



REGATTA
Portal Regional para la Transferencia de Tecnología y la Acción
frente al Cambio Climático en América Latina y el Caribe



CARBONO CERO AMÉRICA LATINA

UNA VÍA PARA LA DESCARBONIZACIÓN NETA DE LA
ECONOMÍA REGIONAL PARA MEDIADOS DE ESTE SIGLO

DOCUMENTO DE VISIÓN

AUTORES:

Walter Vergara
Joergen V Fenhann
Marco C Schletz

CARBONO CERO AMÉRICA LATINA

UNA VÍA PARA LA DESCARBONIZACIÓN NETA DE LA
ECONOMÍA REGIONAL PARA MEDIADOS DE ESTE SIGLO

DOCUMENTO DE VISIÓN

AUTORES:

Walter Vergara

Joergen V Fenhann

Marco C Schletz

ABRIL 2016

Carbono Cero América Latina

Una Vía para la Descarbonización Neta de la Economía Regional
para Medios de este Siglo
Documento de visión

Walter Vergara, Joergen V Fenhann, Marco C Schletz

UNEP DTU PARTNERSHIP

Abril 2016

Esta publicación puede ser reproducida total o parcialmente en cualquier formato con fines educativos o no lucrativos sin autorización especial del titular de los derechos de autor, a condición de que se cite adecuadamente la fuente. La UNEP DTU Partnership agradecerá se le envíe un ejemplar de cualquier publicación que utilice como fuente la presente publicación. No se permite la reventa de esta publicación ni ninguna otra acción con fines comerciales sin la autorización previa por escrito de la UNEP DTU Partnership.

Exención de responsabilidad

Las denominaciones empleadas y la presentación del material en esta publicación no implican la expresión de opinión alguna por parte de la UNEP DTU Partnership acerca de la condición jurídica de ningún país, territorio, ciudad o área o de sus autoridades, ni respecto a la delimitación de sus fronteras o límites. Por otra parte, los puntos de vista expresados no representan necesariamente la decisión o las políticas de la UNEP DTU Partnership, ni la mención de marcas registradas o procedimientos comerciales constituye un aval de los mismos.

Créditos fotográficos

Action Network (portada); Carl Berger (página 6);
Carla Wosniak (página ix); CIFOR (página xvi, 44, 74 y portada);
Danielle Pereira (página 15), kris krüg (página 60); Lang (portada);
Stefan Schmidt (página 65); mariordo59 (página 24);
Oscar Amaya (portada); spinster cardigan (página 66);
The Danish Wind Industry Association (página 41)

Diseño gráfico y edición: Kowsky, nicoline@kowsky.dk

ÍNDICE GENERAL

Índice de Figuras	v
Índice de Tablas	vi
Abreviaturas	vii
Agradecimientos	ix
Prefacio	x
Resumen	xii
1 ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN	1
1.1 <i>Antecedentes</i>	1
1.2 <i>Justificación</i>	2
1.3 <i>Fuentes de datos</i>	5
2 DESCARBONIZACIÓN DE LA GENERACIÓN ELÉCTRICA	7
2.1 <i>Situación actual</i>	7
2.2 <i>Dotación de recursos</i>	9
2.3 <i>El tamaño del mercado de las energías renovables está aumentando</i>	12
2.4 <i>Evolución de los marcos regulatorios</i>	14
2.5 <i>Objetivos de energía renovable</i>	14
2.6 <i>Modernización e integración de la red</i>	16
2.7 <i>Energía distribuida</i>	17
2.8 <i>Los embalses hidroeléctricos regionales como una instalación de almacenamiento de energía</i>	18
2.9 <i>La economía de la generación de energía renovable</i>	19
3 ELECTRIFICACIÓN MASIVA DEL SECTOR DEL TRANSPORTE	25
3.1 <i>Situación actual</i>	25
3.2 <i>Caracterización del segmento de carreteras del sector del transporte</i>	27
3.3 <i>Impacto de las operaciones de transporte en la calidad del aire</i>	35
3.4 <i>Electrificación masiva del transporte</i>	37
3.5 <i>Costo nivelado del transporte eléctrico</i>	38
4 USO DE LA TIERRA: CONVERSION DE FUENTE A SUMIDERO DE CARBONO	45
4.1 <i>Situación actual</i>	45
4.2 <i>Deforestación evitada</i>	46
4.3 <i>La reforestación y la restauración de la tierra</i>	49
4.4 <i>Beneficios económicos de las actividades de reforestación y restauración</i>	52
4.5 <i>La agricultura de bajas emisiones de carbono</i>	54
4.6 <i>Resumen de las posibles medidas en el uso de la tierra</i>	58
5 DESCARBONIZACIÓN DE LA INDUSTRIA	61
5.1 <i>Situación actual</i>	61
5.2 <i>Análisis de ruta para evaluar posibles reducciones de las emisiones generadas por la industria</i>	62

6	UNA RUTA A CERO EMISIONES DE CARBONO	67
6.1	<i>La ruta a la descarbonización del sector eléctrico</i>	67
6.2	<i>La ruta a la electrificación del sector del transporte</i>	69
6.3	<i>Conversion del uso de la tierra y cambio de uso de la tierra de fuente a sumidero de carbono</i>	71
6.4	<i>Descarbonización de la industria</i>	72
6.5	<i>Tasa de descarbonización proyectada</i>	72
7	CONCLUSIONES	75
	REFERENCIAS	78
	ANEXOS	88
Anexo I	<i>Descripción de los escenarios ELB (GEA-ELB) y GEA-Mix de IIASA</i>	89
Anexo II	<i>Plantas hidroeléctricas en América Latina</i>	91
Anexo III	<i>Descripción del Modelo GACMO</i>	92
Anexo IV	<i>Supuestos empleados en la estimación de los costos de transporte</i>	93
Anexo V	<i>Estimación del abatimiento de emisiones de N₂O y CH₄ a partir de la agricultura con Gestión de nutrientes</i>	95
Anexo VI	<i>Análisis de ruta de la industria</i>	96
Anexo VII	<i>Comparación de los escenarios ELB, GEA MIX y la ruta de cero carbono</i>	97

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Posible relación entre las emisiones acumulativas de CO ₂ y el cambio de la temperatura en relación al periodo 1861-1880.....	1
Figura 1.2	Presupuesto de carbono disponible para permanecer dentro de una anomalía de temperatura de 2 °C.....	2
Figura 1.3	Emisiones per cápita en diferentes regiones y países grandes.....	3
Figura 2.1	Demanda de electricidad proyectada bajo los escenarios ELB de IIASA y GEA-Mix.....	7
Figura 2.2	Emisiones históricas y proyectadas de GEI del sector eléctrico.....	8
Figura 2.3	Evolución histórica de la generación total de energía por fuente desde 1971 hasta el 2014 (en PWh/año).....	10
Figura 2.4	Dotación de recursos estimada de fuentes renovables en América Latina.....	10
Figura 2.5	Evolución reciente de los costos de generación por instalaciones de energía renovable de acuerdo con la base de datos de energía renovable de IRENA (en dólares/kWh).....	20
Figura 2.6	Comparación de los costos de generación nivelados (CNE) estimados a través de energías renovables en ALC con gas natural.....	21
Figura 2.7	Curvas de aprendizaje estimadas para energías renovables expresadas en CNE proyectados.....	22
Figura 3.1	Uso de energía proyectado en el sector de transporte.....	25
Figura 3.2	Emisiones históricas y proyectadas (ELB) del sector de transporte.....	26
Figura 3.3	Emisiones de CO ₂ del sector de transporte en ALC en 2010 (en MtCO ₂ e).....	26
Figura 3.4	Participación modal del transporte (en viajes de pasajeros) en áreas urbanas.....	28
Figura 3.5	Evolución de tasas de motorización en la región (vehículos por 1000 habitantes).....	29
Figura 3.6	Millas totales recorridas por los vehículos en los Estados Unidos bajo escenarios de crecimiento futuro de viajes, 1946-2040.....	30
Figura 3.7	Composición modal de transporte de carga en países selectos de América Latina y El Caribe.....	32
Figura 3.8	Crecimiento del transporte ferroviario en la región.....	33
Figura 3.9	Tipo de combustibles en el sector de transporte en América Latina y el Caribe en 2013.....	34
Figura 3.10	Evolución y costos proyectados de las baterías de iones de litio.....	36
Figura 3.11	Costo nivelado actual (2012) de las opciones de transporte alternativo.....	39
Figura 3.12	Curvas de aprendizaje proyectadas para opciones de vehículos eléctricos.....	39
Figura 3.13	Curvas de aprendizaje proyectadas para opciones de vehículos eléctricos con crédito por el costo evitado de la contaminación del aire.....	40
Figura 3.14	Demanda de energía estimada por un sector de transporte electrificado.....	40
Figura 3.15	Ahorros de energía a partir de la electrificación completa del transporte.....	42
Figura 4.1	Datos históricos y proyección de IIASA sobre emisiones de GEI asociadas al uso de la tierra, cambios en el uso de la tierra y agricultura.....	46
Figura 4.2	Deforestación histórica en la región del Amazonas de Brasil.....	48
Figura 4.3	Emisiones de gases de efecto invernadero estimadas en el 2012 provenientes de agricultura/silvicultura (en GtCO ₂ e/año).....	55
Figura 5.1	Uso de energía proyectado por actividades industriales.....	61
Figura 5.2	Emisiones de actividades industriales históricas y proyectadas.....	62
Figura 6.1	Descarbonización del sector energético.....	68
Figura 6.2	Descarbonización del Sector de Transporte.....	68

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1	Composición y evolución reciente de la huella de carbono en América Latina y el Caribe.....	4
Tabla 2.1	Intensidad de carbono de los sectores eléctricos.....	8
Tabla 2.2	Adiciones recientes de energías renovables no hidroeléctricas en países selectos (en GW).....	9
Tabla 2.3	Irradiación solar en áreas selectas.....	11
Tabla 2.4	Resumen de las políticas de energía renovable en Latinoamérica.....	13
Tabla 2.5	Estado actual y objetivos establecidos para la incorporación de fuentes renovables para generación de electricidad	16
Tabla 2.6	Lista de proyectos de interconexión a red eléctrica a mediados de 2015.....	17
Tabla 3.1	Tamaño y emisiones estimados de la flota de vehículos de transporte terrestre nacionales en América Latina.....	27
Tabla 3.2	Tasas de motorización en ciudades selectas en la región (automóviles por habitante).....	31
Tabla 3.3	Rentabilidad de distintos medios de transporte masivo en áreas urbanas (ejemplo de Bogotá).....	31
Tabla 3.4	Transformación prospectiva del transporte de carga.....	36
Tabla 4.1	Panorama de la deforestación en la región (en Mha).....	47
Tabla 4.2	Estimaciones del costo de evitar la deforestación.....	49
Tabla 4.3	Oportunidades de restauración en América Latina y el Caribe.....	49
Tabla 4.4	Sumideros de carbono en bosques tropicales (región del Amazonas) en América Latina	51
Tabla 4.5	Algunas tasas netas de almacenamiento de carbono en sistemas de restauración de tierras (en tC/ha-año).....	53
Tabla 4.6	Opciones que han sido propuestas para alcanzar reducciones netas de emisiones de GEI de la agricultura a través de la gestión de nutrientes.....	57
Tabla 4.7	Algunos esquemas para la disminución del metano asociado al ganado bovino en Argentina	57
Tabla 4.8	Tasas de almacenamiento/disminución de carbono potenciales a través de la reforestación y la restauración y de esfuerzos de agricultura sustentable	58
Tabla 4.9	Resumen del potencial económico para el cambio en el uso de la tierra y medidas de disminución de GEI en América Latina.....	59
Tabla 5.1	Resultados del análisis para estimar las reducciones de gases de efecto invernadero en la industria	63
Tabla 5.2	Potencial de ahorro de energía en la industria.....	64
Tabla 6.1	Ruta de descarbonización proyectada para el sector energético	67
Tabla 6.2	Ruta de descarbonización proyectada para el sector del transporte.....	69
Tabla 6.3	Sinergias entre las tecnologías que apoyan la energía y el transporte con bajas emisiones de carbono	70
Tabla 6.4	Ruta proyectada de disminución/sumidero de carbono del uso de la tierra previsto y cambio del uso de la tierra para América Latina y el Caribe en referencia a IIASA-ELC	70
Tabla 6.5	Emisiones de gases de efecto invernadero bajo ELB y ruta de descarbonización proyectada en 2050	72
Tabla 7.1	Resumen de las medidas examinadas como parte de la ruta a cero neto de carbono en América Latina...	76
Tabla 0.1	Lista de plantas hidroeléctricas en América Latina y el Caribe con una capacidad > 1000MW/1GW	91
Tabla 0.2	Costos proyectados de vehículos.....	93
Tabla 0.3	Costos proyectados de electricidad con objeto de estimar los costos operacionales de vehículos eléctricos.	93
Tabla 0.4	Estimación de los costos evitados de contaminación del aire a través de la operación de vehículos eléctricos que desplazan a vehículos de gasolina y diésel	94
Tabla 0.5	Estimación del abatimiento de emisiones de N ₂ O y CH ₄ a partir de la agricultura con manejo de nutrientes	95
Tabla 0.6	Comparación de los escenarios BAU, GEA MIX y la ruta de cero carbono	97

ABREVIATURAS

ALC	América Latina y el Caribe, México	MDCGEI	Modelo de disminución de costos de gases de efecto invernadero
ASOUT	Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra	mn	Millones
C	Carbono	MP	Materia particulada
cm	Centímetro	MW	Megawatt
CMNUCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático	MWh	Megawatt hora
CNEG	Costos nivelados de energía eléctrica generada	NCER	Normas de cartera de energías renovables
CO	Monóxido de carbono	N₂O	Óxido nitroso
CO₂	Dióxido de carbono	NOx	Óxidos de nitrógeno
CO₂e	Equivalente de dióxido de carbono	ONU	Organización de las Naciones Unidas
COP 21	21ava Conferencia de las Partes, París 2015	PA	Producto agrícola
COV	Compuestos orgánicos volátiles	PFM	Productos forestales maderables
EE. UU.	Estados Unidos de América	PFNM	Productos forestales no maderables
ELB	Escenario de línea base	PIB	Producto interno bruto
ESC	Energía solar concentrada	ppm	Partes por millón
EJ	Exajoule	PPC	Paridad de Poder de Compra
ENSO	El Niño – Oscilación del Sur	PSA	Premiums de seguridad alimentaria
EyM	Establecimiento y mantenimiento	PWh	Petawatt hora
FLC	Fertilizantes de liberación controlada	s	Segundo
FV	Fotovoltaica	SAF	Sistema agroforestal
G7	Grupo de 7	SFV	Solar fotovoltaica
GtC	Gigatoneladas de carbono	t	Tonelada
GtCO₂e	Gigatoneladas de equivalentes de dióxido de carbono	tCO₂e	Toneladas de equivalente de dióxido de carbono
GW	Gigawatt	tpc	Toneladas por habitante
ha	hectárea	TR	Tarifas reguladas
IPCC	Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático	TW	Terawatt
kWh	Kilowatt hora	TWh	Terawatt hora
		UE	Unión Europea
		UTCUTS	Uso de la tierra, cambio en el uso de la tierra y silvicultura
		VNA	Valor neto actual
		Wh	Watt-hora
		WRI	World Resources institute

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer el apoyo y estímulo recibidos durante la preparación del análisis y la conclusión de este informe por parte del equipo UNEP DTU en Copenhague, encabezado por su Director John Christensen, la Directora de Programa Miriam Hinojosa, y la Asesora Especial en Comunicaciones y Divulgación Mette Annelie Rasmussen. Agradecemos también a Lester Brown, John C. Topping Jr., Matthew Roney, Ha-

rald Diaz-Bone, Kaisa Karttunen, Luis Miguel Galindo, Jose Luis Samaniego, Maria Franco y Daniel Bouille por haber revisado una versión previa de este manuscrito. Nuestro especial agradecimiento a Keywan Riahi y Oliver Fricko del IIASA y Johannes Friedrich y Mengpin Ge del WRI por su ayuda con la información y el acceso a las bases de datos del IIASA y CAIT.



PREFACIO

En su Quinto Informe de Evaluación, publicado el año pasado, el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) estimó la cantidad adicional de dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero que podría ser liberada a la atmósfera manteniendo el aumento de la temperatura de la tierra por debajo del límite de 2 °C acordado políticamente. Este es el denominado presupuesto de emisiones de dióxido de carbono. El IPCC también determinó que de acuerdo con este presupuesto de emisiones se requiere alcanzar la neutralidad de carbono en algún momento entre 2055 y 2070, un término conocido como descarbonización neta.

Este documento de visión evalúa las perspectivas de descarbonización neta en la región de América Latina y el Caribe. Presenta un conjunto de escenarios con medidas que sería necesario adoptar en materia de energía, transporte, uso de la tierra e industria, y al mismo tiempo examina las combinaciones de políticas, desarrollo tecnológico y condiciones económicas que tendrían como resultado cero emisiones netas de dióxido de carbono en la región para mediados de este siglo.

América Latina constituye una opción interesante para este análisis debido a que muchos de los países de la región están cada vez más comprometidos en cuestiones de política climática y energética. Algunas de las medidas presentadas en este estudio están de hecho incluidas en procesos que se llevan a cabo actualmente en la región: la capacidad operativa de energías renovables no hidráulicas ha aumentado considerablemente en los últimos años, respaldada por una gran dotación de recursos renovables y un entorno político cada vez más favorable. Otras acciones propuestas podrían aprovechar las innovaciones tecnológicas que ya están siendo utilizadas en regiones industrializadas. Un ejemplo de esto es el desarrollo de nuevas opciones de transporte eléctrico que —proyectado hacia el futuro— reducirían considerablemente e incluso eliminarían probablemente la demanda de combustibles fósiles en el sector.

Muchos de los cambios propuestos dependerán de una firme voluntad política; por ejemplo, la integración de las redes de suministro y el desarrollo de sistemas de energía distribuida, ambos contrarios a algunos intereses sólidamente establecidos. En el área de cambio de

uso de la tierra, el informe destaca una serie de oportunidades para la creación de sumideros de carbono considerables que permitirán compensar otras zonas donde la reducción de gases de efecto invernadero no podrá ser llevada a cabo para mediados de este siglo.

Las medidas señaladas no serán fáciles de alcanzar. Se requerirán cambios políticos sustanciales y, en muchos casos, también cambios comportamentales significativos. Sin embargo, el informe presenta evidencias de que una transición a cero emisiones de carbono es técnicamente posible y sugiere que si se implementan estas medidas de manera coordinada, estas proporcionarían ventajas económicas significativas y otros beneficios asociados.

En última instancia, la posibilidad de transición hacia una economía regional de cero emisiones de carbono en América Latina debe ser evaluada no solo en términos del impacto climático, sino también en función de si la ruta hacia cero emisiones de carbono facilitará a los países alcanzar los objetivos de desarrollo sostenible y obtener beneficios en términos de seguridad energética y alimentaria, integración regional, reducción de la contaminación del aire, mejoras en la calidad de vida, creación de puestos de trabajo y flujos de capital.

En definitiva, el éxito de esta visión se medirá por la capacidad de sus postulantes para promover un diálogo sobre las ventajas de un futuro de cero emisiones de carbono para la región y las condiciones que permitan que esos cambios sucedan.



Achim Steiner
Director Ejecutivo, PNUMA
Noviembre de 2015

PRÓLOGO

Hemos llegado a un punto en el que se requiere un debate serio, a nivel regional, sobre la posibilidad y las consecuencias de los esfuerzos para eliminar la huella de carbono de nuestra economía, para descarbonizar nuestras sociedades. Damos la bienvenida a este informe en el que se concluye que existe un camino hacia cero emisiones de dióxido de carbono para la región, siendo este “más bien una oportunidad y no una carga”. Esto se traduce en muy buenas noticias: es decir, los países que se sumen a la estrategia de cero emisiones de carbono y la utilicen como plataforma para el desarrollo podrán obtener beneficios substanciales.

Costa Rica, al igual que otros países de la región, ya se está moviendo en esta dirección. Recientemente hemos presentado una Contribución Prevista y Determinada a Nivel Nacional (INDC, por sus siglas en inglés) ambiciosa que establece nuestros objetivos a largo plazo hacia la Neutralidad de Carbono. Creemos que esa dirección no solo beneficiará a nuestro futuro común, sino que también aportará beneficios en materia de seguridad ali-

mentaria y energética, mejoras en términos de comercio y reducción de la exposición a contaminantes nocivos. Además nos proporcionará medios para lograr más fácilmente las metas de desarrollo sostenible aprobadas recientemente por las Naciones Unidas.

Sabemos que este no es un camino fácil, en particular debido a que será necesario enfrentarse a políticas obsoletas, obstáculos financieros y comportamientos inadecuados; no obstante, esta es la ruta que necesitamos seguir. Esperamos que este documento promueva una sana discusión en torno a los conceptos expuestos y, lo que es aún más importante, genere una acción climática ambiciosa en las próximas décadas por parte de todos los países del mundo, grandes y pequeños, desarrollados y en desarrollo.

Dr. Edgar Gutiérrez Espeleta
Ministro de Ambiente y Energía
COSTA RICA

RESUMEN

El objetivo del análisis presentado en este informe es identificar una vía para la descarbonización completa de la economía regional de América Latina y el Caribe (ALC) para mediados de este siglo. Esto se logra a través de una revisión de acciones sectoriales específicas dentro de un contexto tecnológico y económico previsible. El análisis se lleva a cabo en un momento de considerable discusión del problema del cambio climático a nivel mundial y después de una década de notable progreso socioeconómico a nivel regional. En el informe también se discuten las principales barreras que tienen que ser tratadas.

La descarbonización completa de las actividades económicas es cada vez más importante, ahora que las consecuencias del cambio climático se han vuelto más claras y la posibilidad de superar el peligroso umbral de los dos grados de calentamiento parece más probable. Pero ¿por qué debería llevarse a cabo la rápida reducción de las emisiones de carbono en América Latina? ¿Y por qué lograr cero emisiones de carbono debería ser el objetivo?

En conjunto, ALC está probablemente más cerca de reducir a cero las emisiones de carbono que muchas otras regiones del mundo. En 2012 esta región generó alrededor del 10% de las emisiones globales (4,6 GtCO₂e), lo cual se traduce en 7,7 tCO₂e per cápita (CAIT, 2015). La generación de energía en ALC está ya en gran medida impulsada por energías renovables, una razón clave detrás de su bajo índice de intensidad de carbono (0,21 tCO₂e/MWh) (Brander et al., 2011). En segundo lugar, el sector del transporte, a pesar de las rápidas tasas de motorización y urbanización, sigue teniendo bajos niveles de intensidad de carbono, con áreas urbanas que superan incluso a sus contrapartes en el norte de Europa en cuanto a porcentaje de desplazamiento de pasajeros en transporte público.

Aún más relevante, sin embargo, es la relación entre las emisiones de carbono y la degradación del suelo. Las mejoras recientes en el índice de intensidad de carbono de las actividades económicas, en forma de una reducción del 22% por unidad de PIB a Paridad de Poder Adquisitivo entre los años 2000 y 2012 (CAIT, 2015), pueden, en gran medida, atribuirse a una disminución en la tasa de deforestación. En este contexto, la defores-

tación evitada, los vigorosos esfuerzos de reforestación y restauración, así como la adopción de prácticas sostenibles en la agricultura, tienen un gran potencial para cambiar el panorama de emisiones de gases de efecto invernadero en ALC. Por último, la actividad industrial tiene un potencial inexplorado en cuanto a modernización y mejora de la eficiencia energética. Existen otros sectores que contribuyen a la huella de gases de efecto invernadero, pero los mencionados aquí representan más del 90% de todas las emisiones (CAIT, 2015).

