginzburg, C. Handa, H. Kheshgi, S. Kobayashi, E. Kriegler, L. Mundaca, R. Séférian, and M.V.Vilariño, 2018: Mitigation Pathways Compatible with 1.5°C in the Context of Sustainable Development. In: *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. In Press.

Rogelj, Joeri, et al. "Scenarios towards limiting global mean temperature increase below 1.5

C." *Nature Climate Change* 8.4 (2018): 325.

Secretaría de Energía. Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2018-2032. México (2018).

Secretaría de Energía. Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2019-2033. México (2019).

United Nations (2015). Paris Agreement.

Van Vuuren, Detlef P., et al. "The representative concentration pathways: an overview." *Climatic change* 109.1-2 (2011): 5.

Van Vuuren, D. P., Stehfest, E., den Elzen, M. G., Kram, T., van Vliet, J., Deetman, S., ... & Oostenrijk, R. (2011). RCP2. 6: exploring the possibility to keep global mean temperature increase below 2 C. *Climatic Change*, 109(1-2), 95.

**Presupuestos de carbono:
Una oportunidad para ampliar la ambición
climática del sector eléctrico**

GIZ | ICM 2019



Conectando energía y cambio climático