Si bien no existen soluciones mágicas e infalibles para una reducción mayor de las emisiones, en este documento se revisará una serie de actividades sectoriales con alto potencial para contribuir a una economía regional de cero emisiones netas de carbono. Estas actividades incluyen: a) la descarbonización completa del sector eléctrico, b) la electrificación masiva del sector del transporte, c) cambios a gran escala en el uso de la tierra, incluyendo el logro de cero deforestación y la acumulación de estoques de carbono en la agricultura y la silvicultura, y d) la descarbonización de la industria. Las mejoras en la eficiencia del uso de energía se consideran parte integral de todas las actividades. En última instancia, estas transformaciones se llevarán a cabo siempre que exista un marco de políticas de apoyo y en función de los aspectos económicos de los cambios que se buscan.

Descarbonización del sector eléctrico. Existe la expectativa de que las perspectivas de políticas de apoyo, el panorama de modernización e integración de red, la dotación importante de recursos energéticos renovables, pero sobre todo la ventaja económica creciente y actual de las tecnologías solar y eólica, entre otras, proporcionarán una base suficiente sobre la cual pueda desarrollarse un escenario de completa descarbonización del sector eléctrico, de rápido crecimiento en la región. Las condiciones del mercado ya permiten que la nueva demanda sea satisfecha en gran medida a través de energías renovables. Estos recursos, en forma de una creciente gama de tecnologías, serán capaces de desplazar a plantas de combustibles fósiles con sólidos argumentos económicos, respaldadas por la gran capacidad de la energía hidroeléctrica en la región. Para el año 2025 se prevé que el desplazamiento de las fuentes de

combustibles fósiles reducirá los costos de generación de electricidad en alrededor de 1-3 centavos de dólar por kWh a través de CNEG inferiores, así como contribuirá a garantizar la seguridad energética y ayudará a la descarbonización de los otros sectores económicos. Para 2050 la descarbonización energética desplazaría 1,1 GtCO₂e/año en comparación con un escenario de línea base (ELB de IIASA) en 2050.

Si bien este análisis demuestra que existe un entorno normativo que ofrece cada vez más apoyo para la descarbonización, existen algunas acciones importantes que podrían facilitar la entrada rápida en el mercado de las energías renovables en ALC, incluyendo: a) una mayor voluntad política para incrementar el proceso de integración de redes en la región, prestando la debida atención a los problemas ambientales y sociales, b) la eliminación de los subsidios a los combustibles fósiles, en particular el carbón y el gas, los cuales constituyen un obstáculo importante para la entrada en el mercado de alternativas, y c) una mayor adopción de normas para permitir sistemas de energía distribuida, lo que podría acelerar la instalación de instalaciones solares domésticas y comerciales.

Electrificación masiva del sector del transporte.

Con base en las ganancias proyectadas en eficiencia y densidad de almacenamiento de energía en los vehículos, la caída estimada de los precios de la electricidad resultante de la incorporación masiva de las energías renovables y las proyecciones para una eventual reducción sustancial en el costo de los vehículos eléctricos, se prevé que esta opción incremente su competitividad y supere en competitividad económica a la alternativa con combustibles fósiles mucho antes de 2050. El informe hace eco a los recientes anuncios sobre el carácter potencialmente disruptivo de las tecnologías de vehículos eléctricos en el lapso de unos pocos años, aunque también hace hincapié en la adaptación necesaria para cumplir con las características de la demanda en la región, incluyendo el énfasis en los vehículos de transporte masivo. Si se hacen las asignaciones de los costos evitados de la contaminación del aire, el argumento económico para el cambio hacia la propulsión eléctrica se ve reforzado. El costo evitado relativamente grande permitirá a las versiones eléctricas ser competitivas con las opciones de combustibles fósiles para el año 2025. El cambio hacia la propulsión eléctrica en el sector también dará lugar por sí mismo a un ahorro muy significativo de energía (alrededor de 11 EJ para 2050; ver la Figura 3.15), a la creación potencial de segmen-

tos industriales enteros y a cambios importantes en la calidad del aire urbano y la integración económica. La descarbonización del transporte daría como resultado el desplazamiento de alrededor de 1,4 GtCO₂e por año en comparación con el escenario ELB en 2050.

La tecnología y el impulso económico de un cambio a la energía eléctrica en el transporte pueden provocar en última instancia una transformación importante de las tecnologías de transporte a nivel mundial. Sin embargo, en un plazo más corto y en el contexto de América Latina, este cambio enfrenta barreras importantes que necesitan ser abordadas. Estas incluyen: a) subsidios a los combustibles fósiles (calculados en alrededor de 1% del PIB en 2013), que continúan promoviendo su uso y retrasando la adopción de fuentes de energía alternativas en el transporte, b) la falta de internalización de los beneficios ambientales y de salud asociados con el reemplazo de diesel y otros combustibles, lo que retrasa la adopción de opciones más limpias, y c) el valor del capital y los empleos y empresas vinculadas con la refinación y distribución de combustibles fósiles, los cuales se verían desplazados por los vehículos eléctricos.

Transformación del uso de la tierra de una fuente a un sumidero de carbono.

El uso de la tierra es la clave para la descarbonización definitiva y duradera de la economía regional. En conjunto, evitar la deforestación y promover la reforestación, la restauración de la tierra y las prácticas sostenibles en la agricultura y la ganadería son prácticas fundamentales para garantizar la existencia de sumideros de carbono basados en el uso de la tierra. Evitar la deforestación (3,4 millones de hectáreas por año en 2013) proporcionaría una importante contribución potencial a un futuro de carbono cero. Con esfuerzos a gran escala en reforestación y restauración y medidas en la agricultura y ganadería, el total podría ser de hasta unos 3 GtCO₂e menos por año para mediados de este siglo. Después de dar cuenta de las emisiones restantes, el sector podría estar contribuyendo con sumideros netos del orden de 1,1 GtCO₂e por año para 2050. También se prevé que estos esfuerzos produzcan importantes beneficios económicos, incrementos en la seguridad alimentaria y mejoras en la calidad de vida en las zonas rurales.

Existen importantes barreras para asegurar la existencia de estos sumideros. La deforestación continúa irrestricta en muchas partes de la región, en donde las condiciones básicas de pobreza e incapacidad para internalizar el valor de los bosques no han cambiado. Los beneficios

en el suelo, el agua y la conservación de la biodiversidad por lo general no se consideran desde un punto de vista económico. Los proveedores aún tienen que garantizar por completo que las cadenas de suministro están libres de deforestación, mientras que la demanda de estos productos sigue aumentando en todo el mundo.

Descarbonización de la industria. En ALC este sector es heterogéneo y difícil de generalizar. Por lo tanto, las emisiones por subsectores y su potencial de reducción deben ser analizadas por separado. El potencial de reducción se ha calculado mediante un análisis de ruta. El análisis es un ejemplo de cómo los subsectores podrían descarbonizarse para el año 2050. La reducción acumulativa, si el límite superior de la rentabilidad por tCO_{2e} es de 30 dólares sería del orden de 0,11 GtCO_{2e} a un costo de alrededor de 2 mil millones de dólares. Esto equivale a 21,5% de las emisiones previstas para el sector para el año 2050 bajo el ELB de IIASA. La industria también puede desempeñar un papel en la descarbonización de la economía a través de la oferta de nuevos equipos y servicios. Para todos los sectores la falta de un mercado del carbono y/o de internalización de los costos de los impactos del cambio climático representa una barrera importante.

Valor agregado de una economía de carbono cero. Estas medidas tienen el potencial de impulsar a la región ALC hacia una economía de carbono cero, en gran medida sobre la base de fuertes argumentos económicos. Pero además, la descarbonización añadiría valor en términos de seguridad energética (a través del control de los recursos renovables nacionales e inagotables), seguridad alimentaria y calidad de vida (a través de la restauración de la tierra), mejoras en los términos del comercio (energía, alimentos), mejoras en la calidad del aire (a través de la electrificación del transporte), cooperación regional (en el caso de esfuerzos internacionales para asegurar una red integrada y medios de transporte) y acceso a los recursos financieros internacionales (otorgados a las inversiones de bajo carbono).

Una estrategia de carbono cero promovería el desarrollo de nuevos medios de producción y un mejor uso de los recursos naturales. Esto estimularía la creación de empresas y puestos de trabajo, atraería inversiones, se beneficiaría de las economías de escala y generaría mejoras en la calidad de vida. No solo implicaría un papel de liderazgo para la región en materia de clima.

Por lo tanto una dirección hacia niveles de carbono cero, respaldada por la disponibilidad de tecnologías y un cambio en la economía, representaría más bien una oportunidad y no una carga para el desarrollo económico y la integración regional y contribuiría sustancialmente al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible¹. Sin embargo, lograr esta meta de cero emisiones de carbono dependerá en última instancia de la capacidad de sobrepasar y hacer frente a las barreras sustanciales resultantes, a través del tiempo, de conductas y políticas que ahora requieren de cambio urgente. Aún así, desde todas las perspectivas, la región se encuentra en posición ventajosa para completar esta transición.

¹ Consulte la lista de Objetivos de Desarrollo Sustentable en <http://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/>

Emisiones de Gases de Efecto Invernadero bajo el escenario ELB y ruta para cero emisiones de carbono en 2050.

Categoría	2012 MtCO ₂ e	2050 GEA-ELB GtCO ₂ e	Ruta de des- carbonización para 2050 (GtCO ₂ e)	Impulsor
Total	4 623	5.3	-0,1	
Generación de energía eléctrica*	544	1,1	0	Las energías solar, eólica y geotérmica, competitivas actualmente, incrementan su margen con el tiempo; la integración a la red de distribución y la energía distribuida facilitan la transición.
Procesos industriales, fabricación y construcción	494	0,5	0,4	La industria/manufactura implementa medidas de ahorro de energía y de mejora tecnológica a un costo de 30 dólares/tCO ₂ e o menor.
Transporte**	665	1,4	0,2	Las tecnologías de vehículos eléctricos en rápida evolución y las políticas económicas y de calidad del aire contribuyen a la transformación, reemplazando gradualmente a las opciones de combustión interna.
Uso de suelo y silvicultura, agricultura y Residuos	2 574	1,9	-1,1***	Las iniciativas de cero deforestación y de reforestación se fomentan a través de incentivos fiscales y de políticas. Se implementan actividades de reforestación a nivel comercial. Se implementan medidas de NO ₂ and CH ₄ a un costo neto adicional.
Otros Sectores****	346	0,4	0,4	Las emisiones fugitivas y otros consumos de combustible se mantienen constantes conforme al escenario GEA-ELB

(*) En la base de datos de IIASA, la electricidad se combina con calefacción. Sin embargo, en ALC solamente existe un uso marginal de energía para generar calor fuera de la industria; (**) El transporte abarca el transporte nacional y el transporte marítimo internacional; (***) valor neto entre las emisiones previstas por uso de la tierra y cambio de uso de la tierra y sumideros netos de 3,0 GtCO₂e/año; (****) Emisiones fugitivas y combustiones de combustible adicionales. Fuente: datos de emisiones de 2012 (CAIT, 2015); los datos de GEA-ELB se calcularon de (IIASA, 2012; CAIT, 2015); en el texto principal se incluyen detalles adicionales.



1. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

El objetivo de este informe es visualizar una ruta que permitiría completar la descarbonización de la economía regional de América Latina y el Caribe (ALC) a mediados del presente siglo. Esto se logra a través de una revisión de acciones sectoriales específicas dentro de un contexto tecnológico y económico previsible, y de un examen de las sinergias entre las acciones en estos distintos sectores. El análisis se está llevando a cabo en un momento de un impulso considerable para abordar el desafío del clima a nivel mundial y tras una década de notables avances socioeconómicos a nivel regional. El informe también incluye comentarios sobre las principales barreras que deben abordarse.

1.1 ANTECEDENTES

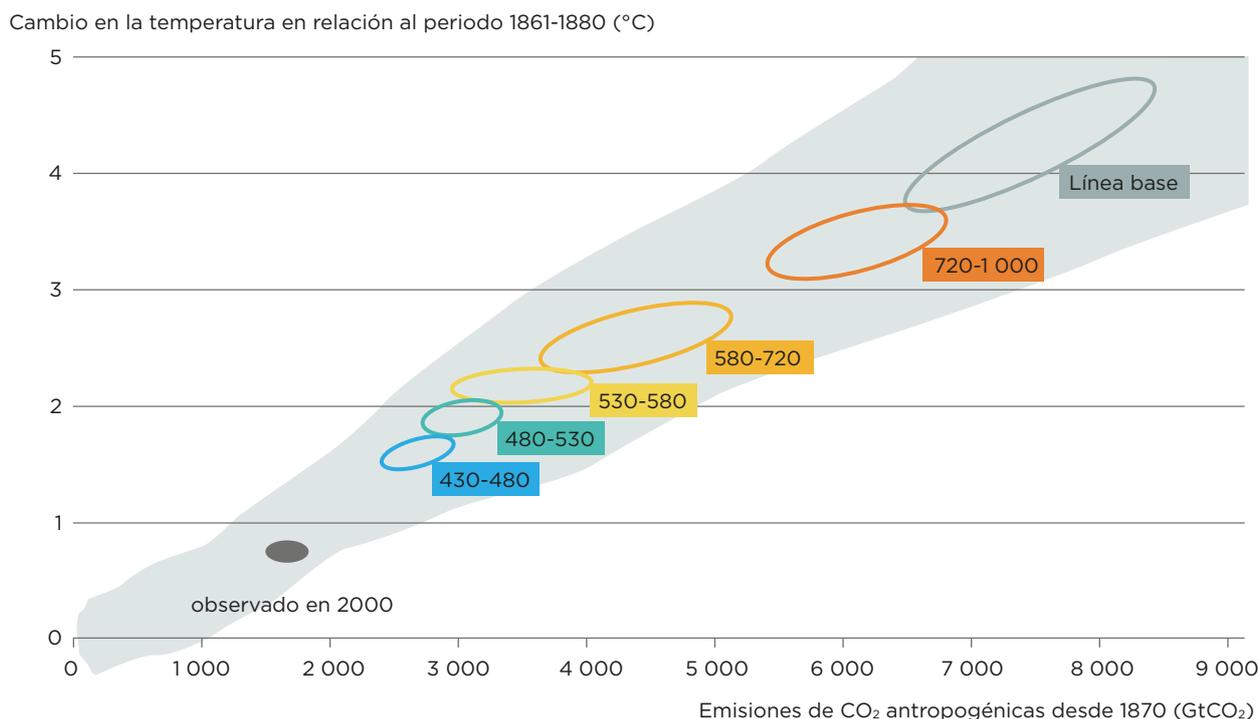
La concentración global de dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera ha aumentado de aproximadamente 280 partes por millón (ppm) a finales del siglo XVIII hasta más de 400 ppm de CO₂ en 2015 (NOAA, 2015). La concentración está aumentando a una tasa de alre-

dedor de 2 ppm por año y aún no muestra signos de disminución. El IPCC ha indicado que la concentración atmosférica de CO₂ de 450 ppm conlleva un aumento de 2 °C en la temperatura global, con respecto a los niveles preindustriales (Figura 1.1) y que ello no debería ser sobrepasado a fin de evitar consecuencias peligrosas del cambio climático a nivel mundial (IPCC, 2007; Schellhuber, 2009).

Sin embargo, parece que mantener el objetivo de 2 °C es cada vez más inalcanzable. Un análisis preliminar de los impactos de las intenciones propuestas por las partes de la CMNUCC indica que “las políticas actuales en el G7 y la UE se han proyectado exclusivamente para estabilizar las emisiones hasta el año 2030 casi en los niveles actuales, mientras que lo necesario es un rápido descenso en las emisiones” (Ecofys, 2015)².

² Climate Interactive (www.climateinteractive.org) ha considerado que las INDCs recibidas a finales de 2015 aún llevarían a una anomalía de 3.5 °C. Climate Action Tracker (www.climateactiontracker.org) ha emitido en paralelo una anomalía estimada de 2.7 °C.

Figura 1.1 - Posible relación entre las emisiones acumulativas de CO₂ y el cambio de la temperatura en relación al periodo 1861-1880.



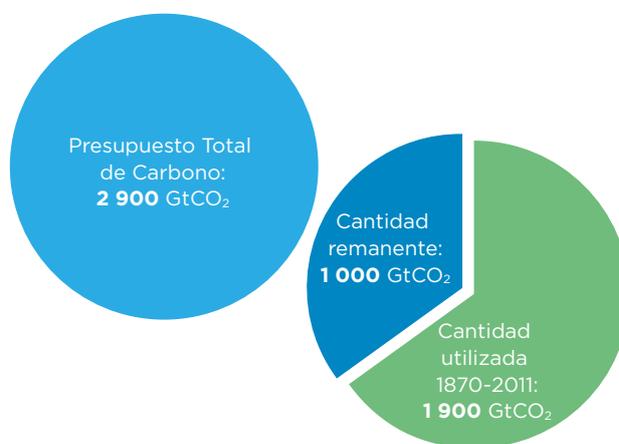
La cantidad permisible restante de carbono que puede ingresar a la atmósfera en consonancia con la concentración de 450 ppm está disminuyendo rápidamente (Figura 1.2). De acuerdo con el Resumen para los Tomadores de Decisiones del IPCC, o IPCC SPM (2013), las emisiones adicionales que podrían ingresar en la atmósfera antes de que se exceda el umbral de 2 °C serían de unas 2 900 giga-toneladas de dióxido de carbono (GtCO₂), que con tasa de emisiones actual se alcanzarán en 2040 (Teske et al., 2015). A partir de entonces, se requeriría la descarbonización total de la economía mundial. La estabilización del aumento de la temperatura a no más de 2 °C exige esfuerzos inmediatos considerables a nivel mundial para reducir las emisiones, que harían necesarios cambios importantes en el comportamiento y el uso de los recursos.

Sin embargo, incluso si se alcanzara un aumento de temperatura menor de 2 °C por encima de los niveles preindustriales, se observarían impactos climáticos con importantes consecuencias ecológicas y económicas. Para la región de América Latina y el Caribe, un calentamiento de esta magnitud inducirá cambios importantes, en gran parte debido a su considerable pero intrínsecamente frágil capital natural y a su infraestructura vulnerable.

Un recuento (Vergara et al., 2013b) de los impactos inminentes en la región, incluso si se mantiene el umbral de 2 °C, incluye la desestabilización del bioma de coral en el Caribe; la desaparición de los glaciares tropicales por debajo de los 5000 m; la pérdida de infraestructura, los asentamientos costeros y los ecosistemas costeros causada por un aumento de 1 m en el nivel del mar; las reducciones en rendimientos agrícolas como resultado del aumento de las temperaturas del suelo y la menor humedad del suelo; la pérdida de la cubierta forestal; y los impactos sobre la salud, la generación de energía hidroeléctrica y otros servicios ecosistémicos. Las consecuencias económicas estimadas de algunos de estos efectos se elevarían a unos 100 mil millones de dólares por año en 2050.

El análisis de una ruta de descarbonización neta en ALC se ha realizado en el contexto de lo que ha sido un notable desempeño de las economías de la región durante los últimos diez años aproximadamente. Esta recuperación se ha caracterizado por: 1) la disminución de la desigualdad económica en muchos países de América Latina y el Caribe (la pobreza moderada disminuyó de

Figura 1.2 - Presupuesto de carbono disponible para permanecer dentro de una anomalía de temperatura de 2 °C.



Fuente: (IPCC SPM 2013)

más del 40% en el año 2000 a menos del 30% en 2010³); 2) el aumento de movilidad social inter-generacional (se estima que al menos el 40% de los hogares de la región han ascendido en la escala socioeconómica entre 1995 y 2010); 3) las reducciones drásticas en el crecimiento de la población (del 2% al año en 1990 a alrededor del 1,1% en 2013 (World Bank, 2014a)); y 4) un aumento sostenido en el consumo (que se refleja parcialmente en una saludable tasa de crecimiento del PIB del 3% o más durante la última década (World Bank, 2014a).

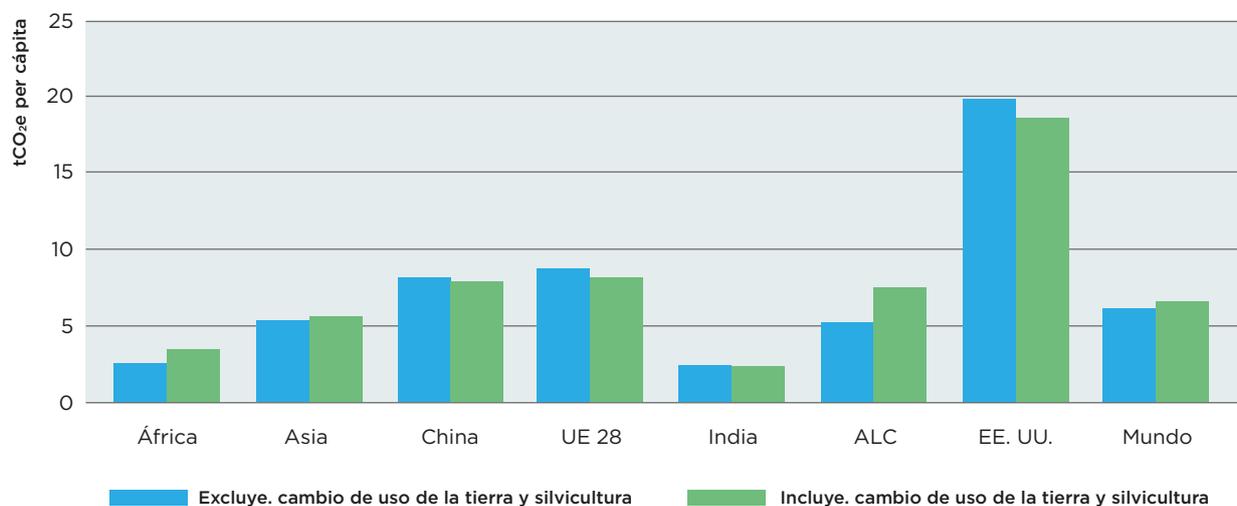
1.2 JUSTIFICACIÓN

Dados los daños —ecológicos, sociales y económicos— previstos para ALC debido al cambio climático y las perspectivas de crecimiento continuo de los indicadores socioeconómicos, es pertinente preguntarse ¿qué contribución puede aportar la región para lograr una descarbonización rápida a nivel mundial y qué beneficios pueden derivarse de ella? ¿Es factible focalizar un escenario de cero emisiones de carbono en ALC? ¿Puede hacerse esto en apoyo de los objetivos de desarrollo sostenible de la región? Este informe examina esta ruta alternativa y analiza si puede apoyar las perspectivas de desarrollo sostenible de la región.

La primera consideración es que ALC es un emisor modesto de GEI, que en 2012 solo contribuyó con alrededor

³ Esta disminución implica que cincuenta millones de latinoamericanos salieron de la pobreza durante la década (Ferreira et al., 2012).

Figura 1.3 - Emisiones per cápita en diferentes regiones y países grandes.



Fuente: (CAIT, 2015)

del 10% de las emisiones mundiales (4,6 GtCO₂e), lo que se traduce en una emisión per cápita de 7,7 tCO₂e (CAIT, 2015). Las emisiones per cápita en ALC son inferiores a las de la UE, los EE. UU., China o Japón (Figura 1.3).

La generación de energía en ALC incluye ya una fracción sustancial de energías renovables. En 2014, más del 48% de toda la electricidad generada se basó en la utilización de recursos renovables, principalmente energía hidroeléctrica (Enerdata, 2015). Aún más relevante, la base de recursos de la región, incluyendo las opciones hidroeléctricas, sería capaz de sostener un nivel mucho mayor de generación basada en energías renovables. Esto abre la posibilidad de reorientar la base de producción hacia la electricidad como una fuente de energía con bajo contenido de carbono.

En segundo término, la región está altamente urbanizada. Y en las zonas urbanas, la mayor parte de las personas se mueve en transporte público (es decir, con bajas emisiones de carbono por pasajero). Por lo tanto, la señal de carbono del transporte urbano per cápita es mucho menor que en las regiones industriales. Además, en los países con generación mayoritaria de energía hidroeléctrica, la demanda de combustibles para el transporte constituye la principal dependencia de combustibles fósiles. Si se electrifica el transporte, se desplazaría una importante demanda de combustibles fósiles. Por último, si bien la tasa de motorización está aumentando aceleradamente, sistemas de transporte inteligentes y adecuadamente planeados en términos de espacio (como los sistemas de Autobuses de Tránsito

Rápido) están siendo implementados rápidamente y ya han demostrado su rentabilidad y potencial.

En tercer lugar, aunque la energía y el transporte representan una gran proporción de la utilización de combustibles fósiles, en ALC el uso de la tierra y el cambio en el uso de la tierra son los sectores responsables de la mayoría de las emisiones de GEI (Tabla 1.1). Esto contrasta con la mayoría de las otras regiones del mundo, donde los combustibles fósiles son las principales fuentes de las emisiones de carbono. Si bien se está atendiendo la deforestación, esta sigue siendo una fuente importante de dichas emisiones. Detener la deforestación, reforestar y restaurar la tierra son acciones que ofrecen la posibilidad de reducir significativamente las emisiones y constituir considerables sumideros de carbono.

Cabe señalar que el proceso de descarbonización ha comenzado. Decisiones políticas valientes y en ocasiones audaces han colocado a algunas naciones en una ruta hacia emisiones muy bajas de carbono. Algunas de estas decisiones se han expresado en forma de objetivos para la adopción de energías renovables, objetivos para reducir o eliminar la deforestación, ambiciones para la restauración de tierras, metas de eficiencia energética u otras expresiones de voluntad política.

Se están comenzando a notar los resultados. Durante el período 2000-2012, la intensidad de emisiones de carbono de la región, medidas en tCO₂e por millón de dólares americanos de PIB con paridad de poder adquisitivo disminuyó en aproximadamente un 21,5% (CAIT,

Tabla 1.1 – Composición y evolución reciente de la huella de carbono en América Latina y el Caribe.

Categoría	2000 [MtCO ₂ e]	2012 [MtCO ₂ e]	Cambio [%]	Impulsor
Total	4 104	4 623	13	
Generación de energía eléctrica^a	378	544	44	Carbonización de la generación de energía, crecimiento económico
Procesos industriales	86	135	57	Industrialización, crecimiento económico
Manufactura y construcción	297	359	21	Crecimiento económico
Transporte^b	447	665	49	Motorización, urbanización
Agricultura	764	901	18	Crecimiento poblacional, alimento global y demanda de fibras
Uso de la tierra y silvicultura	1 647	1 431	-13	Reducción en la deforestación, mejor manejo de la tierra, expansión de prácticas sin labranza
Residuos	175	241	38	Crecimiento poblacional, cambios en los hábitos de los consumidores
Otros^c	309	346	12	

Fuente: (CAIT, 2015) y cálculos de los autores.

^a En la base de datos de IIASA, la electricidad se combina con la categoría de calefacción. Sin embargo, en América Latina y el Caribe solamente hay un uso marginal de energía para calefacción fuera de la industria.

^b El transporte abarca el transporte nacional y el transporte marítimo internacional.

^c Incluye otras emisiones fugitivas y de combustión de combustible. Estas fuentes (que suman alrededor del 8% del total) no son revisadas en este reporte.

2015). La mayor parte de la reducción puede vincularse a importantes caídas en las tasas de deforestación, especialmente en Brasil. Las mejoras en la eficiencia energética son otro factor que también ha contribuido en este sentido. Esto no quiere decir que la descarbonización bajo las condiciones de línea base está garantizada. Por el contrario, es probable que muchos de los motores de actividad económica sigan contribuyendo a un futuro de mayores niveles de emisión de carbono, como puede verse en el resumen que se presenta en la Tabla 1.1.

Lo que es más importante, a corto plazo, es que las tecnologías de baja emisión de carbono están, siendo favorecidas por un rápido ritmo de innovación. Esto es evidente en las mejoras en la competitividad de las fuentes renovables de energía; la nueva apreciación de las ventajas de una red integrada inteligente y de los avances en la energía distribuida; las reducciones en los costos del almacenamiento de energía y los vehículos eléctricos; las mejoras en la restauración de los suelos y las técnicas de reforestación natural asistida; y las innovaciones en la agricultura y los procesos industriales.

La descarbonización de la economía regional de América Latina aportaría valor agregado en términos de seguridad energética (mediante el control de sus inagotables recursos renovables propios), seguridad alimentaria (a través de la restauración de tierras), mejoras de carácter comercial (energía, alimentos, forraje), cooperación regional (en el contexto de empresas que garanticen una red integrada y medios de transporte) y acceso a recursos financieros internacionales (otorgados para proyectos de bajas emisiones de carbono). La descarbonización no solamente reflejaría un liderazgo en cambio climático.

Cuando ocurra, la descarbonización neta se logrará en el contexto de beneficios económicos para la región, y siempre y cuando pueda satisfacer la creciente demanda por servicios y productos de calidad que sean financieramente atractivos. Una estrategia de cero emisiones de carbono debe apoyar la implementación de nuevos medios de producción y el mejor uso de los recursos naturales. Debe crear trabajo y empresas, atraer inversiones, aprovechar las economías de escala y apoyar mejoras en la calidad de vida. Por lo tanto, un cambio orientado hacia cero emisiones de carbono, con un res-

paldo creciente de la disponibilidad de tecnologías y reorientando los aspectos económicos, representaría más una oportunidad que un obstáculo para el desarrollo económico y la integración regional.

Además, una ruta de cero emisiones de carbono para la región estaría en consonancia con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU (ONU-ODS), no solo en el contexto del cambio climático, sino también en los ámbitos de la energía, las ciudades y el uso de la tierra, apoyando el acceso a, y el uso racional de, los recursos y productos. Sería un catalizador para lograr mejoras en la calidad de vida mediante la explotación de sus recursos naturales renovables de una manera que sea coherente con el desarrollo sostenible.

En general, sería mucho más benéfico (y menos costoso) adoptar un enfoque de cero emisiones de carbono ahora, haciendo uso de las condiciones técnicas y económicas cada vez más favorables, en vez de postergarlo, cuando los cambios necesarios puedan requerir acciones más drásticas, al tiempo que el marco de políticas evoluciona.

Finalmente, debe considerarse que las reducciones en las emisiones de CO₂ en la atmósfera tendrán una influencia cada vez menor sobre el clima conforme la concentración de este gas aumente. Esto significa que las reducciones drásticas de hoy tendrán un mayor impacto que si se logran las mismas reducciones en el futuro.

1.3 FUENTES DE DATOS

Es en este contexto actual y emergente que el informe examina el potencial para la descarbonización total neta en la región a través de actividades sectoriales específicas. Si bien el informe se centra en América Latina, utiliza como antecedentes y contexto las proyecciones mundiales y regionales del IIASA (ELB-IIASA). Las siguientes secciones evalúan una serie de acciones en los sectores económicos que son responsables de la mayor parte de la huella de carbono en la región. A partir de este análisis se elabora una ruta ilustrativa para alcanzar cero emisiones netas en la región a mediados del presente siglo.

El análisis se basa en la información existente en la literatura especializada. Los datos históricos para el análisis provinieron de una serie de fuentes referidas en el informe, con un énfasis particular en la base de datos de

emisiones mantenida por CAIT⁴. Los datos de energía se obtuvieron de ENERDATA⁵ y otras fuentes del sector. Los resultados del modelaje realizado por IIASA-GEA⁶ se utilizaron para establecer los escenarios de línea base (ELB), utilizando la información más reciente de CAIT como punto de partida. La base de datos de IIASA incluye uno de los conjuntos de datos más completo y coherente para América Latina. Se utilizó FAOSTAT⁷ para los datos históricos y proyecciones para el sector agrícola; también se consultaron las bases de datos de ONUDI, IRENA y REN21.

Los argumentos económicos para asumir la ruta de cero emisiones de carbono fueron examinados mediante diferentes métodos, dependiendo de la información disponible en la literatura. Se utilizaron los costos anualizados derivados de GACMO⁸ para estimar la competitividad relativa de la generación de energía y transporte en contraste con el escenario de línea base. Los datos disponibles sobre la viabilidad financiera se utilizaron para documentar el argumento económico para las actividades de restauración y reforestación, mientras que el costo neto de las medidas para abatir las emisiones se utilizó para priorizar los esfuerzos en la agricultura y la industria.

⁴ CAIT es el explorador de datos de clima mantenido por el World Resources Institute (<http://cait.wri.org/>).

⁵ ENERDATA es una empresa independiente de investigación y consultoría sobre los mercados globales de gasolina, gas, carbón, energía, fuentes renovables y carbono establecida en 1991 (<http://222.enerdata.net/>).

⁶ IIASA-GEA es una base de datos cuyo objetivo es documentar los resultados y premisas de las rutas de transformación de GEA (<http://www.iiasa.ac.at/web-apps/ene/geadb/dsd?Action=htmlpage&page=welcome>). Los escenarios utilizados incluyen el GEA-ELB (donde no se consideran medidas de intervención que afecten las tendencias actuales) y el GEA-MIX (una combinación moderada de medidas de intervención en varios sectores). Puede consultarse información adicional sobre las proyecciones y los escenarios utilizados en el Anexo I.

⁷ FAOSTAT es la base de datos estadística sobre agricultura y silvicultura mantenida por la FAO (<http://faostat3.fao.org/download/GI/GT/E>).

⁸ El modelo GACMO fue desarrollado por Joergen Fenhann, UNEP DTU Partnership, para realizar un análisis de las opciones de mitigación de GEI para un país o región que tiene que ser utilizado frecuentemente para desarrollar una estrategia de desarrollo de bajas emisiones de carbono o una Contribución Determinada y Prevista a Nivel Nacional. Una versión estándar de GACMO está disponible al público en <http://www.cdmpipeline.org/>.



I belong to
Carl & Sharon Berger

2. DESCARBONIZACIÓN DE LA GENERACIÓN ELÉCTRICA

Esta sección examina las condiciones bajo las cuales podría llevarse a cabo la descarbonización total del sector eléctrico a nivel regional. Si la generación de energía eléctrica se descarboniza, muchas actividades económicas que dependen de electricidad se transforman en actividades con bajas emisiones de carbono, y otras que actualmente utilizan combustibles fósiles podrían considerar un cambio hacia el uso de energía eléctrica como un mecanismo para reducir su contenido de carbono. Un sistema de generación eléctrica renovable también fortalecería la seguridad energética mediante el uso de recursos domésticos, que son, en términos prácticos, inagotables.

2.1 SITUACIÓN ACTUAL

La producción estimada de electricidad en América Latina en 2014 es de 5,8 EJ (1,6 PWh) aproximadamente, lo que representa un aumento de casi 60% desde el año 2000 (Enerdata, 2015)⁹ y refleja un marcado patrón de

crecimiento continuo. Las principales fuerzas motrices de esta vigorosa demanda incluyen una población en expansión, un fuerte incremento en el PIB en toda la región y las mejoras asociadas en los niveles de vida. Estas fuerzas motrices aún persisten y probablemente influyan en las futuras condiciones del mercado.

Utilizando la base de datos IIASA-GEA (IIASA, 2012), y permitiendo una gama de escenarios futuros entre la continuación de las tendencias actuales (GEA-ELB) y un escenario mixto (GEA-Mix)¹⁰, la demanda de electricidad proyectada para 2050 se encontraría en el rango de 12-14 EJ, aun después de considerar el aumento de la eficiencia (IIASA, 2012)¹¹ (Figura 2.1).

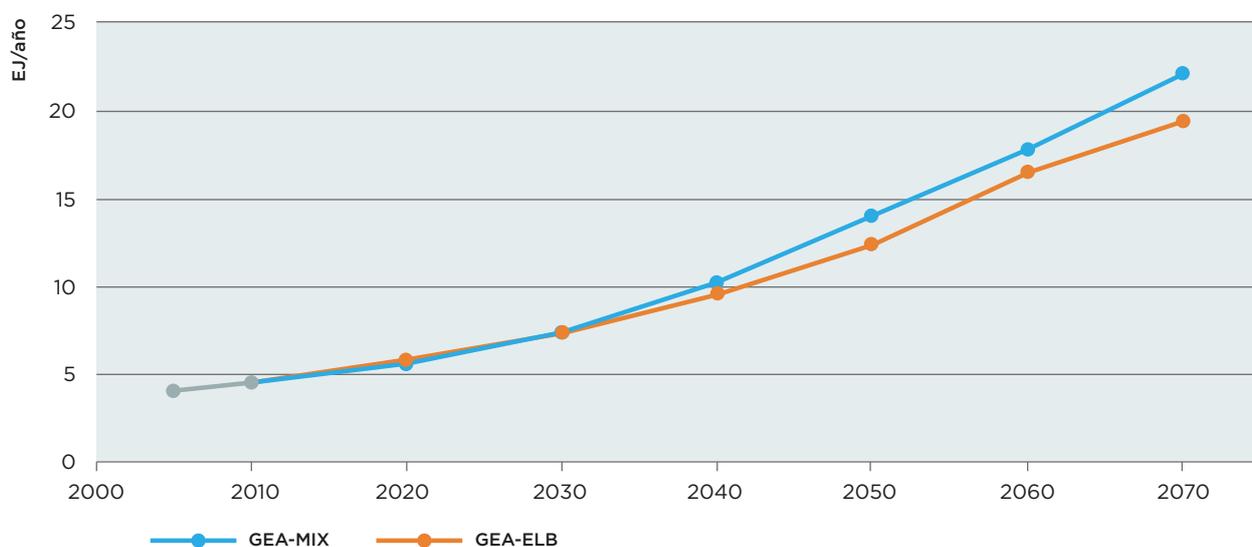
Incluso el rango inferior de este intervalo requerirá grandes inversiones en infraestructura energética, incluyendo en la capacidad de generación, en líneas de transmisión, estaciones de regulación y otros servicios auxiliares, cuyo costo acumulado probablemente esté

⁹ En el año base de 2012, la energía eléctrica producida en la región de América Latina y el Caribe fue de aproximadamente 1.49 PWh, que representa un aumento del 52% desde el año 2000 (EIA, 2015)

¹⁰ En el Anexo I se incluye una descripción del ELB y otros escenarios desarrollados por IIASA.

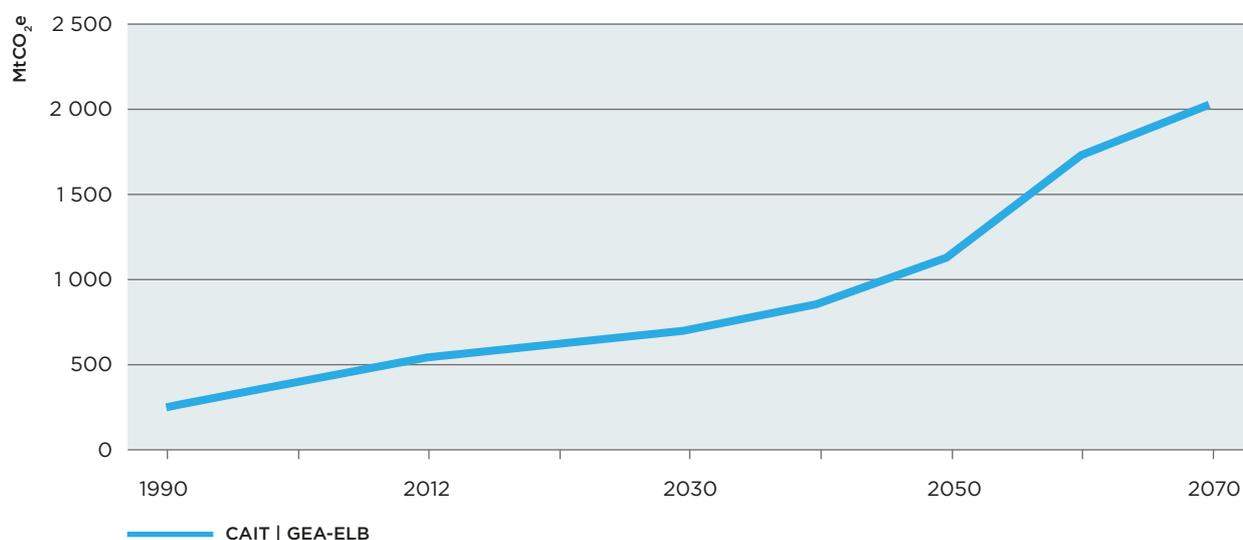
¹¹ Basado en los escenarios ELB IIASA y GEA Mix para 2075.

Figura 2.1 – Demanda de electricidad proyectada bajo los escenarios ELB de IIASA y GEA-Mix.



Fuente: (IIASA, 2012), descargado en septiembre de 2015. El escenario ELB proyectado es menor que el escenario GEA-MIX, dado que IIASA proyecta ciertas demandas adicionales provenientes del sector de transporte en este escenario.

Figura 2.2 – Emisiones históricas y proyectadas de GEI del sector eléctrico.



Fuente: Datos históricos de emisiones obtenidos de (CAIT, 2015), proyecciones basadas en las tasas de crecimiento de emisiones futuras de IIASA-GEA (IIASA, 2012)

Tabla 2.1 – Intensidad de carbono de los sectores eléctricos.

País	Intensidad de carbono del sector eléctrico (tCO ₂ e por MWh)
África	0,74
Asia (excl. China)	0,93
Europa del Este/Central	0,82
China	0,97
Dinamarca	0,37
Alemania	0,67
India	1,33
Japón	0,44
ALC	0,21
EE. UU.	0,55
Mundo	0,63

Fuente: (Brander et al., 2011)

en el rango de mil a 2 mil millones de dólares en el 2050 a los costos actuales.

En 2013, la demanda en la región se satisfizo a través de la operación de una capacidad instalada de generación de electricidad estimada de 365 GW, con una gran participación de energía hídrica, que representa el 6,3% de la capacidad mundial (Enerdata, 2015). (El Anexo II lista las plantas hidroeléctricas en la región con una capacidad nominal de al menos 1 GW). Como consecuencia, la señal del carbono de la matriz de energía regional es extraordinariamente baja, situándose en alrededor de 0,21 tCO₂ por MWh (Brander et al, 2011). A nivel mundial, este es con mucho el sector de generación de energía menos intenso en términos de emisiones de carbono (Tabla 2.1). El sector también tiene la capacidad de continuar manteniendo niveles bajos de emisiones de carbono por MWh debido a su considerable potencial hidroeléctrico y, como se discute más adelante en esta sección, la potencial contribución de fuentes renovables de energía diferentes de la hidroeléctrica.

El importante papel de la energía hidroeléctrica no solo reduce la huella de carbono del sector. Si la red puede ser integrada a nivel regional, la gran capacidad de los embalses multianuales podría ofrecer también una ca-

Tabla 2.2 – Adiciones recientes de energías renovables no hidroeléctricas en países selectos (en GW).

País	2010	2011	2012	2013	2014	Crecimiento de 2010 a 2014 (%)
Argentina	0,05	0,11	0,15	0,23	0,28	458
Brasil	0,93	1,48	2,52	3,46	6,01	546
Chile	0,17	0,22	0,31	0,34	1,04	511
México	1,51	1,49	2,23	2,92	3,37	123
Uruguay	0,04	0,04	0,05	0,06	0,49	1109
Total América Latina y el Caribe	3,5	4,3	6,6	8,4	13,1	274

Fuente: (Enerdata, 2015)

pacidad de “generación base” relativamente estable¹² que podría llegar a ser utilizada como una opción de almacenamiento de energía capaz de amortiguar las fluctuaciones entre la oferta y la demanda en la región.

El impacto de la creciente participación de la energía hidroeléctrica en el contenido de carbono del sector energético también puede ser apreciado en las emisiones históricas. Mientras que la producción de energía creció un 59% desde 2000 hasta 2012 (Enerdata, 2015), las correspondientes emisiones de GEI por el sector eléctrico aumentó durante el mismo período en un 44% (CAIT, 2015), reflejando una reducción significativa en la intensidad de carbono. Aun así, la demanda prevista y las proyecciones de la tasa de aumento del ingreso de gas natural bajo el escenario de línea base (ELB) contribuiría a generar emisiones adicionales sustanciales en el futuro, estimadas en alrededor de 1,1 GtCO₂e en 2050 bajo el ELB de IIASA (Figura 2.2).

Además de la energía hidroeléctrica, otras fuentes renovables están sumándose al mercado energético de América Latina y el Caribe. En 2014, 13,1 GW de otros recursos renovables (Tabla 2.2) o aproximadamente la mitad de la capacidad nueva, entraron en operación como una continuación de lo que parece ser una tenden-

cia duradera. Un aspecto importante que subyace a este aumento sustancial (272% de 2010 a 2014) es el marco de políticas y los aumentos en el costo-efectividad de las energías renovables, principalmente las energías solar y eólica, que se abordan más adelante en este capítulo. Sin embargo, la capacidad actual en operación de fuentes renovables no hidroeléctricas representa apenas una pequeña fracción (8%) de la capacidad total de energías renovables (Enerdata, 2015).

A pesar de los incrementos netos en las energías renovables, la diferencia entre el total de generación de energía eléctrica y el de la generación con energías renovables se ha ampliado entre 1970 y 2012 (Figura 2.3¹³). La mayoría de esta brecha se ha cubierto con nuevas plantas de gas natural, muchas de las cuales son unidades de ciclos combinados comparativamente más eficientes en términos de emisiones de carbono.

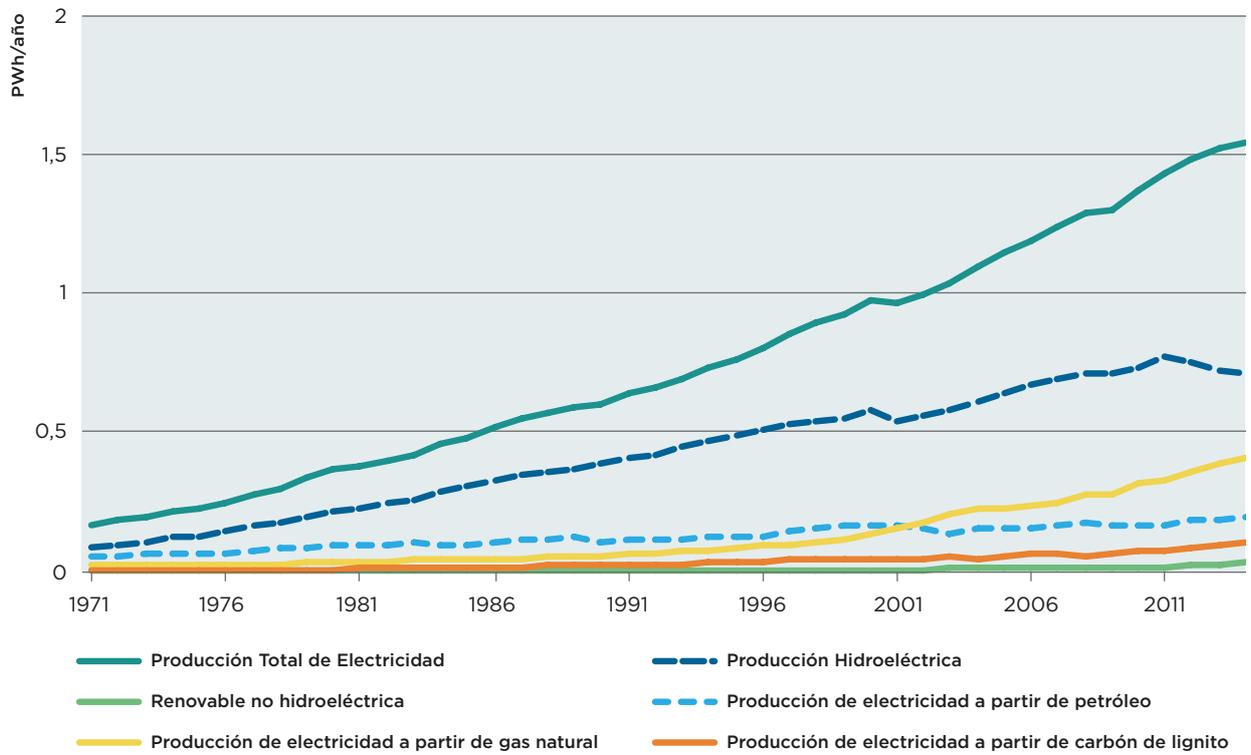
2.2 DOTACIÓN DE RECURSOS

Se requiere una mayor tasa de ingreso al mercado, de las energías renovables a fin de atender la demanda futura de energía, eliminar la brecha actual que está

¹² Sin embargo, los impactos del clima podrían desestabilizar la generación de energía hidroeléctrica mediante la intensificación prevista de los patrones de precipitación, los cuales afectarían la capacidad garantizada de los embalses. Para consultar una discusión detallada de estos impactos, ver, entre otros, (Ebinger & Vergara, 2011).

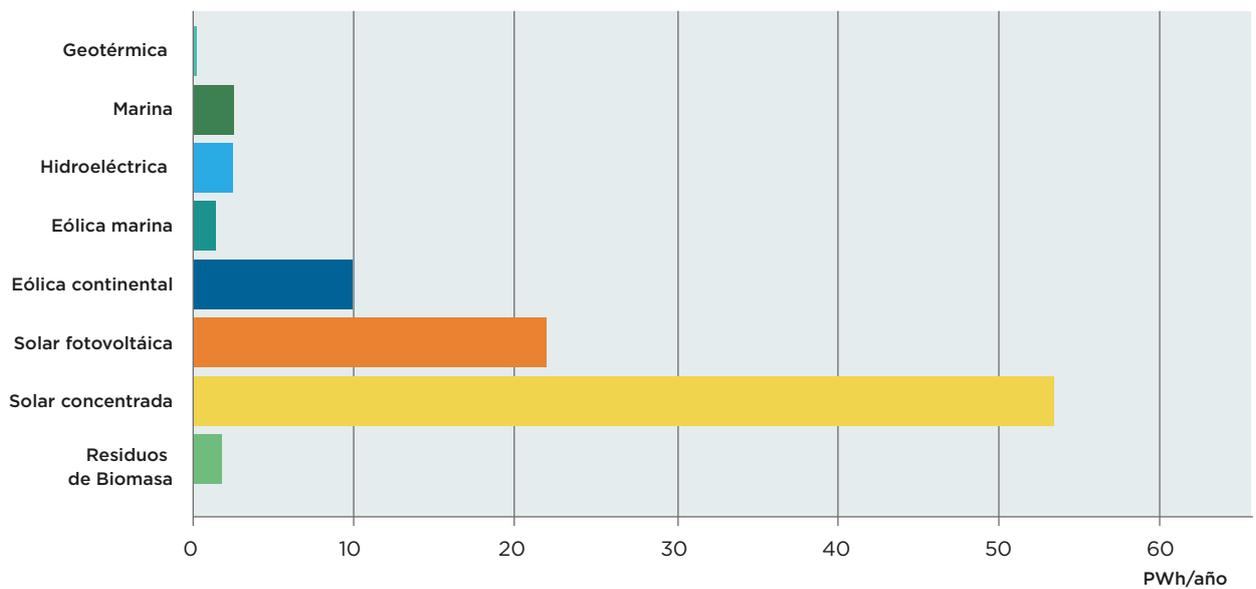
¹³ La estimación de dotación es para 2020. En el reporte, Ecofys (2009) menciona que “El consumo de energía final global actual (338.5 EJ/año de acuerdo con las estadísticas de energía de IEA) es menor del 5% del potencial técnico total proyectado. El potencial de energía eólica continental total, por sí mismo, puede satisfacer la demanda energética actual”. Entonces, el estimado utilizado en este estudio es conservador.

Figura 2.3 - Evolución histórica de la generación total de energía por fuente desde 1971 hasta el 2014 (en PWh/año).



Fuente: (Enerdata, 2015)

Figura 2.4 - Dotación de recursos estimada de fuentes renovables en América Latina.



Fuente: (Ecofys, 2009)

Tabla 2.3 – Irradiación solar en áreas selectas.

Ubicación	Tamaño del desierto [Millones de km ²]	Irradiancia [W por m ²]
Takla Makan, China	0,27	210
Gran Cuenca, EE. UU.	0,49	220
Sahara, África del Norte	9,06	260
Gran Desierto Arenoso, Australia	0,39	265
Atacama, Perú y Chile	0,14	275

Fuente: (GENI, 2011)

atendiendo el gas natural, y desplazar el uso futuro de combustibles fósiles. Afortunadamente, existe una dotación sustancial de recursos de energías renovables en América Latina y el Caribe. Sin embargo, excepto por la energía hidroeléctrica, la mayoría de estos recursos aún no han sido utilizados de manera consistente con su competitividad potencial y relativa.

Se estima que la dotación regional de energías renovables es de alrededor de 93 PWh anualmente (Figura 2.4; Ecofys, 2009), con una capacidad máxima nominal correspondiente de 39 TW. Como referencia, la demanda mundial de energía se situó en 19,7 PWh en 2012 (EIA, 2015). Literalmente, la dotación en la región de América Latina y el Caribe podría satisfacer la demanda mundial varias veces. Es claro que nunca se llegará al aprovechamiento total de este potencial, pero de cualquier manera la capacidad máxima teórica ilustra el considerable potencial no aprovechado de los recursos renovables en la región.

Si bien la dotación de recursos energéticos renovables es significativa en toda la región, América Latina también tiene focos de intensidad de recursos de escala mundial. Por ejemplo, el desierto de Atacama en el norte de Chile y el sur de Perú tiene una irradiación de unos 275 W por m², que es la mayor del mundo (el promedio mundial de irradiación es de 198 W/m² (Nielsen, 2005)) (Tabla 2.3). Con una superficie de unos 14 millones de hectáreas, la región de Atacama es realmente un recurso solar de relevancia mundial. La alta radiación solar en Atacama invita a la opción de unidades de energía solar concentrada (ESC) con unidades con un almacenamiento importante y un alto factor en línea que inicialmente

podría satisfacer las demandas de la industria local¹⁴ y con el tiempo, una vez que la red se extienda hacia el sur, también abordará la demanda en las grandes zonas urbanas de Chile.

El desarrollo en gran escala de las aplicaciones de energía solar en Atacama tiene una fuerte justificación económica y estratégica y serían, si todos los demás factores son constantes, el área lógica para realizar esfuerzos de generación de energía solar de gran escala a nivel regional. Otras zonas con una fuerte radiación solar incluyen el nordeste de Brasil y el noroeste de México, entre otros. El potencial de generación de energía solar en América Latina calculado es mayor de 75 PWh¹⁵ (Ecofys, 2009).

Los recursos eólicos también son muy extendidos y abundantes. Las áreas que experimentan vientos con velocidades sostenidas de 9 m/s o más incluyen Oaxaca en México, el desierto de la Guajira en Colombia y Venezuela y la Patagonia austral, entre otros. Desarrollos eólicos ya se están llevando a cabo en todas estas áreas con relativo éxito, pero las zonas podrían desarrollar una capacidad de generación de energía eólica significativamente mayor. Las zonas costeras alrededor del continente y en la región del Caribe también muestran regímenes eólicos confiables. El potencial estimado de energía eólica en la región se encuentra en el rango de 11 PWh (Ecofys, 2009; Vergara et al., 2013a; REN21, 2015).

Asimismo, la cordillera Americana es un centro natural de exploración geotérmica. Actualmente ya están activos programas de energía geotérmica en México, Guatemala y Costa Rica, y se están planeando desarrollos en Colombia, Perú, Chile y otros. La energía geotérmica podría desempeñar un papel central en América Central, donde los recursos son considerables. Si bien la verdadera magnitud de los recursos geotérmicos no se conoce aún, los países de la región andina han estimado un potencial de generación geotérmica de al menos 100 TWh (Ecofys, 2009; Vergara et al., 2013a), y posiblemente mucho mayor.

La energía marina también constituye un importante recurso que solo hasta ahora está siendo examinado para evaluar sus posibilidades de aprovechamiento. Tanto la energía procedente de las olas como la de las

¹⁴ Abengoa está desarrollando una central hidroeléctrica, ESC-ESF de 210 MW en el Desierto de Atacama.

¹⁵ Esta estimación se basa en el 6% del área disponible para la generación de energía solar (regiones desérticas y semiáridas) en México, América Central y América del Sur.

mareas son un recurso energético significativo en el Pacífico Sur. Si bien la tecnología todavía no se ha desarrollado a un nivel comercial, el horizonte de tiempo para su implementación sigue reduciéndose, como lo demuestran los grandes compromisos financieros asumidos en Corea del Sur y Francia, entre otros. En Chile, se ha calculado que potencial será del orden del 1 PWh (GOV.UK, 2012), el cual es comparable a otras grandes áreas de dotación a nivel mundial.

A pesar de estas favorables condiciones de recursos, bajo los escenarios de línea base existe la expectativa de que el sector energético se carbonizará gradualmente al menos hasta mitad de siglo. Las proyecciones del ELB de IIASA prevén que la participación del carbón en la generación de energía irá desapareciendo gradualmente, pero en cambio se percibe que el gas natural mostrará un aumento de su participación. El efecto neto es un aumento en la proporción de los combustibles fósiles para la generación de energía de aproximadamente el 110% de 2012 a 2050 (IIASA, 2012). Las razones para esta proyección, se argumenta, incluyen la relativa facilidad del suministro y la percepción de competitividad financiera del gas natural. En efecto, la generación de energía basada en gas natural de ciclo combinado es de hecho bastante competitiva en las condiciones actuales. También se consideran razones geopolíticas.

Sin embargo, las tendencias recientes muestran una creciente ventaja financiera para las energías renovables en la región y podrían constituir una base para cuestionar estas premisas. Por ejemplo, las licitaciones recientes para el suministro de energía en el mercado brasileño han favorecido abrumadoramente a la energía eólica (REN21, 2015), y se percibe que las condiciones de mercado en Uruguay, México, Brasil y Nicaragua, entre otros, están a favor de la energía eólica sobre el gas. Esto indica que las energías eólica y solar pueden competir y superar al gas bajo condiciones de igualdad¹⁶, es decir, en situaciones en las que las energías renovables no son penalizadas y/o los combustibles fósiles no son subsidiados.

¿Es posible imaginar un escenario en el que consideraciones relativas al desarrollo económico, seguridad energética y cambio climático puedan satisfacerse mediante el despliegue a escala de las fuentes de energía

renovables? ¿Las bases de este futuro energético alternativo ya están siendo desarrolladas en la región?

Este capítulo desafía la tesis de carbonización gradual proyectada del sector bajo las condiciones actuales, enfatizando tendencias recientes en la región. Estas tendencias incluyen: a) cambios recientes y significativos en la participación de mercado de las energías renovables; b) la evolución de los marcos de políticas; c) el establecimiento de metas y lineamientos políticos para energía renovable; d) la perspectiva de la integración de la red regional de transmisión, con las ventajas que aportaría para el despliegue a gran escala de las energías renovables; y, e) la evolución en las tecnologías, con la consiguiente mejora en la competitividad económica.

2.3 EL TAMAÑO DEL MERCADO DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES ESTÁ AUMENTANDO

A nivel mundial, las inversiones en recursos energéticos renovables en la última década han sido sustanciales. Desde 2004 a 2014, la inversión en energías renovables global anual creció un 500%, pasando de 45 mil de millones a 270 mil millones de dólares (FS UNEP Centre, 2015). En América Latina, aunque aún representa una pequeña fracción del total, la capacidad de fuentes de energía renovables, diferentes de la hidroeléctrica y la biomasa (las fuentes renovables tradicionales) también ha mostrado un crecimiento acelerado (Tabla 2.2). Los mercados para la energía eólica y la energía solar fotovoltaica ya están establecidos en la región, y el papel de la ESC es cada vez más claro, con dos unidades de gran escala en construcción.

En Argentina, Brasil, Chile y el Perú se han adjudicado contratos por más de 13 GW de capacidad a través de licitaciones abiertas desde 2007, y Uruguay ha utilizado licitaciones para pasar de 40 MW en 2012 a su meta de 1 GW de capacidad de energía eólica para el año 2015. Asimismo, en Centroamérica, El Salvador, Guatemala, Honduras y Panamá se han emitido licitaciones para proyectos de energía renovable en 2014 (REN21, 2015). Brasil ha abierto ofertas para energía eólica durante varios años, y para energía solar desde 2014. Chile celebró su primera licitación de energía solar concentrada en 2013 con un fuerte apoyo gubernamental, y Uruguay lanzó múltiples ofertas de energía solar a lo largo del año (REN21, 2015). De hecho, la región de América La-

¹⁶ Dependiendo del método de cálculo utilizado, REN21 (2015) estima que los subsidios al costo total de los combustibles fósiles varían de 544 mil millones de dólares a 1,9 billones de dólares —varias veces más altos que los correspondientes a la energía renovable—.

Tabla 2.4 - Resumen de las políticas de energía renovable en Latinoamérica

	Política Nacional								Incentivos Fiscales							Acceso a Red Eléctrica					
	Objetivo de Energía Renovable	Ley / Estrategia de Energía Renovable	Ley / Programa de Calentamiento Solar	Ley / Programa de Energía Solar	Ley / Programa de Energía Eólica	Ley / Programa de Geotérmica	Ley / Programa de Biomasa	Ley / Programa de Biocombustibles	Exención de IVA	Exención de Impuesto a Combustibles	Exención de Impuesto sobre la renta	Beneficios Fiscales de Importación / Exportación	Exención Nacional de Impuestos Locales	Impuestos sobre generación de Carbono	Depreciación Acelerada	Otros Beneficios Fiscales	Descuento / Exención de la Transmisión	Transmisiones Prioritarias / Dedicadas	Acceso a la Red Eléctrica	Suministro Preferente	Otros Beneficios de la Red Eléctrica
Argentina	■	■			■			■	■	■	■	■			■	■					
Belice	■	■																			
Bolivia	■							■			■	■									
Brasil	■			■			■		■	■	■	■			■	■					
Chile	■	■	■	■	■	■	■		■	■	■		■		■	■		■			
Colombia	■	■						■	■	■	■			■	■						■
Costa Rica	■				■	■	■			■	■	■			■	■					
Ecuador	■				■	■	■			■	■	■						■	■		
El Salvador	■		■							■	■	■						■	■		
Guatemala	■					■		■		■	■	■			■	■		■			
Guyana	■							■		■	■	■									
Honduras	■	■					■			■	■	■			■	■	○	■			
México	■	■	■		■	■	■			■	■	■	■	■	■	■	■	■			■
Nicaragua	■	■			■	■	■		■	■	■	■			■	■			■	■	■
Panamá	■	■	■	■	■	■	■		■	■	■	■		■	■	■					■
Paraguay							■		■	■	■				■	■		■			
Perú	■	■	■		■	■	■	■	■	■	■			■	■		■	■	■	■	■
Surinam	■																				
Uruguay	■	■	■				■	■	■	■	■				■	■				■	■
Venezuela	■	○						■	■	■					■						
TOTAL Activo)	19	11	4	4	2	6	8	11	9	6	10	12	5	2	5	12	7	3	8	5	6

Fuente: (IRENA, 2015a)

■ Activo ■ Expirado, sustituido o inactivo ○ En desarrollo

tina y el Caribe continúa siendo un líder en licitaciones de energía renovable no hidráulica.

En América Latina, de 2000 a 2014, la capacidad de energía instalada para energías renovables no hidroeléctricas aumentó en un 1300% desde una pequeña base hasta 13 GW (Enerdata, 2015). ¿Podría continuar esta tendencia? La respuesta a esta pregunta depende de la evolución continua de los marcos regulatorios, los compromisos en materia de política y la competitividad económica de estas opciones. A continuación la situación actual de cada una de ellas se examina brevemente.

2.4 EVOLUCIÓN DE LOS MARCOS REGULATORIOS

Una discusión detallada de la evolución de los marcos regulatorios en la región rebasa el alcance de este documento. A manera de aproximación, se presenta un breve resumen de algunos de los principales desarrollos.

Se han registrado avances notables en la evolución del marco regulatorio en apoyo a las fuentes de energía renovables en la región. La Tabla 2.4 resume el estado actual de un trabajo compilado por REN21 (2015). Según el citado análisis, la mayoría de los mercados de energía en la región tienen metas en energías renovables, políticas de apoyo y, en cierta medida, sistemas de financiamiento para las fuentes de energía renovables. En México y Chile se han establecido impuestos sobre el carbono, y otros países están considerando su posible uso como un instrumento para promover inversiones en energía renovable.

A fin de apoyar el ingreso en el mercado, se han establecido políticas y reglamentos en la región. Por ejemplo, las tarifas de alimentación (FIT, por sus siglas en inglés) y las normas de cartera de energías renovables (RPS, por sus siglas en inglés) han impulsado el mercado para suministrar electricidad renovable, fijando el precio o la cantidad de energía. También se han celebrado subastas en las que una determinada capacidad o energía se adquiere competitivamente. Las tasas de las FIT se fijan administrativamente, mientras que las subastas suelen tener tasas fijas que se establecen mediante la evaluación periódica de competitividad (Vergara et al., 2013a).

En algunos casos, se han establecido regulaciones para el auto-abastecimiento in situ o externo que permiten y alientan a los consumidores a generar su propia elec-

tricidad a partir de fuentes renovables de energía. En el Caribe, países como Barbados, Granada, Jamaica y Santa Lucía han introducido diferentes versiones de políticas de medición neta y facturación neta que permiten que la generación in situ se acredite contra las facturas de electricidad del cliente en o por debajo de la tarifa de electricidad al consumidor.

Se están utilizando otras herramientas para fortalecer el marco propicio para la energía renovable (por ejemplo, simplificación de autorizaciones, exenciones fiscales sobre la propiedad, exenciones de impuestos de importación), proporcionar apoyo de mercado (difusión, educación, creación de capacidad, fortalecimiento institucional) y aumentar la contribución de los NRT para el desarrollo local. Si bien estas políticas han desempeñado un papel importante en la promoción del mercado en la región y aún son muy necesarios, existen evidencias crecientes de que el cambio en la competitividad relativa (que se analiza más adelante en este capítulo) está teniendo un efecto.

2.5 OBJETIVOS DE ENERGÍA RENOVABLE

Se ha progresado en el establecimiento de metas de producción para las energías renovables, incluyendo en : a) algunas de las economías con sectores energéticos más carbono-intensivos en América Latina (Chile y México); b) algunos de los países con los programas de energía renovable más ambiciosos y exitosos (Costa Rica, Nicaragua, Uruguay); y c) otros países con una participación significativa de energías renovables en su matriz de energía actual (Brasil, Colombia, Perú).

México y Chile, con algunos de los sistemas de energía más carbono-intensivos en la región, han establecido objetivos claros para energía renovable. En México, su Plan de Cambio Climático (Visión 10, 20, 40) (NCCS, 2013) ha establecido una meta del 50% de energías renovables en la generación de energía para alrededor de 2050. Chile ha indicado en su Plan Energético una intención de contar con un 20% de energía renovable en la generación de energía para el año 2025 (Del Campo, 2012) y recientemente anunció una meta del 70% para el año 2050 (EFE, 2015). Dada la estructura actual de sus respectivas matrices de energía, estos objetivos representan modificaciones muy importantes en el uso de combustibles fósiles.



Brasil, ya un líder mundial en energía renovable para la generación de energía, ha establecido recientemente un adicional e importante objetivo que aumentaría la participación de las energías renovables a partir de recursos diferentes a la energía hidroeléctrica al 20% en 2030. Las intenciones de Brasil fueron anunciadas en la COP 21, y cuando se alcancen se traducirían en un equivalente de 24 GW de energías renovables no tradicionales en el año 2030. Dada su magnitud, las intenciones de Brasil también tienen el potencial de contribuir al desarrollo de las cadenas de suministro industrial en la región.

Uruguay, Nicaragua, Costa Rica y Ecuador también son notables ejemplos de países que están estableciendo objetivos ambiciosos y en algunos aspectos ejemplares y que están llevando a cabo acciones tempranas para alcanzarlos. Por ejemplo, Uruguay ha manifestado su intención de lograr un sector energético libre de carbono en 2020, y ya cuenta con una participación de energía eólica en su matriz de energía que supera a la de Dinamarca. En 2015, Costa Rica logró operar su sistema de generación de energía con combustibles no fósiles durante un período prolongado y

ha anunciado su intención de transformar el total de su economía, de manera que su consumo de carbono sea neutral en 2020. Nicaragua, si bien enfrenta muchas necesidades de desarrollo, de cualquier manera ha logrado avanzar rápidamente para cambiar su matriz de energía hacia las energías renovables. Estos pequeños países efectivamente brindan un ejemplo práctico de cómo transitar hacia una ruta de bajas emisiones de carbono en la generación de energía.

Paraguay es un ejemplo indicativo de la posible futura naturaleza de la generación de energía en la región. El país ya está en un nivel 100% renovable en su sector de energía gracias a la gran dotación hidroeléctrica y a los proyectos multinacionales (Yacireta e Itaipú). Uno de sus mayores recursos de exportación es la energía hidroeléctrica. Como resultado, Paraguay debe ser un buen terreno de prueba para el sector eléctrico como un factor que puede influir en el consumo de energía en otros sectores de la economía.

Otras naciones han indicado también su compromiso para reducir el uso de combustibles fósiles en sus sistemas de abastecimiento de energía eléctrica. Una

Tabla 2.5 – Estado actual y objetivos establecidos para la incorporación de fuentes renovables para generación de electricidad

País	Participación en 2013	Objetivo
Argentina		8% para 2016
Bolivia		160 MW nuevos para 2025
Brasil	79% (2014)	Capacidad del 20% en energías diferentes de hidroeléctrica para 2030
Chile	8,6% (2014)	20% para el 2025 ; 70% en energías diferentes de hidroeléctrica para 2050
Colombia	72%	6,5% en energías diferentes de la hidroeléctrica para 2020
Costa Rica	90%	100% para 2021
Ecuador	48%	85% para 2017
Guatemala		80% para 2027
México		25% para 2026
Nicaragua	51% (2014)	90% para 2027
Paraguay	100%	
Perú		60% para 2025
Uruguay	84%	92% para 2015
Venezuela	64% (2012)	500 MW eólicos adicionales para 2019

Fuente: (REN21, 2014, 2015; CleanTechnica, 2015)

lista parcial de los objetivos anunciados recientemente se muestra en la Tabla 2.5. Se espera que en un futuro próximo otros países puedan ser agregados a la lista. El establecimiento de metas en la participación de mercado de las energías renovables refleja un consenso político de que debe favorecerse esta opción. La consecución de estos objetivos ya ha comenzado a llevar al sector energético mucho más cerca de cero emisiones.

2.6 MODERNIZACIÓN E INTEGRACIÓN DE LA RED

La mayoría de los países de la región dependen de un sistema nacional de transmisión de energía que está relativamente aislado de las redes vecinas. Estos sistemas nacionales se encuentran bajo una presión considerable, causada por la aparición de fuentes de generación intermitentes y estacionales, la necesidad de proveer almacenamiento de energía y la expansión proyectada de la energía distribuida. Todos estos factores han contribuido a concentrar la atención en la posibilidad de integrar las diferentes redes nacionales en un sistema regional en América Latina. También se ha creado

incertidumbre sobre el futuro del modelo de negocio tradicional y el funcionamiento de las redes.

La integración regional permitiría balancear la generación variable a través de fronteras. Generalmente, las redes regionales pueden mejorar la confiabilidad de los sistemas y crear oportunidades para captar mayores economías de escala, complementar la diversidad de los recursos, permitir la coordinación de las reservas en operación, y apoyar una mayor penetración de la generación variable de energía renovable, proporcionando así incentivos adicionales para aprovechar las zonas ricas en recursos tales como la costa del Pacífico Meridional (generación de energía de mareas y oleaje), los campos eólicos de Guajira y Guajaca o los desiertos de Atacama y Sonora (radiación solar).

Además, desde la perspectiva de los recursos energéticos renovables, una red integrada e inteligente ofrecería una serie de ventajas en el contexto de un mercado regional: a) permitiría el despacho de fuentes intermitentes con mayor flexibilidad, aumentando así su capacidad garantizada real; b) podría incrementar la confiabilidad del sistema y también posiblemente utilizar la capacidad

hidroeléctrica acumulada como un gran depósito de almacenamiento capaz de amortiguar las variaciones en los suministros de centrales de generación de energía solar, eólica y marina; y c) también podría promover ganancias en eficiencia y rentabilidad.

2.6.1 DESPACHO DE FUENTES INTERMITENTES

Una red integrada que abarcara todos los países de América del Sur permitiría el suministro de energía solar, por ejemplo, de la Región de Atacama de Perú y Chile, para satisfacer la demanda en las regiones orientales del continente después del anochecer, y viceversa, desde el noreste de Brasil hasta el oeste antes del amanecer, y así incrementar de manera efectiva la capacidad firme de estos recursos. El exceso de producción de energía eólica desde las costas del norte de Colombia y Venezuela podría satisfacer la demanda más allá de esta zona. Una vez desarrollada, la considerable energía marina en el Pacífico estaría disponible más allá de las fronteras de Chile.

Por supuesto, estos desarrollos dependerán no solo sobre la disponibilidad de una red física, sino también de la compatibilidad de los marcos de política energética, así como la contención de las pérdidas durante las transmisiones y el la rentabilidad global del sistema.

2.6.2 MAYOR CONFIABILIDAD DEL SISTEMA

Una red integrada, aun a nivel subregional, tendrá una mejor capacidad para manejar variaciones en la generación, no solo debido a un aumento en la participación de fuentes intermitentes o a variaciones causadas por el clima, sino también a través de un mejor uso de las tecnologías de la información y la comunicación integradas en sistemas de redes para mejorar la flexibilidad y la seguridad. Las tecnologías de la información y la comunicación compartidas podrían contribuir a evitar las interrupciones del suministro y permitirían una mayor transparencia durante la operación. Asimismo, las contribuciones intermitentes pueden ser absorbidas de mejor manera en un sistema más grande.

Un ejemplo útil de los costos y beneficios de una red supranacional integrada es el proporcionado por la experiencia reciente de Dinamarca. Este país está interconectado con otros países escandinavos y con el norte de Europa, e indirectamente con el resto de la Unión Europea. Según un análisis reciente (Franck, 2015), la interface simple con los países vecinos ha permitido al sistema danés comunicar de manera instantánea la necesidad de energía o de su disponibilidad, y permite

Tabla 2.6 - Lista de proyectos de interconexión a red eléctrica a mediados de 2015.

Proyecto	Fecha de finalización del proyecto	Capacidad [GW]	Costo [Millones de dólares]
Perú - Brasil	2015	2,2	2 370
Bolivia - Brasil	2015	0,8	792
Colombia - Panamá	2018	0,3	207
Bolivia - Chile	2014	0,2	30
Centroamérica	2016	0,3	500
Argentina - Paraguay - Brasil	2016	2	610
Bolivia - Perú	2016	0,1	65
Total		5,9	4 574

Fuente: (CAF, 2012)

que los productores y consumidores actúen de inmediato y en respuesta a condiciones actuales. El mercado energético regional distribuye automáticamente los distintos recursos a través de una amplia zona y hace uso de la flexibilidad disponible. “Nunca se presentan condiciones de tormenta, calma o nublados en toda la zona de interconexión al mismo tiempo” (Franck, 2015), lo cual garantiza que siempre están disponibles distintos recursos para atender la demanda. En este sistema, el suministro de fuentes de costo operativo muy bajo también ofrece una ventaja en el mercado.

La integración de las redes a través de la región de América Latina y el Caribe es aún un proyecto a futuro. Sin embargo, algunos países ya están planeando la integración a nivel subregional. Por el momento existen al menos siete proyectos de interconexión, con un costo estimado de 4,6 mil millones de dólares (CAF, 2012) (ver la Tabla 2.6).

Por ejemplo, ha habido discusiones entre Colombia y Panamá en torno a un proyecto de 0,3 mil millones de dólares para vincular a ambas redes. A la larga, esto podría abrir la posibilidad de un sistema integrado con América Central. Otro proyecto se está analizando entre Colombia y Chile para modernizar y configurar una red interconectada, con mejoras de los vínculos existentes en Ecuador y Perú. La interconexión entre Brasil y Uruguay es clave para los planes de Uruguay de ser 100% renovable en su abastecimiento de energía. El proyec-

to de 0,4 mil millones de dólares ya se ha completado. Uruguay ya está interconectado con Argentina. México también está planeando fortalecer sus vínculos con la región de América Central. La conclusión exitosa de estos proyectos en el corto plazo aumentará la probabilidad del ingreso a gran escala de nueva capacidad de energía eléctrica renovable y una operación mejorada.

2.7 ENERGÍA DISTRIBUIDA

Los sistemas de energía eléctrica distribuida —esencialmente la incorporación de pequeños productores-consumidores de energía, principalmente a nivel doméstico, pero también de usuarios industriales y comerciales de mediana y gran escala— se están convirtiendo en un elemento importante en algunos países de Europa y América del Norte. Estos sistemas pueden mejorar la confiabilidad a nivel local y contribuir a reducir las pérdidas en la transmisión. La energía distribuida confiere ventajas en las áreas de alta dotación de energía solar y eólica, donde los costos de transmisión pueden ser comparativamente más bajos.

Brasil y México han iniciado la implementación de esquemas de medición neta para permitir el desarrollo de instalaciones fotovoltaicas distribuidas residenciales, industriales y comerciales. Chile ha promulgado una ley y regulaciones para promover la energía distribuida (Ley 20571 de 2012)¹⁷. Esto es similar a los sistemas que ya funcionan en Alemania y en algunos estados de los Estados Unidos. Concretamente, en México y en Chile no se existe un costo adicional o una cuota especial para instalar sistemas distribuidos; la energía excedente se canaliza hacia la red para compensar por la electricidad extraída de ella. Sin embargo, los excedentes netos no son pagados al productor, aunque puede mantenerse un saldo neto durante un periodo de tiempo (un año en México y tres años en Brasil).

La medición neta no supone una inversión por concepto de instalaciones o infraestructura de transmisión adicional por parte del gobierno. Por el contrario, la aparición de sistemas distribuidos que contribuyen a la generación de energía debería reducir la presión para instalar nuevas unidades centralizadas una vez que estos sistemas alcancen una escala suficiente. Por ejemplo, México ahora tiene alrededor de 5 MW de energía distribuida, y

parece haber un potencial significativo para una rápida expansión.

La combinación de una red centralizada que crea economías de escala a partir de instalaciones centrales grandes con las ventajas locales de los sistemas distribuidos, con todo el conjunto integrado por comunicaciones avanzadas, daría como resultado un sistema híbrido. Esta hibridación se aprovecharía de los avances en la tecnología de redes y tiene el potencial de reducir los costos globales de la integración de las redes y la transmisión a través de la optimización a nivel local del balance entre el suministro y la demanda. Los sistemas exitosos ya existentes en México y Brasil son susceptibles de ser replicados en el corto plazo¹⁸.

2.8 LOS EMBALSES HIDROELÉCTRICOS REGIONALES COMO UNA INSTALACIÓN DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA

El sector eléctrico de América Latina está impulsado por la energía hidroeléctrica. Hay al menos 38 embalses multianuales en la región, con una capacidad nominal de 1 GW o más, que en total representaron 164 GW en 2013 (Enerdata, 2015). La energía potencial almacenada en cualquier momento dado es enorme. Además, estos reservorios están ubicados a lo largo de América, es decir operan bajo diferentes patrones meteorológicos e hidrológicos.

La integración de la red posibilitaría el uso de estos reservorios, como centrales regionales de almacenamiento de energía, disponibles para acumular recursos estacionales y abordar los impactos potenciales de eventos meteorológicos severos, tales como sequías prolongadas y lluvias intensas, en el sistema energético regional. Es posible visualizar periodos de baja precipitación en países del Pacífico sur —por ejemplo, bajo condiciones de ENSO—, como oportunidades para que los sistemas de energía solar o eólica acumulen un exceso de producción utilizando los reservorios en los países afectados o para satisfacer las demandas estacionales. Como resultado, un sistema energético regional integrado, o al menos, subregiones que compartieran los sistemas de la red, se beneficiarían de un aumento en la capacidad total de la capacidad garantizada de generación.

¹⁷ El texto de esta ley puede consultarse en <http://www.minenergia.cl/ley20571/wp-content/uploads/2015/03/Ley20.571.pdf>.

¹⁸ La República Dominicana y Perú han iniciado recientemente proyectos de energía distribuida (Renewable Energy World, 2013).

Los embalses también tienen el potencial, en gran medida sin explotar todavía, para complementar fuentes intermitentes de energía como la eólica y la solar. Por ejemplo, en el norte de América del Sur (Colombia y Venezuela), los regímenes de viento complementan a los patrones de lluvia. Sumando las energías eólica e hidráulica en la región puede aumentar la capacidad firme de ambos (Vergara et al., 2010).

Por otro lado, la generación de energía hidroeléctrica depende directamente de la disponibilidad de recursos hídricos, y por tanto de las variaciones en el ciclo hidrológico. Un suministro confiable se vería afectado por sequías severas más frecuentes y/o prolongadas resultantes del cambio climático, con la consiguiente precariedad derivada de la fuerte dependencia de la energía hidroeléctrica.

Tales cambios en la hidrología afectarán directamente la generación energética de las instalaciones hidroeléctricas existentes y futuras. Por ejemplo, se prevé una reducción del potencial de energía hidroeléctrica en áreas donde se espera una disminución de los caudales de los ríos, como en la cuenca del Río Lempa y la cuenca del Caribe Simú de Centroamérica (Maurer et al., 2008; Noreña et al., 2009). En un análisis de los flujos anuales de algunos ríos de América del Sur bajo el escenario A1B (Nakaegawa & Vergara, 2010; Vergara y Scholz, 2011) se detectaron reducciones en la estabilidad de los flujos de corriente, con los consiguientes impactos en las capacidades firmes de centrales hidroeléctricas. Puede consultarse un análisis detallado de estos impactos en Ebinger & Vergara (2011).

2.9 LA ECONOMÍA DE LA GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE

Las energías eólica, solar (fotovoltaica y concentrada) y geotérmica han experimentado recientemente mejoras tecnológicas importantes, que se traducen en mejores economías de escala, mayor eficiencia y mejores factores operacionales. Las tecnologías de energía marina, si bien aún no están totalmente desarrolladas, también han sido objeto de considerables inversiones en tecnología.

Como resultado, la economía de las energías renovables está cambiando rápidamente, con costos de generación

de energía mucho más competitivos¹⁹. Por ejemplo, para sistemas fotovoltaicos de escala industrial, los costos de instalación en el mercado estadounidense pasaron de 8 dólares estadounidenses por W pico instalado en 2007-2009 a 3 dólares en 2013, y las proyecciones actuales predicen que caerán a 1,50 dólares en 2025 y posiblemente llegarán a menos de 1 dólar en 2050 (Feldman et al., 2014). Las licitaciones recientes en América Latina confirman la reducción en los precios de contrato para la energía solar fotovoltaica. Por ejemplo, se ha utilizado un precio ofertado promedio de menos de 0,1 dólares por kWh para adjudicar aproximadamente 1 GW de capacidad en Brasil y alrededor de 0,2 GW en Panamá.

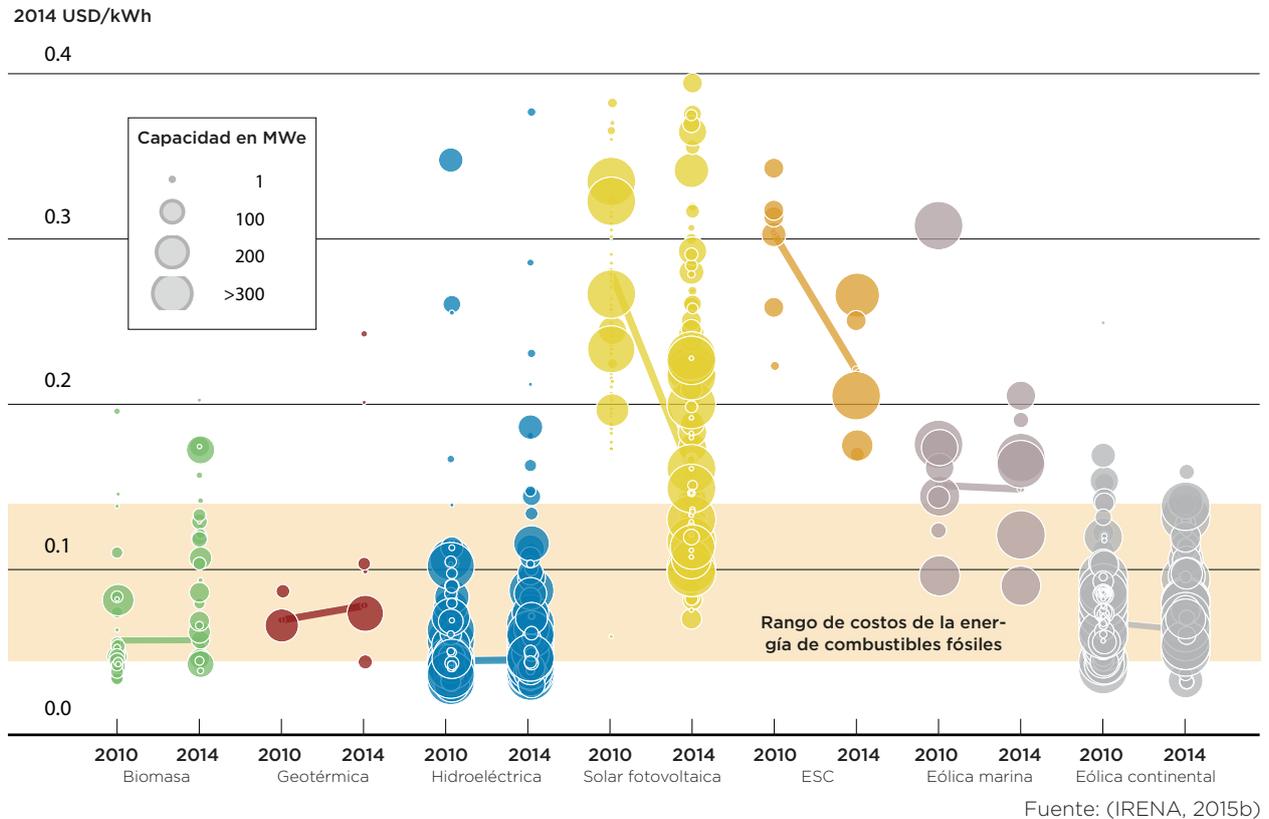
Actualmente, los sistemas de energía solar concentrada son más caros que los de energía fotovoltaica sobre por vatio instalado. Sin embargo, cuando se tiene en cuenta su capacidad de almacenamiento de energía, mejora la competitividad. El costo de instalación actual, basado en un número limitado de ejemplos, es de 4,6 dólares por W sin almacenamiento, y entre 9 dólares y 10,5 dólares con 15 horas de almacenamiento (IRENA, 2012). Aunque la experiencia desarrollada con esta tecnología es limitada (solo existen dos plantas en construcción en la región, en México y Chile), se pueden esperar reducciones adicionales en el capital y los costos de operación en el futuro, similares a los de otras tecnologías más maduras.

Asimismo, los costos de instalación de los sistemas de energía eólica han disminuido, y varias instalaciones en América Latina están compitiendo y superando al gas natural. En este momento ya están operando nuevas instalaciones en Brasil, México, Uruguay, Chile y Nicaragua, entre otros. La mayoría de las proyecciones indican que los costos de generación de la energía eólica continuarán disminuyendo a medida que el mercado se siga desarrollando (Lantz et al., 2012).

Para las instalaciones geotérmicas, una vez que los campos se confirman, los aspectos económicos son simples, y proyectos específicos pueden ser competitivos, como lo demuestran las inversiones recientes en Costa Rica y México. La energía marina, tanto de mareas como del oleaje, están en etapas mucho más tempranas de desarrollo. De cualquier manera, también se prevén caídas en los costos de capital a medida que las nuevas plantas adquieren experiencia operacional. Aquí se reproduce un resumen de la evolución de los costos compilado

¹⁹ Ver, por ejemplo, IRENA (2014).

Figura 2.5 – Evolución reciente de los costos de generación por instalaciones de energía renovable de acuerdo con la base de datos de energía renovable de IRENA (en dólares/kWh).



por IRENA (2015) (Figura 2.5). Los datos confirman la mejora continua en la rentabilidad en comparación con los combustibles fósiles.

La base de datos también muestra que, aunque ha habido una mejora significativa en la competitividad de energías renovables no hidroeléctricas, aún se requieren incentivos fiscales y regulatorios (impuestos al carbono, objetivos, depreciación acelerada, otros incentivos). El uso de estos incentivos podría acelerar la transición a las energías renovables y contribuir a garantizar bajas emisiones de carbono en el futuro.

2.9.1 COSTO ANUALIZADO (LCOE) DE LA GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD POR FUENTES RENOVABLES

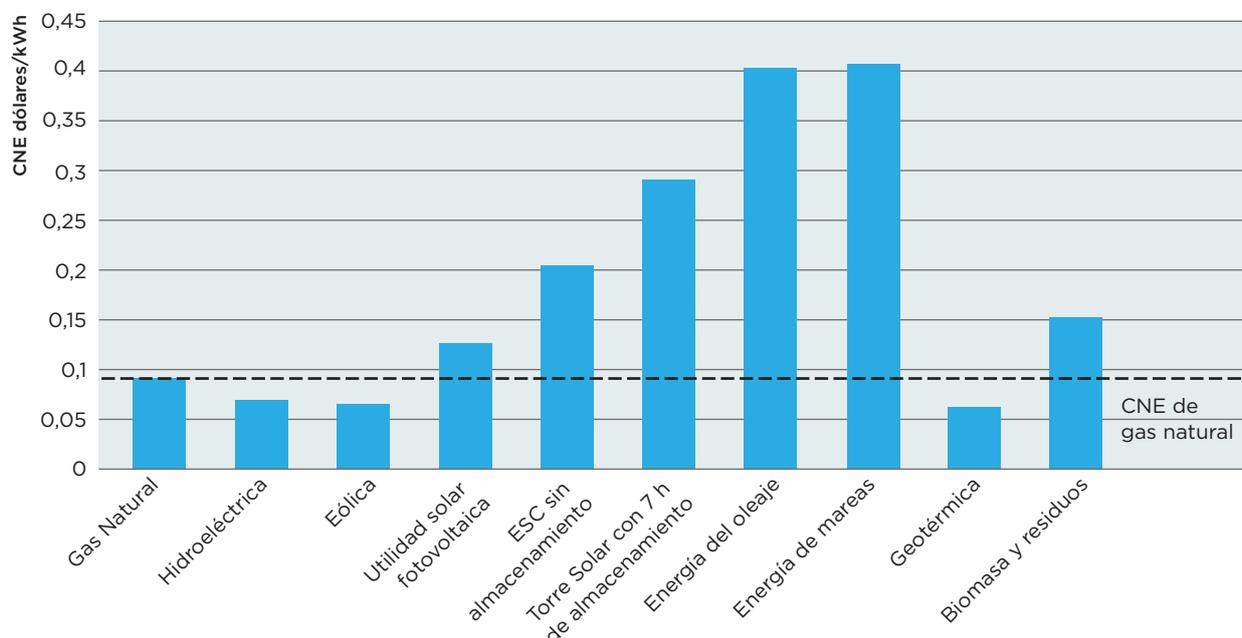
Para analizar el grado de competitividad en comparación con otras alternativas, se han estimado los costos de generación de energía en la región utilizando los Costos Anualizados de la Generación de Electricidad (LCOE, por sus siglas en inglés). Estos costos se han estimado utilizando datos recientes sobre los costos de capital instalado en la región, con una tasa de descuento del

7% y se calcularon utilizando el modelo GACMO (Fenhann, 2015).

Los LCOE fueron estimados para sistemas fotovoltaicos de tamaño industrial, energía solar concentrada con y sin almacenamiento, energía eólica y marina, geotérmica, marina de mareas y de oleaje, como si estos sistemas estuvieran ya en operación. Los resultados se muestran en la Figura 2.6, comparándolos con LCOE para plantas de generación de energía de gas natural y diesel de ciclo combinado y además con diesel a precios de 5 dólares por galón, para capturar los costos en zonas aisladas. Como el análisis se realiza sobre una base regional, los resultados son solo indicativos y podrían variar en función de ubicaciones específicas.

Los resultados indican que, como era de esperarse, las centrales hidroeléctricas, eólicas y geotérmicas son muy competitivas económicamente en el mercado de hoy. Si existen recursos disponibles, la elección racional es desarrollar estas opciones frente al gas natural y el carbón. Además, dados los plazos de construcción relativamente largos de las centrales hidroeléctricas y los aspectos ambientales y sociales asociados a los grandes embalses y

Figura 2.6 – Comparación de los costos de generación nivelados (CNE) estimados a través de energías renovables en ALC con gas natural.



Fuente: estimaciones de los autores y (Kost et al., 2013)

asumiendo que todos los demás factores son iguales, las energías eólica y geotérmica podrían atender aumentos en la demanda con plazos de entrega más cortos.

Los resultados también indican que la energía solar fotovoltaica se encuentra cerca a la paridad con el gas. Estas estimaciones son muy cercanas a las cifras promedio en la base de datos IRENA. Sin embargo, a medida que la tecnología avanza rápidamente, el estudio también utiliza una proyección consensuada de los costos de capital futuros para estimar los LCOE previstos en 2025 y 2050²⁰ preparados por el Instituto Fraunhofer para Sistemas de Energía Solar (Kost et al., 2013).

2.9.2 EVOLUCIÓN PREVISTA DE LCOE (CURVAS DE APRENDIZAJE)

Las proyecciones de las curvas de aprendizaje se presentan en la Figura 2.7, e indican que, en comparación con el gas natural de ciclo combinado, se prevé que las energías hidroeléctrica, eólica y solar sigan mejorando su competitividad a través del tiempo, colocándose

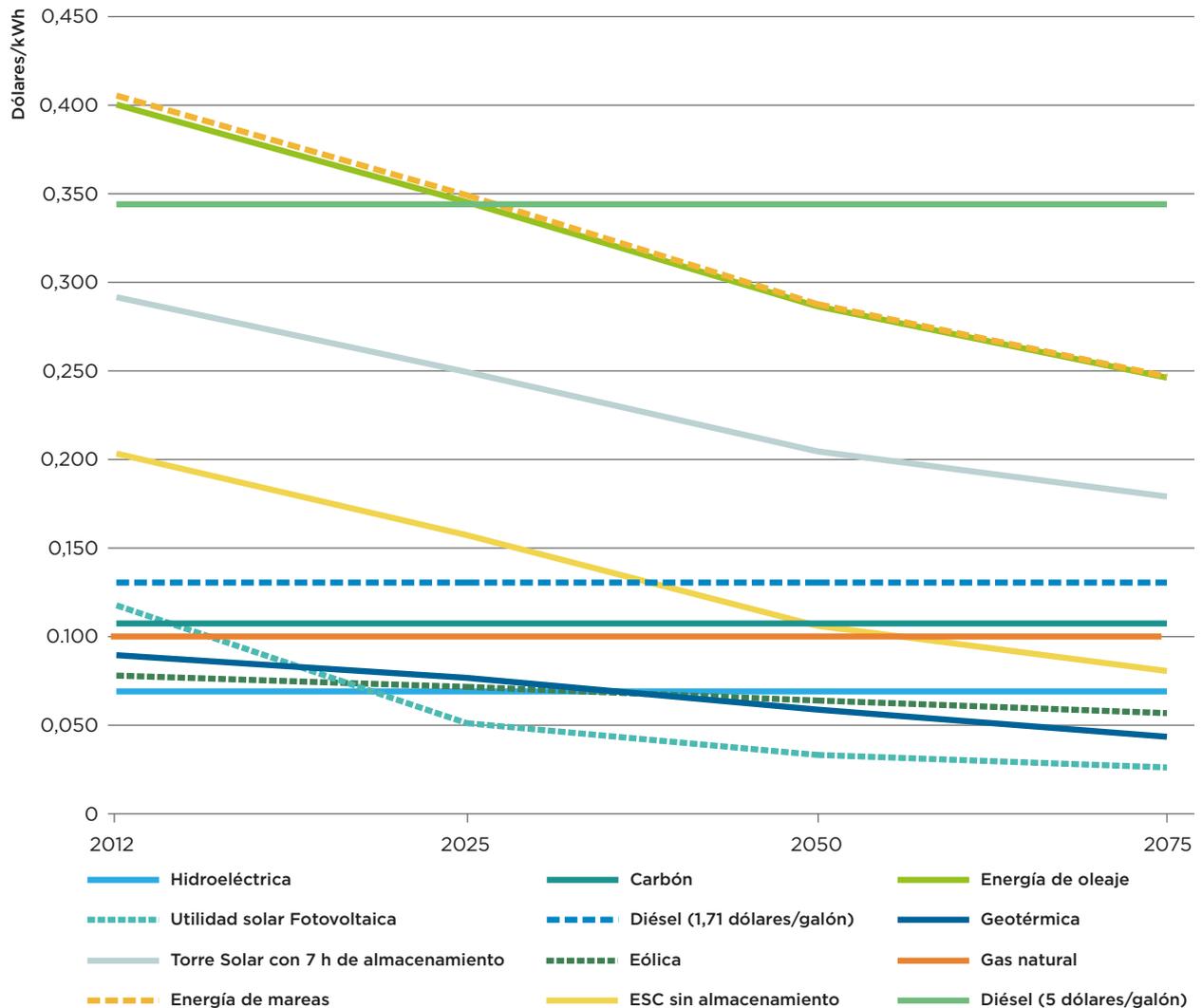
en una posición sólida para hacer frente a la demanda futura. También se espera que la continuación de las tendencias en los costos de capital muy pronto harán que las instalaciones fotovoltaicas utilitarias sean muy competitivas, especialmente en zonas de alta radiación solar (la región de Atacama de Chile y Perú, la Guajira de Colombia y Venezuela, el noreste de Brasil y la región de Sonora en México son algunos ejemplos). Existe la expectativa de que la curva de aprendizaje continuará y hará disminuir los precios aún más. Los análisis de la industria indican reducciones potenciales adicionales de los costos del 40% para las instalaciones fotovoltaicas en 2017 (Deutsche Bank, 2015).

También se estima que las instalaciones eólicas ya están en paridad con las redes, y se espera que continúen mejorando su competitividad a lo largo del tiempo. Bajo estas condiciones, uno podría esperar un desplazamiento generalizado de las instalaciones de gas natural como un proveedor potencial de energía en la región. El análisis también indica que las centrales fotovoltaicas y eólicas incluso competirán con las centrales hidroeléctricas en el corto plazo (Figura 2.7).

Las estimaciones también indican la probabilidad de que la energía solar concentrada compita en el mediano plazo con futuras centrales de gas natural o carbón

²⁰ La proyección se basa en factores de costo de capital obtenidos de Kost et al. (2013). Los costos de capital iniciales se basaron en los costos instalados de instalaciones recientes en la región, cuando estuvieron disponibles. La mayor parte de los analistas industriales proyectan descensos de los costos de la tecnología con factores de 0,9 a 0,7 de los precios actuales (Kost et al., 2013).

Figura 2.7 – Curvas de aprendizaje estimadas para energías renovables expresadas en CNE proyectados



Fuente: estimaciones del autor.

como una opción preferente. Sin embargo, como se observa en el caso de Chile, las instalaciones de energía solar concentrada con capacidad de almacenamiento ya pueden atender las demandas locales en zonas de alta irradiancia. Los recursos marinos son aún más caros para las aplicaciones de la red. Sin embargo, en situaciones donde la opción es generación de energía a base de diésel en comunidades costeras aisladas, o cuando los gastos del transporte de combustibles son altos, existen escenarios en los cuales los recursos marinos podría ser una opción preferente.

Sobre la base de estas cálculos, existe la expectativa de que la perspectiva mejorada de las políticas de apoyo e incentivos; las perspectivas de modernización e inte-

gración de la red; pero sobre todo el cambio de la ventaja financiera de las energías eólica y solar y de otras tecnologías en el futuro, proporcionen un fundamento suficiente para la construcción de un escenario de descarbonización total del sector energético. Este escenario, que se presenta más adelante, se basa en la premisa de que las condiciones del mercado ya permiten satisfacer una nueva demanda a través de energías renovables, y que las energías renovables, en forma de una creciente gama de tecnologías, serán capaces de desplazar la capacidad existente de combustibles fósiles y dominar el mercado de las nuevas instalaciones.

Por último, desde una perspectiva de generación de empleos, la industria de las energías renovables es mu-

cho más intensiva en mano de obra que las plantas de energía termoeléctrica altamente mecanizadas y con uso intensivo de capital, como las centrales que operan a base de carbón o gas y, por lo tanto, darían por resultado una creación de empleos significativamente mayor. Esto acarrearía beneficios adicionales para la economía regional. Por ejemplo, se ha estimado que en los Estados Unidos, la introducción de un estándar del 25% de energías renovables en 2025 generaría más del triple del número de empleos que los necesarios para producir una cantidad equivalente de electricidad a partir de combustibles fósiles (UCS, 2009).

Esto no quiere decir que no se requiera un marco de políticas de apoyo, regulaciones e incentivos. Por el contrario, incluso si se espera que las condiciones económicas favorezcan cada vez más las energías renovables a lo largo del tiempo, existen razones de sobra para promover la aceleración de este proceso de transición.

2.9.3 ALGUNAS BARRERAS A LA DESCARBONIZACIÓN DEL SECTOR ELÉCTRICO

Si bien este análisis ha encontrado un marco de políticas generalmente propicio, existen algunos obstáculos importantes cuya eliminación puede facilitar el ingreso más rápido de las energías renovables en el mercado de América Latina. Estos incluyen:

a) La voluntad política para avanzar en el proceso de integración de las redes en la región. Se considera que los costos y las cuestiones técnicas en torno a la integración de las redes no representan un obstáculo importante, ya que también están disponibles tecnologías y opciones para reducir las inquietudes ambientales y sociales. En vez de ello, en la mayoría de los casos lo necesario es una decisión por parte de los países vecinos hacia la integración —una decisión política—. La confiabilidad y la intermitencia serán preocupaciones mucho menores con el aumento de la disponibilidad de energía hidroeléctrica como respaldo y almacenamiento, una vez que se haya alcanzado la integración en cada país.

b) Los subsidios a los combustibles fósiles, en particular para carbón y gas, son un obstáculo importante para la entrada al mercado. El 1% estimado del PIB en subsidios a los combustibles fósiles en la región (alrededor de 500 mil millones de dólares por año) (Di Bella et al., 2015) no tienen ninguna justificación para continuar, especialmente dado que estos subsidios retrasan la eliminación de las externalidades negativas sobre el

clima. La eliminación de estos subsidios afectará a las industrias de gas y carbón en la región.

c) La no internalización de los costos climáticos de la generación basada en combustibles fósiles constituye una barrera importante. En ausencia de un mercado de carbono bien estructurado, algunos países, como México y Chile, han promulgado impuestos sobre el carbono, en parte como un esfuerzo para considerar estos costos. Sin embargo, la mayoría de los países de la región carecen de este mecanismo, y aquellos que están disponibles aún podrían estar en el rango inferior²¹ de los costos de los impactos climáticos.

d) La adopción de normas para permitir sistemas de energía eléctrica distribuida, incluyendo la medición neta en toda la región, promovería la implantación de instalaciones solares domésticas y comerciales, que podría convertirse en un elemento importante de la matriz energética regional. El uso generalizado de sistemas distribuidos afectará los servicios de transmisión mediante la reducción de sus márgenes de utilidades. La adopción de un conjunto de reglas coherentes en toda la región sería de gran ayuda en la implementación de sistemas distribuidos.

Sin embargo, se podría preguntar, ¿por qué las naciones de la región habrían de invertir en energías renovables hoy si existe la expectativa de mayores niveles de competitividad relativa más adelante? Los pioneros y las empresas que identifican y ocupan los nichos de mercado antes que la competencia tienen una ventaja en el largo plazo y están en una mejor posición para tomar ventaja de la evolución del mercado. Las iniciativas tempranas en esta dirección enviarán una señal al mercado para desarrollar los sistemas, componentes, cadenas de valor y capacidades institucionales y de ingeniería necesarios, preparando así los sistemas de producción económica y garantizando beneficios de valor agregado en otros sectores. Asimismo, cambiar ahora hacia una base de energía renovable podría afianzar precios bajos a largo plazo, que a menudo son inferiores a los de las fuentes tradicionales de energía y proporcionan cobertura contra futuras alzas y volatilidad en los precios de los combustibles fósiles.

²¹ Por ejemplo, el valor actual de los impuestos de carbono considerado en Chile es de aproximadamente 5 dólares por tonelada de CO₂e. Sin embargo, las proyecciones de los precios que se asumen comúnmente en los estudios del mercado de carbono considerando escenarios conservadores son mucho más altas, del orden de 20 dólares/tCO₂e para el periodo 2020-2040 (por ejemplo, ver Lucklow et al. (2015)). Además, las consecuencias financieras estimadas de las emisiones de CO₂e a la atmósfera de acuerdo con las estimaciones de Stern ascienden a 100 dólares/tCO₂e (Stern, 2006).



3. ELECTRIFICACIÓN MASIVA DEL SECTOR DEL TRANSPORTE

Si la generación eléctrica puede ser descarbonizada, ¿tiene sentido pensar en un cambio masivo simultáneo hacia vehículos eléctricos en el sector del transporte en América Latina a lo largo del tiempo? Un cambio hacia la electricidad en el sector del transporte reduciría el consumo global de energía en la región, al tiempo que se mantendría la misma cantidad de trabajo entregado por los combustibles fósiles. También tendría un impacto sobre la seguridad energética, ya que reduciría la necesidad de importaciones y/o evitaría el gasto de una expansión de la capacidad de refinación para atender la demanda futura. También podría ayudar a estabilizar la curva de carga de los generadores. Por último, podría hacer una gran diferencia en la calidad del aire en zonas urbanas y también podría promover la integración regional.

En este capítulo se revisan la situación actual y las tendencias a corto plazo del sector, así como las tecnologías y las condiciones económicas para hacer posible la descarbonización del sector del transporte. Existen varias otras medidas que podrían adoptarse para reducir la huella de carbono del transporte, pero estas están fuera del alcance del presente análisis. El informe se centra exclusivamente en la electrificación del transporte simultáneamente a una descarbonización de la matriz de generación eléctrica y en la diferencia neta que estas

acciones representarían en conjunto en la huella de carbono de la región. También se discuten los cobeneficios vinculados a mejoras en la calidad del aire, la eficiencia y la seguridad energética.

3.1 SITUACIÓN ACTUAL

El transporte fue responsable por el 27% del uso de la energía en la región en 2010 (IIASA, 2012), y dada la composición de los combustibles utilizados (ver la Figura 3.9), el transporte doméstico e internacional representó el 14,5% de las emisiones de GEI en 2012 (CAIT, 2015), correspondiente a aproximadamente 0,7 GtCO₂e por año (Vergara et al., 2013b). De 2000 a 2012, las emisiones de GEI relacionadas con el transporte crecieron casi el 49% (CAIT, 2015), la segunda mayor tasa de crecimiento sectorial (Tabla 1.1).

Bajo el escenario de línea base, se espera que continúe esta tendencia, impulsada por una combinación de una acelerada tasa de urbanización y tasas muy altas de motorización —entre las más altas del mundo—, las cuales se analizan más adelante en esta sección. La tendencia al alza de las emisiones también ha sido impulsada por una rápida expansión del transporte de carga, dado que la demanda de minerales, metales y alimentos en la re-

Figura 3.1 - Uso de energía proyectado en el sector de transporte

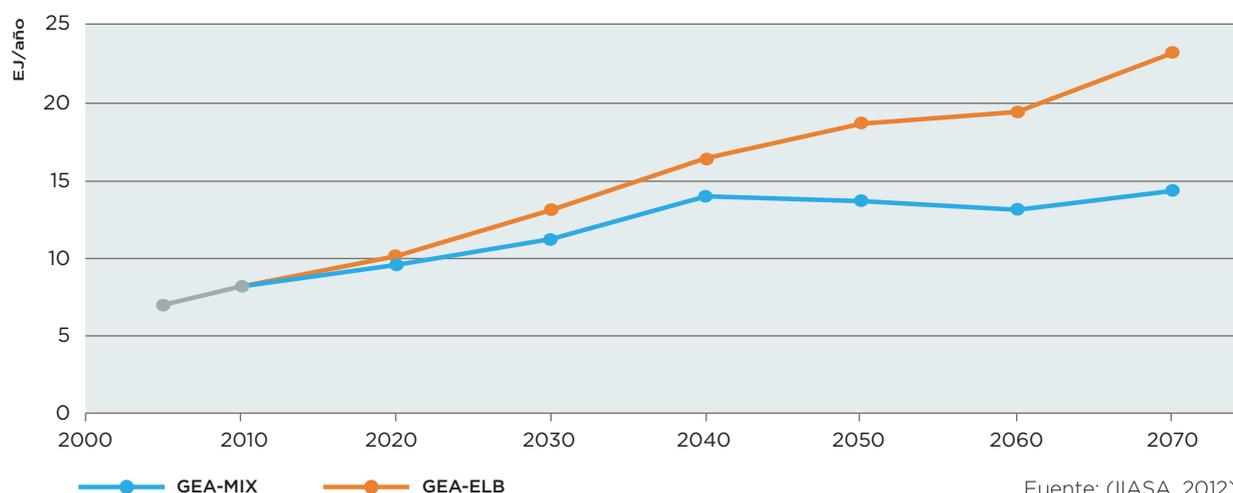
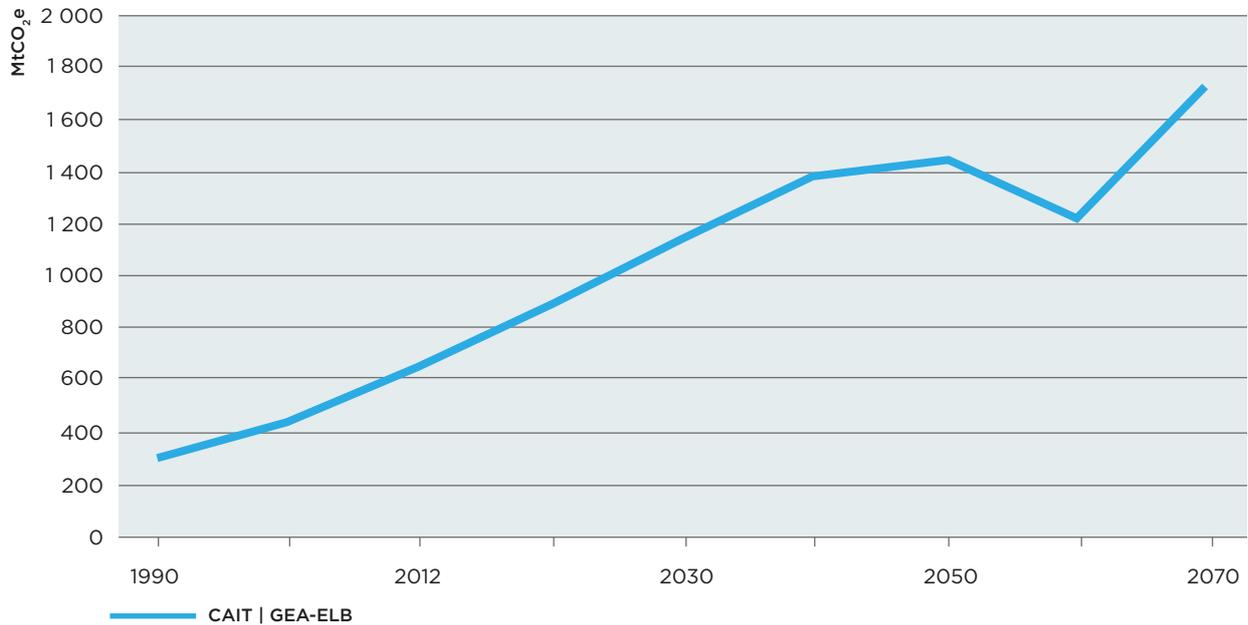


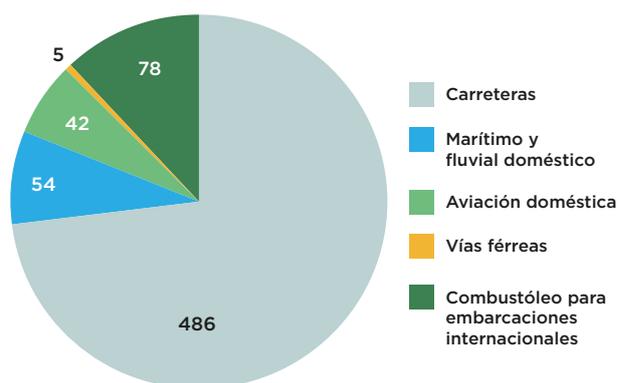
Figura 3.2 – Emisiones históricas y proyectadas (ELB) del sector de transporte



Fuente: Datos históricos de emisiones obtenidos de (CAIT, 2015), proyecciones basadas en las tasas de crecimiento de las emisiones futuras de IIASA-GEA (IIASA, 2012). Las diferencias entre la Figura 3.1 y la Figura 3.2 se derivan de un aumento significativo en la electricidad utilizada en el transporte bajo el escenario de línea base (ELB) (de 0,6 a 0,16 de 2050 a 2060), lo que da como resultado un ligero incremento en el consumo total de energía, mientras que la energía generada a partir de líquidos disminuyó de 17 988 a 17 689 EJ (IIASA, 2012).

gión ha crecido²² y el comercio nacional e internacional ha aumentado.

Utilizando la base de datos IIASA-GEA (IIASA, 2012) y un rango de posibles escenarios futuros²³ (Figura 3.1), se ha proyectado la demanda de energía de las actividades de transporte para mitad de siglo. En estas condiciones (GEA-ELB y GEA-MIX), se espera que la demanda de energía del transporte esté en el rango de 14 a 19 EJ en 2050. El amplio rango de escenarios futuros refleja incertidumbre acerca de la evolución futura de las tasas de urbanización, las tecnologías del transporte, las tasas de motorización y los cambios modales. Un aumento neto de las necesidades energéticas de la magnitud asociada a las condiciones ELB, si estas siguieran atendándose mediante la utilización de combustibles fósiles, ejercería una presión significativa en la capacidad de

Figura 3.3 – Emisiones de CO₂ del sector de transporte en ALC en 2010 (en MtCO₂e).

Fuente: Transporte de pasajeros y carga por carretera de la Tabla 3.1; combustóleo doméstico para transporte marítimo de (CAIT 2015); combustibles para aviación excluyendo México de (IEA, 2015); consumo de diésel en ferrocarriles de (ANTF, 2011); y combustible para embarcaciones internacionales (CAIT, 2015).

²² La demanda de materias primas en América Latina ha crecido constantemente desde el año 2000 pero ha sufrido una disminución reciente como resultado del menor ritmo de crecimiento de economías importadoras tales como China.

²³ En el Anexo 1 se incluye una descripción detallada de los escenarios.

Tabla 3.1 – Tamaño y emisiones estimados de la flota de vehículos de transporte terrestre nacionales en América Latina.

Medio	No. de vehículos (millones)	Km por año (miles)	Eficiencia de combustible (km por l)	MT CO ₂ e
Vehículos privados	59,4	12	11	150
Taxis	2,2	60	11	27
Motocicletas	10,7	12		5
Autobuses estándar	0,6	40	3,8	12
Autobuses articulados	0,02	60	3,8	1
Minibuses	1,0	40	2,8	33
Camiones ligeros	5	13	3,2	47
Camiones de carga media	5,4	22	2,7	77
Camiones de carga pesada	2,5	50	2,5	134
Total	86,8			486

Fuentes: (CAF, 2010) y (CEPROEC, 2015) para transporte urbano, y (Barbero, 2014) y (CEPROEC, 2015) para transporte de carga. Factores de emisión obtenidos de de EPA (2015).

refinación o encausaría los incrementos importantes a las importaciones de combustible.

Según el GEA-ELB, la contribución de GEI del transporte será de 1,4 GtCO₂e por año hasta el año 2050 (Figura 3.2)²⁴. Esto refleja un futuro en el que continúan las tendencias actuales sin cambio alguno. Bajo este escenario, se espera que las emisiones alcancen un nivel máximo y luego disminuyan significativamente después de 2040, cuando se hayan implementado ampliamente las tecnologías eléctricas y de consumo eficiente de combustibles.

3.2 CARACTERIZACIÓN DEL SEGMENTO DE CARRETERAS DEL SECTOR DEL TRANSPORTE

La mayoría de los combustibles utilizados por el sector de transporte y las emisiones de GEI asociadas a este están vinculados al transporte por carretera, tanto de pasajeros como de carga. De estos, la mayoría están relacionados con las zonas urbanas. Las emisiones derivadas de la aviación internacional y el transporte marítimo

son responsables del 12% de las emisiones²⁵; el transporte fluvial y marítimo nacional representa aproximadamente el 8%; y la aviación y el transporte ferroviario, el 6% y 1%, respectivamente (Figura 3.3)²⁶. Se estima que el total de las emisiones del transporte en América Latina y el Caribe es de alrededor de 0,67 GtCO₂e por año.

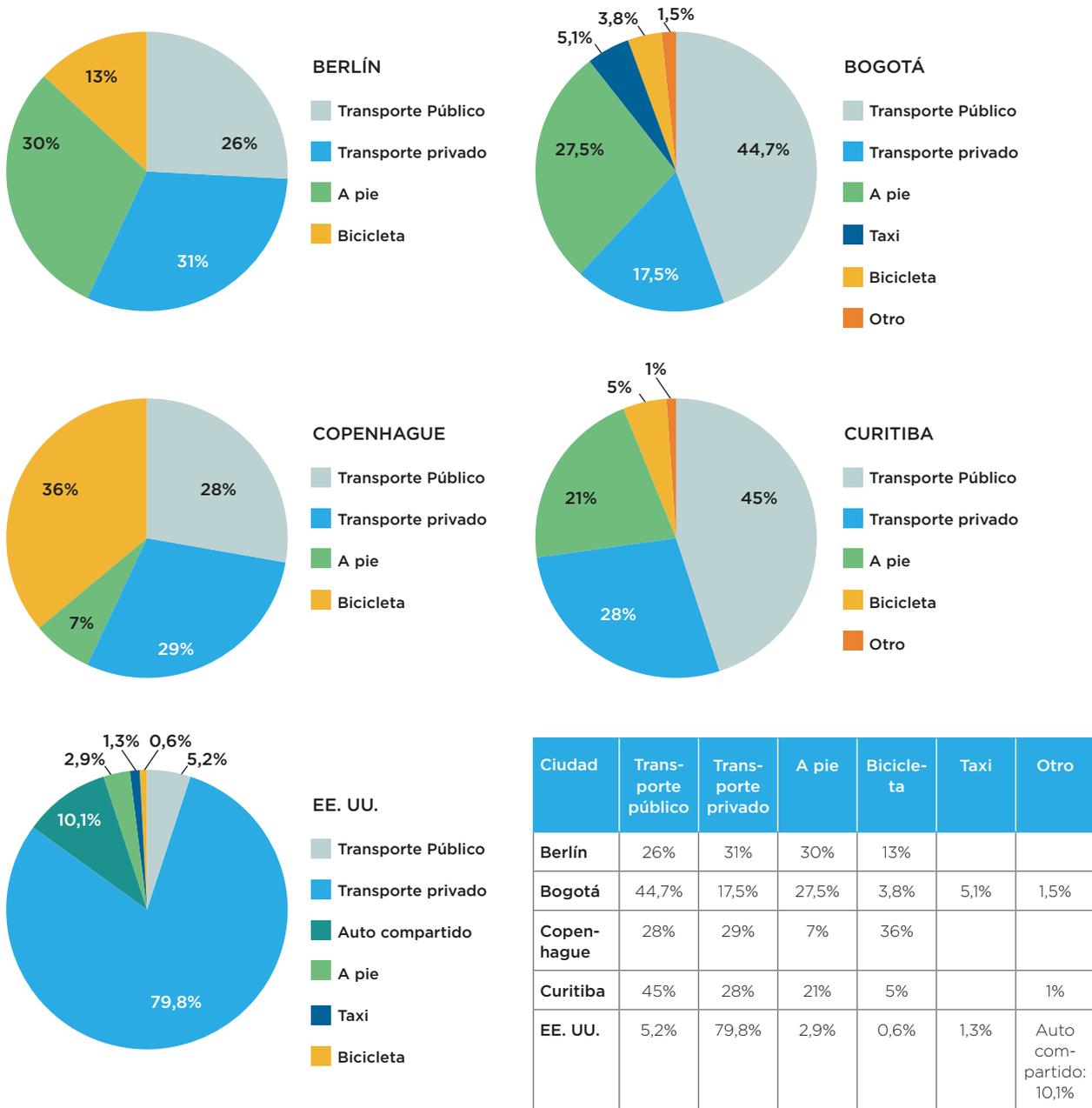
La Tabla 3.1 resume un estimativo de las emisiones de carbono asociadas a los vehículos de transporte por carretera en la región, por tipo de flota. Los datos incluyen los segmentos de transporte de pasajeros y de carga por carretera en términos del número de vehículos y las emisiones asociadas. La huella de carbono está dividida casi en partes iguales entre los segmentos de transporte de pasajeros y de carga. Sin embargo, en el segmento de transporte de pasajeros, el 47% de las emisiones de carbono está vinculado a la flota de vehículos de pasajeros privados. En el segmento de vehículos de carga, la mayoría de las emisiones está relacionada con un número relativamente pequeño de camiones de carga pesada y de remolque (tráileres). La concentración de las emisio-

²⁴ La proyección IIASA también asume que después del año 2075 los niveles de electrificación en el transporte estabilizarán las emisiones derivadas de este sector.

²⁵ Las emisiones asociadas a los vehículos de transporte internacional reciben un tratamiento diferente al de las emisiones domésticas, dado que son difíciles de atribuir a países específicos y se estiman con base en la ubicación del reabastecimiento de combustible (CAIT, 2015).

²⁶ Las emisiones para el transporte marítimo y aéreo se han calculado a partir del consumo total de combustible para los vehículos de aviación y marítimos locales/domésticos.

Figura 3.4 – Participación modal del transporte (en viajes de pasajeros) en áreas urbanas.



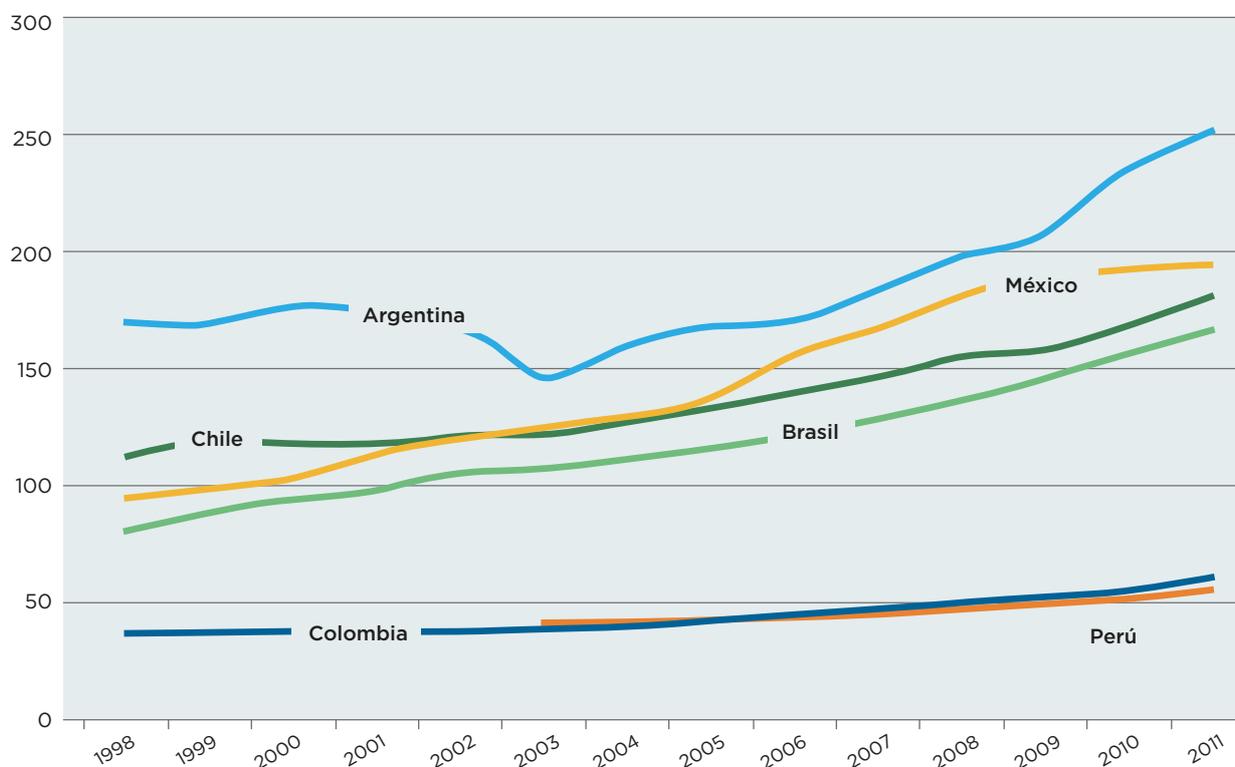
Fuentes: (Berlín, 2013), (Bogotá, 2013), (Curitiba, 2011), (Copenhague, 2013), (USA, 2012) recalculado.

nes de GEI del sector del transporte en las zonas urbanas amerita un análisis detallado.

La flota de automóviles en la región es responsable por aproximadamente el 37% del total de las emisiones del transporte. El transporte público (principalmente autobuses) representa menos del 10%. Sin embargo, la mayoría de los viajes de pasajeros en las zonas urba-

nas se realizan utilizando el transporte público (Figura 3.4). Desde una perspectiva de participación modal, y a pesar de la gran proporción de vehículos de pasajeros en la flota, el transporte urbano en la región todavía se encuentra más cerca del patrón de movilidad en transporte público de las ciudades del norte de Europa que al modelo de uso intensivo de vehículos privados de los EE. UU. o Canadá. En realidad supera la proporción

Figura 3.5 – Evolución de tasas de motorización en la región (vehículos por 1000 habitantes)



Fuente: (Barbero, 2014)

de pasajeros transportados por el transporte público de cualquiera de estas dos regiones. El mantenimiento de un alto porcentaje de viajes de pasajeros en el transporte público es esencial para mantener la eficiencia energética del transporte en la región.

La dependencia comparativa del transporte público y el grado de urbanización en la región se combinan para producir niveles de emisiones del transporte per cápita relativamente bajos en América Latina (0,95 t per cápita en 2013 (World Bank, 2015), no muy distintos de los niveles de emisión en el norte de Europa. Los avances que optimicen y amplíen este segmento del transporte urbano tendrán como resultado un mejor uso del espacio público y de energía y, con base en las tecnologías que se utilizan actualmente, una menor huella de carbono tanto por pasajero como en el total.

La flota de camiones de carga aporta la segunda mayor contribución a las emisiones de carbono. En particular, los camiones de carga pesada y de tamaño mediano, aunque constituyen un segmento relativamente pequeño, representan cerca del 53% de las emisiones nacionales. Mejoras en la eficiencia y la eventual electrificación

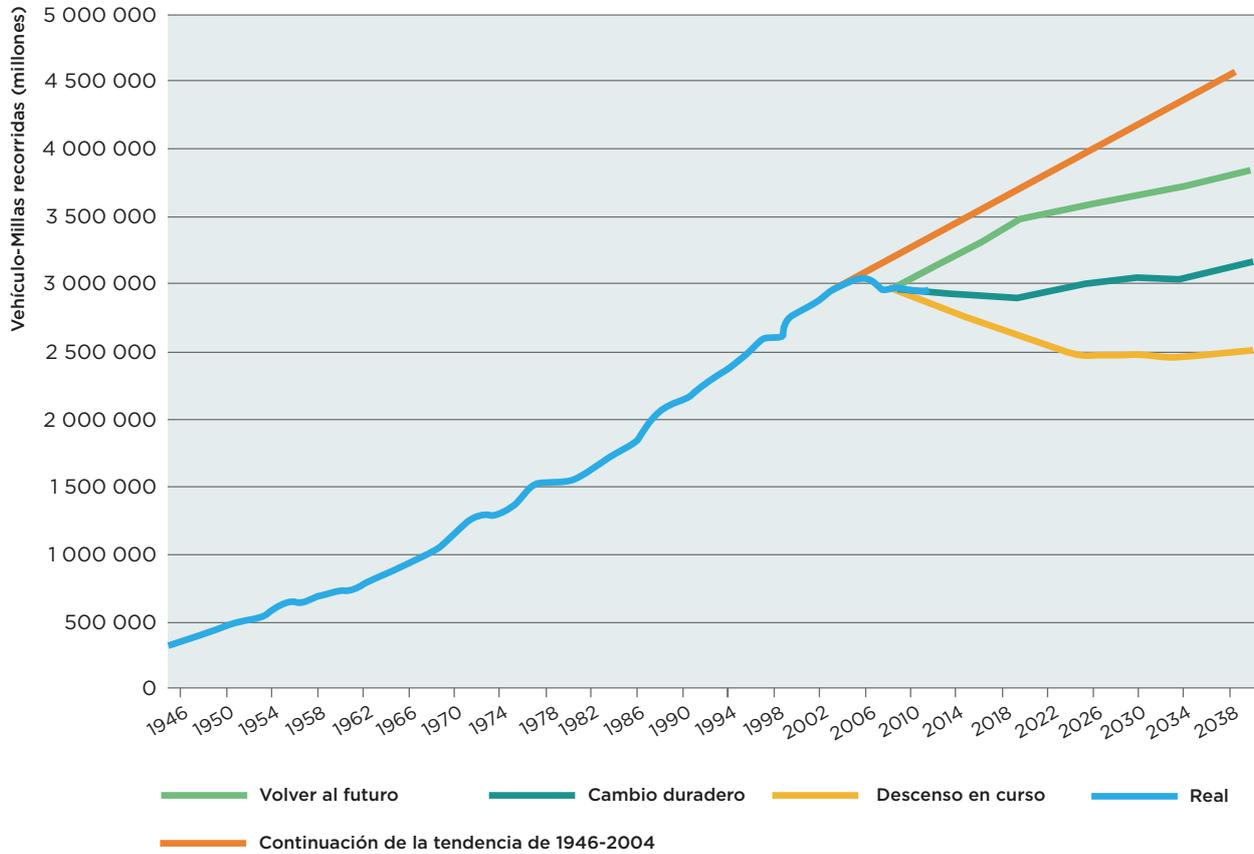
de este segmento tendrían un efecto significativo sobre las emisiones.

3.2.1 TASAS DE MOTORIZACIÓN

A pesar del impacto positivo de los sistemas de transporte público en algunas de las áreas urbanas más grandes de la región, ha habido una tendencia general hacia un sistema de transporte más demandante de energía y asociado a una mayor emisión de GEI. Esto puede interpretarse como el resultado de la acelerada urbanización y el aumento de las tasas de motorización. Actualmente la región es la más urbanizada de todo el mundo (el 79% de la población vive en ciudades (World Bank, 2014a)). También está atravesando por un período intenso de motorización, con la mayor tasa de motorización a nivel mundial, alrededor de 4,5% al año. Se calcula que desde el año 2000 el número de automóviles en la región ha aumentado de 100 a 170 por cada 1000 habitantes (Figura 3.5), y esta tendencia continúa.

En combinación con el crecimiento demográfico, los efectos del aumento de las tasas de motorización han sido particularmente notables en las principales zonas urbanas, donde contribuyen no solo al aumento en el

Figura 3.6 – Millas totales recorridas por los vehículos en los Estados Unidos bajo escenarios de crecimiento futuro de viajes, 1946-2040.



Fuente: (Dutzik & Baxandall, 2013)

uso de combustible, sino también a los aumentos en las emisiones de GEI y los contaminantes locales transportados por el aire, así como a la congestión vial. Parte del aumento de la motorización en zonas urbanas está asociado a un cambio modal de autobuses a vehículos ligeros, pero el factor más importante es el aumento de los vehículos de pasajeros por habitante en las grandes zonas urbanas de la región, similar a lo observado en ciudades de los Estados Unidos y Asia.

La Tabla 3.2 ilustra este aspecto. La Ciudad de México, São Paulo, Bogotá y Santiago se encuentran entre las ciudades que han experimentado un aumento importante de la motorización a partir de comienzos de siglo. Es difícil visualizar la continuación de estas tendencias a costa del espacio público (congestión), la exposición a los contaminantes transportados por el aire, la productividad y la calidad de vida. También es difícil prever

las grandes áreas urbanas con el doble o el triple del número de vehículos en sus flotas actuales en la segunda mitad de este siglo. Evidentemente, esta no es la ruta a seguir.

Aun así, esto podría suceder. Los patrones de movilidad actuales muestran claramente que muchos países y ciudades de la región de América Latina y el Caribe se encuentran en una etapa previa a la motorización masiva (Figura 3.4, Figura 3.5). Se espera que la motorización masiva se produzca en un determinado nivel de ingresos. Debido a las tasas de urbanización relativamente altas en América Latina y el Caribe, puede suponerse que este proceso de motorización masiva llegará a niveles entre los de Europa (600 automóviles por cada 1 000 habitantes) y América del Norte (más de 800 vehículos por cada 1 000 habitantes). Parece probable que, dadas las tendencias actuales, varios de estos países podrían

alcanzar su punto de motorización masiva a mediados de este siglo (debido al crecimiento económico fuerte y sostenido algunas de las subregiones de México, Brasil, Chile y Argentina —aunque no todas— han alcanzado ya este estado).

Los cambios en el comportamiento y los avances de la tecnología podrían alterar esta tendencia. Los patrones están cambiando en los Estados Unidos y Europa, con reducciones en las millas recorridas por vehículo y reducciones en las ventas de automóviles nuevos (Figura 3.6; Dutzik & Baxandall, 2013). Los pronósticos del Departamento de Transporte de EE. UU. siguen asumiendo incrementos constantes en el manejo de automóviles, a pesar de la experiencia de la última década, pero estos pronto podrían ser revisado para indicar que la era de los aumentos continuos en el manejo de automóviles, para ser sustituida por una preferencia por el transporte público y opciones no motorizadas.

Con las grandes tasas de urbanización en América Latina, la promesa de sistemas de autobuses de tránsito rápido cómodos y funcionales (ver más adelante) y un uso más intensivo de alternativas no motorizadas, los pronósticos anteriores de tasas de motorización altas podrían no concretarse, siendo sustituidos por el mantenimiento, aumento y mejoras en los sistemas de transporte público apoyado por transporte no motorizado y mejoras en la disposición de los espacios públicos. Para que esto suceda, deben ofrecerse opciones de transporte público cómodas, seguras, eficientes y rentables en una escala suficientemente grande.

3.2.2 SISTEMAS DE AUTOBUSES DE TRÁNSITO RÁPIDO

Un avance hacia una mayor eficiencia energética y racionalización del transporte es el surgimiento de los Sistemas de Autobuses de Tránsito Rápido (ATR) en la región. En esencia, los ATR asignan un espacio público preferente a los autobuses como una forma de transporte público. Estos sistemas han demostrado ser muy rentables, permitiendo la movilidad deseada a niveles comparables a los de los sistemas de metro y ferrocarril, pero a una fracción del costo y con una implementación bastante rápida y menores necesidades de infraestructura. En la Tabla 3.3 se comparan las diferentes estimaciones para los sistemas de transporte público alternativos en Bogotá, donde las tres modalidades están siendo consideradas. Tanto el metro como el tren ligero son opciones que funcionan con energía eléctrica.

Tabla 3.2 – Tasas de motorización en ciudades selectas en la región (automóviles por habitante).

Region	Tasa de Motorización (2000)	Tasa de Motorización (2013)
ALC	0,10	0,17
Ciudad de México ^{a)}	0,39	0,54
Nuevo León ^{a)}	0,25	0,49
Bogotá ^{b)}	0,31 (1995)	0,54
Sao Paulo ^{c)}	0,29 (1997)	0,59
Santiago ^{d)}	0,15 (2001)	0,19 (2009)

Fuente: ^{a)} en (INEGI, 2012); ^{b)} (Gélvez & Obando, 2014); ^{c)} (CAF, 2011; Moreira & Dourado, 2014); ^{d)} (Justen et al., 2012)

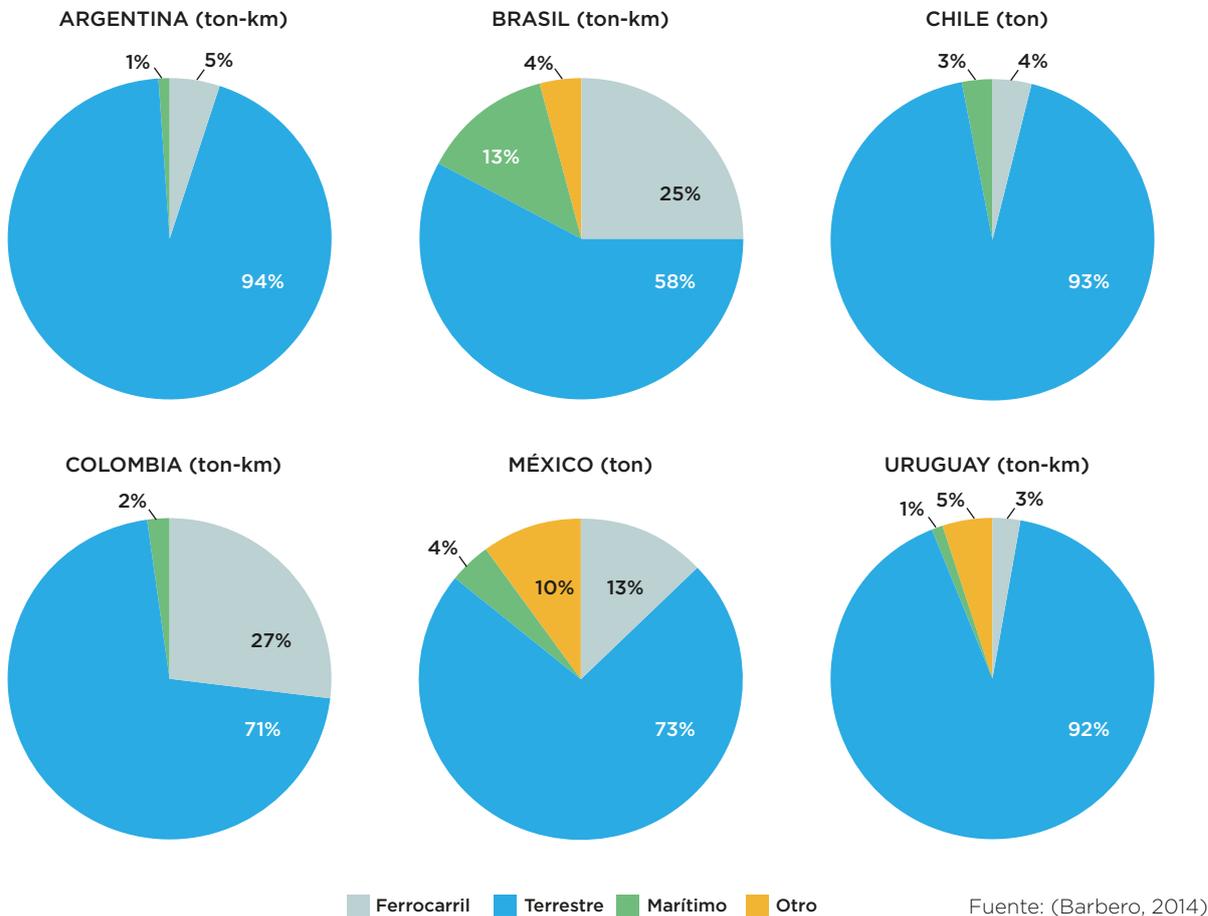
Tabla 3.3 – Rentabilidad de distintos medios de transporte masivo en áreas urbanas (ejemplo de Bogotá).

Medio	Millones de dólares por km	Pasajeros por hora
ATR	2-10	40 000
Sistemas de metro	200+	60 000
Tren urbano	5-20	20 000

Fuente: Datos de ATR (2015) para costos de infraestructura de sistemas ATR en Bogotá; cálculos reportados para sistemas de metro y tren completos a partir de proyectos actuales para el sistema de metro, ruta 1, y para el tren ligero a lo largo de la Avenida Boyaca.

Los sistemas ATR ya constituyen un modo de transporte central en toda la región, y en ciudades como Bogotá y Curitiba son fundamentales para el sistema de transporte urbano. En otras ciudades, como Quito, Lima y la Ciudad de México, los ATR también han captado una proporción significativa y creciente de los viajes de pasajeros. Actualmente existen 62 ATR en operación en la región, el mayor conjunto de todo el mundo, que en total transporta a alrededor de 20 millones de pasajeros-km por día en un sistema que comprende 1 700 km de longitud (BRTdata, 2015). Los ATR no solo están siendo implementados en otras grandes ciudades de América Latina, sino también en Asia, África e incluso en los Estados Unidos y Canadá. Desde una perspectiva de emisiones de gases de efecto invernadero, los ATR que operan con combustibles fósiles son sistemas

Figura 3.7 – Composición modal de transporte de carga en países selectos de América Latina y El Caribe.



bastante eficientes. En comparación con otros medios de transporte no eléctricos, los ATR producen menores niveles de emisiones de carbono. De cualquier manera, los sistemas de autobuses de tránsito rápido solo comprenden un pequeño segmento del transporte de pasajeros en las zonas urbanas. Se requeriría una expansión considerable de estos sistemas para que alcancen todo su potencial.

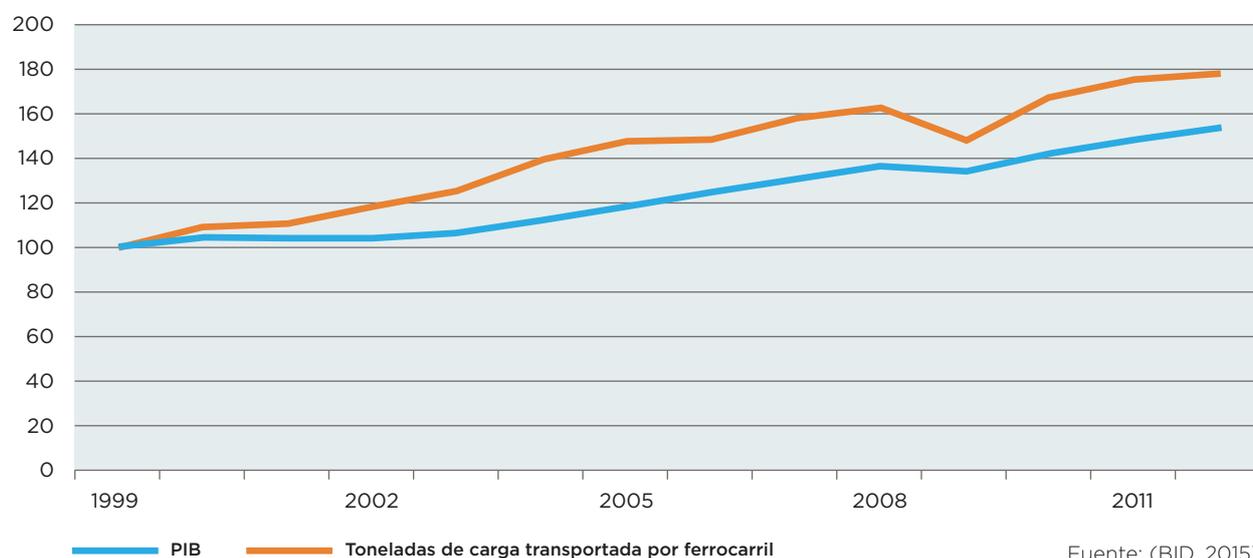
Mirando hacia adelante, los cambios organizativos y de gestión que han surgido a partir del desarrollo de los ATR podrían utilizarse como una plataforma para iniciar la electrificación del transporte. Existe la tecnología tanto para los componentes rodantes como para las estaciones de carga. La competitividad económica de la opción eléctrica está aumentando constantemente, y podría esperarse que ATR eléctricos sean parte de un futuro próximo. Con ajustes marginales en la infraestructura, podría iniciarse la electrificación del transporte a través del segmento de autobuses de tránsito rápido.

3.2.3 TRANSPORTE DE CARGA

En la región de América Latina y el Caribe, las mercancías a nivel nacional son transportadas mayormente por carretera mediante el uso de camiones de carga ligera y pesada, que principalmente consumen combustible diesel. Por otra parte, el movimiento de mercancías entre países tiene un componente marino importante, que en su mayor parte opera con combustóleo para embarcaciones marinas. El movimiento de carga total anual estimado es de 4,5 millones de toneladas por año, de las cuales aproximadamente dos tercios son transportadas a nivel nacional (Barbero, 2014).

El transporte de carga por carretera en América Latina no está bien documentado. La flota es muy heterogénea, poco estandarizada en los mercados internos y mucho menos a nivel internacional. Además, el promedio de la flota es antigua (Guerrero y Abad, 2013), lo cual contribuye a los estándares relativamente bajos de eficiencia de consumo de combustible y emisiones. La compo-

Figura 3.8 – Crecimiento del transporte ferroviario en la región



ción modal del transporte de carga en algunos países de la región se muestra en la Figura 3.7. El transporte por carretera representa del 58% al 92% del transporte de carga en toneladas-km o toneladas en los países indicados.

Las perspectivas para la modernización de la flota de camiones de carga se ven obstaculizadas por la atomización de su propiedad, que incluye un gran número de propietarios-operadores con una o dos unidades y un número pequeño de operadores de mediana y gran escala. La capacidad de la flota también varía, con un rango que incluye desde camiones ligeros hasta tráileres de doble remolque. Los camiones pesados constituyen una fracción desproporcionada de la huella de carbono del transporte en la región²⁷. Se estima que los camiones pesados, aunque solo representan el 2,5% de la flota total, emiten el 28% de las emisiones del transporte interno relacionadas con las carreteras (Tabla 3.1).

3.2.4 TRANSPORTE FÉRREO

A partir de una base relativamente pequeña, el movimiento de mercancías por ferrocarril ha mostrado un

crecimiento más rápido que el PIB o el consumo de energía en la región (Figura 3.8). La mayor parte de este crecimiento ha sido inducida por el transporte de minerales, metales, cereales, carbón y otros combustibles fósiles destinados a los mercados de exportación. Cerca del 90% de todas las mercancías transportadas por ferrocarril se concentran en solo tres países: Brasil, México y Colombia.

Actualmente existen 38 empresas ferroviarias en la región, de las cuales 32 son privadas. Las diez empresas más grandes se encuentran en Brasil (6), México (3) y Colombia (1). Estas empresas transportan cerca del 92% del total en términos de toneladas-kilómetro (Barbero, 2014). Además, la mayor parte del transporte se concentra en los productos de la minería (62%), mientras que los cereales y otros productos alimenticios se encuentran en un distante segundo lugar (13%). La mayoría de las líneas ferroviarias utilizan unidades que funcionan con diesel.

Los ferrocarriles tienen una participación relativamente pequeña en el transporte en la región. Sin embargo, desde una perspectiva de eficiencia energética, los ferrocarriles están entre las mejores alternativas para el transporte de pasajeros y carga. Por consiguiente, los ferrocarriles son muy eficientes en cuanto a las emisiones de carbono, ya que aportan menos del 1% de las emisiones de CO₂ del sector del transporte, y la expansión de su participación en el transporte de carga en la región

²⁷ La Agencia de Protección Ambiental (EPA) y el Departamento del Transporte de EE. UU. propusieron normas en 2015 para mejorar el kilometraje de camiones de carga pesada en un 24% al tiempo que se reducen sus emisiones de GEI en un porcentaje similar para el año 2017 (<http://www.theicct.org/blogs/staff/cleaning-big-trucks-deliver-cleaner-future>). Los ahorros totales de combustible bajo el programa son casi iguales a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) asociadas con el uso de energía en todos los hogares de EE. UU. en un año.

contribuiría a desplazar las emisiones del transporte por carretera. Asimismo, la electrificación de los ferrocarriles se conoce perfectamente, al igual que los costos asociados al cambio en la infraestructura.

3.2.5 TRANSPORTE MARÍTIMO

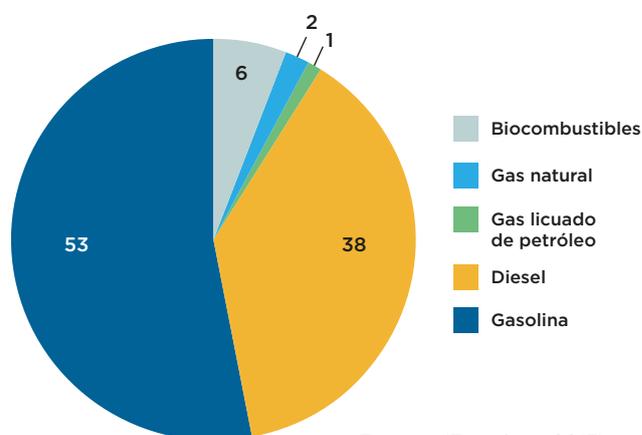
El transporte marítimo constituye la columna vertebral de la economía globalizada del mundo. Es un importante contribuyente de las emisiones globales de CO₂ (UNCTAD, 2012) y, con todo, es una de las opciones de transporte menos intensivas en carbono por tonelada-km. A nivel mundial, se espera que el transporte marítimo aumente su participación del uso de energía en el sector del transporte como resultado del crecimiento en el comercio internacional. UNCTAD (2012) pronostica un aumento casi del doble en las emisiones derivadas del transporte marítimo en relación con los medios de transporte a nivel mundial en 2050.

Sin embargo, no existen datos confiables sobre las operaciones de transporte marítimo en la región. El transporte marítimo interno²⁸ constituye un modo de transporte regional menor, con una contribución estimada de entre el 1% y el 5% en algunas de las economías más grandes de la región (Barbero, 2014). La excepción es Brasil, donde el transporte marítimo juega un importante papel.

Existen enormes posibilidades para reducir las emisiones del transporte marítimo. La reducción potencial calculada por DNV (2010) es de aproximadamente el 50%, y la mitad de esta puede lograrse sin involucrar costos netos. La evaluación realizada por DNV (2010) concluye que en el año 2030 las emisiones de CO₂ pueden reducirse en un 30% por debajo de la línea de base de un modo rentable, y casi en un 60% si se incluyen todas las medidas señaladas. Entre las más efectivas se incluyen reducciones en la velocidad, recuperación del calor producido, y medidas relacionadas con las hélices. Ya están comenzando a demostrarse motores híbridos (diesel-eléctrico) en buques de pasajeros y de transporte de carga en el norte de Europa, con importantes ahorros de energía (Scandlines, 2015). La Unión Europea ha establecido un Grupo de Trabajo de Transporte Marítimo para investigar opciones adicionales encausadas a reducir las emisiones.

²⁸ Los combustibles internacionales para los transportes marítimo y aéreo representan un total de 78 MtCO₂e adicionales (Figura 3.3). No es posible asignar la participación real de estas 78 MtCO₂e entre el transporte marítimo y el aéreo.

Figura 3.9 - Tipo de combustibles en el sector de transporte en América Latina y el Caribe en 2013.



Fuente: (Enerdata, 2015)

3.2.6 TRANSPORTE AÉREO

El transporte aéreo nacional es responsable de una proporción creciente de las emisiones del transporte, estimadas en 42 MtCO₂e en 2010 (Figura 3.3). Posee la mayor huella de carbono por pasajero-km de todos los medios de transporte. Asimismo, es un sector en el que las soluciones para la reducción de los GEI actualmente son más difíciles de visualizar. Se han realizado esfuerzos para producir combustibles de aviación con un menor contenido de carbono, incluyendo propuestas para biocombustibles, por ejemplo, por la Plataforma Europea de Tecnología de Biocombustibles, así como para combustibles reciclados (gases residuales derivados de la fabricación del acero). Sin embargo, de manera combinada se ha hecho muy poco para controlar las emisiones. Para los fines de este análisis, la reducción de las emisiones de GEI procedentes de la aviación no se considera parte de la ruta de descarbonización. Se asume que no habrá ningún cambio en las emisiones previstas bajo las condiciones de ELB en 2050.

3.2.7 COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS EN EL TRANSPORTE

Otra característica del sector del transporte en la región es el uso de los combustibles no fósiles. En Brasil se han estado utilizando etanol y, en cierto grado, también aceites vegetales trans-esterificados ("biodiesel") desde la década de 1970. Hoy en día, varios otros países también incluyen biocombustibles en su mezcla. La Figura 3.9 muestra el uso actual de combustibles de transporte por tipo en toda la región. Alrededor del 6% del uso total de combustible corresponde a biocombustibles. Sin embargo, existe un considerable debate en la literatura acerca de la contribución neta de los biocombustibles

para reducir las emisiones netas de gases de efecto invernadero. Algunos estudios (Searchinger et al., 2008) han llegado a la conclusión de que los biocombustibles pueden terminar aumentando las emisiones²⁹. Otros análisis apuntan a una reducción neta bajo circunstancias específicas (Farrell et al., 2006; Martin et al., 2015). El uso del gas natural en el transporte también aporta una contribución significativa, principalmente en las zonas urbanas y en los vehículos ligeros, pero puede ser un contribuyente importante a las emisiones de CO₂ equivalente, en particular si las emisiones fugitivas (fugas) son significativas. La energía eléctrica también es utilizada en el transporte, principalmente en los sistemas de metro y tren ligero en zonas urbanas.

3.3 IMPACTO DE LAS OPERACIONES DE TRANSPORTE EN LA CALIDAD DEL AIRE

La mayoría de los compuestos tóxicos en el aire y otros contaminantes atmosféricos en zonas urbanas pueden relacionarse con fuentes móviles. Por ejemplo, un sistema de transporte que se basa en diesel puede generar emisiones importante de partículas, a menos que estas sean controladas estrictamente en los sistemas de escape de los vehículos. Las partículas son responsables del aumento en las tasas de morbilidad y mortalidad en las zonas urbanas, así como en las pérdidas de productividad. Los óxidos de nitrógeno (NO_x) y los compuestos orgánicos volátiles (COV) contribuyen al smog químico y también han sido vinculados a diversos impactos en la salud. El carbón negro, emitido como parte de la materia particulada, está relacionado con el clima y puede producir aumentos sustanciales en el albedo en zonas que rodean a las grandes ciudades (Vergara et al., 2013b). También se ha demostrado que otras emisiones procedentes del sector del transporte, incluyendo NO_x, CO y COV, afectan a la salud humana³⁰. Sin embargo, los peligros asociados con el ozono y PM_{2.5} son los más importantes en términos de sus efectos sobre la salud humana.

La reducción de la contaminación del aire en zonas urbanas tendrá cobeneficios importantes en la calidad del aire y la salud humana, que pueden ser estimados

en términos económicos y así influir en las decisiones económicas. Se espera que las reducciones en los contaminantes del aire den lugar a beneficios económicos significativos en términos de mejoras en la salud, incluyendo:

- i. reducción de los costos del tratamiento de enfermedades (COI);
- ii. reducción de las pérdidas en la productividad;
- iii. costos evitados de la reducción de los efectos agudos y crónicos de la morbilidad;
- iv. costos evitados de la reducción de los efectos agudos y crónicos de la mortalidad.

Se han realizado varios estudios para evaluar el impacto de los contaminantes del aire generados por fuentes móviles en la salud, y también para asignar un valor económico a estos impactos. En un estudio de la Ciudad de México se concluyó que el cumplimiento con las normas de la OMS sobre calidad del aire podría traducirse en costos evitados equivalentes al 2% del PIB de la ciudad (World Bank, 2002). Se han realizado muchas otras evaluaciones sobre diversos aspectos en relación con este tema (por ejemplo, Mena-Carrasco et al., 2012; Istamto et al., 2014; Falcocchio & Levinson, 2015).

En un análisis reciente (OECD, 2014) se han examinado los costos de la contaminación atmosférica provenientes del transporte por carretera en la OCDE y otros países grandes. Se concluye que el costo del impacto de la contaminación atmosférica en la salud en los países de la OCDE (incluyendo decesos y enfermedades) fue de aproximadamente 1,7 billones de dólares en 2010. Este análisis también indica que las evidencias disponibles sugieren que el transporte por carretera representa aproximadamente el 50% de este costo en la OCDE, equivalente a cerca de 1 billón de dólares. El estudio concluye que en México, el total de los costos de la contaminación del aire en 2010 ascendieron a aproximadamente 39 mil millones de dólares, y el 50% de estos costos estuvieron relacionados con el transporte por carretera. Además, se estima que, desde una perspectiva de la calidad del aire, la mayoría de los contaminantes del aire que merecen atención están asociados con diésel (el 91% de PM_{2.5} y el 95% de NO₂ fueron atribuidos a vehículos diesel en Londres (Moore & Newey, 2012). Sobre esta base, se ha realizado una estimación de las consecuencias económicas de la contaminación del aire por kilómetro recorrido por los vehículos de diesel y de gasolina. Los resultados se muestran en la Figura 3.13 y los cálculos se incluyen en el Anexo IV.

²⁹ Searchinger et al (2008), utilizando un modelo agrícola mundial para estimar las emisiones derivadas de los cambios en el uso de la tierra, encontraron que el etanol de maíz, en vez de generar ahorros del 20%, casi duplica las emisiones de gases de efecto invernadero en el curso de 30 años e incrementa los GEI durante 167 años.

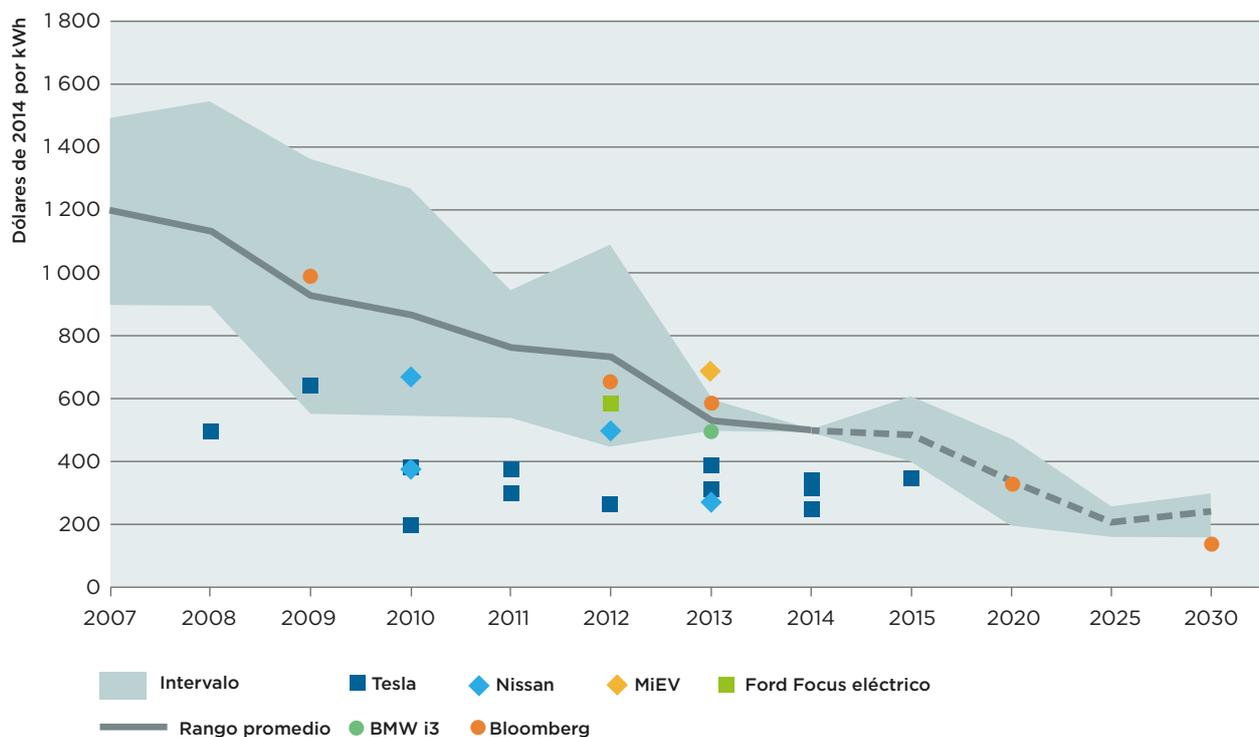
³⁰ Para un tratamiento detallado de la relación entre la contaminación del aire y el transporte, ver, por ejemplo (Gorham, 2002) y (OECD, 2014).

Tabla 3.4 - Transformación prospectiva del transporte de carga.

Segmento de la flota	Disponibilidad de la tecnología	Competitividad económica	Impacto en la huella de carbono	Comentarios
Automóviles de pasajeros y camiones ligeros	Inmediata	Corto plazo (menos de cinco años)	Grande (más de 100 Mt CO ₂ e por año)	Vehículos eléctricos ya competitivos en mercados grandes. Fabricantes grandes con interés en la producción y venta de vehículos eléctricos.
Autobuses	Corto plazo	Mediano plazo (menos de 10 años)	Medio (entre 10 y 1000 MtCO ₂ e por año)	Vehículos eléctricos ya se producen para mercados piloto en China, Escandinavia. En América Latina se están evaluando o introduciendo vehículos en Bogotá, Sao Paulo, Ciudad de México.
Camiones de carga media y pesada	Mediano plazo	Largo plazo (más de 10 años)	Grande	Tecnología en desarrollo utilizando los mismos sistemas que los autobuses articulados. Es probable que los sistemas híbridos se implementen primero.
Ferrocarriles	Inmediata	Inmediata	Pequeño	Ya disponibles comercialmente e implementados. Las cuestiones económicas de la cobertura en redes de las rutas ferroviarias es uno de los principales obstáculos.
Embarcaciones marítimas	Mediano plazo	Largo plazo	Medio	Tecnología híbrida ya implementada en rutas comerciales en Escandinavia.

Elaboración de los autores.

Figura 3.10 - Evolución y costos proyectados de las baterías de iones de litio.



Fuente: (Bloomberg, 2011; RMI, 2014; Nykvist & Nilsson, 2015)

3.4 ELECTRIFICACIÓN MASIVA DEL TRANSPORTE

La intensidad relativamente baja de carbono del sistema de energía; la expectativa de reducir aún más sus emisiones de carbono a medida que se viabilizan más opciones de energía renovable; y los posibles costos evitados en términos de salud humana de la contaminación del aire, proporcionan argumentos para analizar la opción del transporte eléctrico. Si fuera factible, la electrificación de todo el sector tendría un impacto significativo en las emisiones de dióxido de carbono de la región. También conllevaría mejoras en la calidad del medio ambiente en las zonas urbanas, así como en la eficiencia y la seguridad energéticas. También puede generar mejoras en el desempeño financiero del sector energético, siempre que la carga derivada del transporte sea complementaria con los patrones actuales de demanda de energía eléctrica. Por otro lado, se traduciría en el desplazamiento de los activos de infraestructura vinculados a la refinación, transporte y distribución de destilados del petróleo, y de los activos del sector de combustibles fósiles. Hoy, la electrificación es una opción tecnológica para los sistemas de transporte por carretera, marítimo y ferroviario.

El potencial de electrificación masiva del transporte en el futuro próximo también está sustentada en los efectos combinados de una serie de tecnologías nuevas que pueden acelerar la aparición de vehículos eléctricos.

Así pues, los avances tecnológicos apoyados por las mejoras en la competitividad económica están impulsando el potencial para la electrificación masiva del transporte. Los automóviles eléctricos de costos competitivos (gracias en parte a incentivos fiscales) ya están disponibles en los mercados industrializados, y se prevé que estas mejoras se traducirán también en otros medios de transporte. La expectativa es que la competitividad de la opción eléctrica continuará a mejorar a corto plazo.

La Tabla 3.4 resume la proyectada transformación de los diferentes segmentos de flota dentro del sector. No obstante, persisten retos tecnológicos y económicos que pueden impedir la descarbonización plena del sector. En esta sección se revisan los factores que pueden permitir la electrificación masiva del transporte en América Latina y se resumen las barreras aparentes.

3.4.1 ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA PARA VEHÍCULOS DE TRANSPORTE

El almacenamiento de energía eléctrica es una tecnología crítica para la descarbonización del transporte. El costo de las baterías rige la economía del transporte eléctrico, ya que estas representan, en el momento, alrededor de la mitad del costo total del vehículo. El costo de almacenamiento de la energía en baterías para vehículos livianos de pasajeros ha registrado un descenso notable, al tiempo que la densidad de energía de estos dispositivos ha aumentado. La tendencia reciente y la proyección con respecto a estos parámetros puede revisarse en un informe elaborado por el Rocky Mountain Institute (RMI, 2015).

Otro estudio reciente (Nykqvist & Nilsson, 2015) sugiere que el costo de las celdas de las baterías de vehículos eléctricos disminuyó a una tasa promedio del 14% al año de 2007 a 2014 y puede representar un punto de inflexión para la producción en masa. El informe concluye que esta “reducción de los costos y las mejoras en la densidad de energía [tiene] consecuencias significativas para las premisas utilizadas al modelar el futuro de los sistemas energéticos y de transporte y permite plantear una perspectiva optimista para los vehículos eléctricos que contribuya a alcanzar un transporte con bajas emisiones de carbono” (Nykqvist & Nilsson, 2015).

La Figura 3.10 muestra la proyección de los gastos de almacenamiento utilizando baterías de iones de litio del mismo informe. También incluye los costos reales del almacenamiento del sistema Tesla lanzado al mercado en 2015. Los costos alcanzados estuvieron siete años adelante de las proyecciones. Ahora los analistas del sector industrial predicen que los costos de almacenamiento de los vehículos pueden ser tan bajos como 150 dólares por kWh en menos de diez años. Incluso podrían ser más bajos en 2030. La velocidad del cambio está abriendo oportunidades para aplicaciones de este sistema eléctrico en muchos sectores. El transporte eléctrico, en una región con una huella de carbono muy baja en su producción de energía eléctrica, puede ser una de las mejores aplicaciones globales desde una perspectiva del clima. Este estudio utiliza una proyección de costos de almacenamiento de 150 dólares por kWh en 2025 y de 75 dólares por kWh en 2050.

Las mejoras recientes en los costos de almacenamiento y densidades de energía tendrán un impacto sustancial en el costo total de los vehículos. Fuentes de la industria y analistas independientes (ver, por ejemplo, (Nykqvist &

Nilsson, 2015) también están proyectando una disminución considerable en el costo de capital de los vehículos eléctricos, independientemente de la reducción de los costos de la batería y las mejoras en la densidad de energía de estos dispositivos. Las reducciones se basan en la simplificación del vehículo (menos partes móviles) y a la mejora de la eficiencia de la fabricación. Por ejemplo, Tesla (Sparks, 2015), ha manifestado su expectativa de una reducción del 50% en el costo de los automóviles eléctricos entre 2013 y 2017. Otros fabricantes están aumentando la gama de vehículos eléctricos sin modificar el precio de venta.

Adicionalmente, la electrificación masiva del transporte en las zonas urbanas podría tener un impacto considerable sobre la concentración de los contaminantes y los compuestos tóxicos en el aire en estas zonas y, por tanto, sobre la exposición humana a ellos. La electrificación del transporte eliminaría las fuentes móviles de contaminantes criterio en zonas urbanas y, por lo tanto, se traduciría en beneficios económicos significativos.

Además, desde una perspectiva de eficiencia energética, la electrificación masiva de los vehículos generaría importantes ahorros para todo el sector. La proporción de energía que termina como trabajo en los motores de combustión interna típicamente es del 25% en el caso de la gasolina y del 30% para el diesel, pero puede ser menor en flotas más antiguas, típicas de algunas naciones de América Latina. La expectativa es que estas fracciones aumentarán ligeramente a través del tiempo, teniendo en cuenta los límites termodinámicos. Por otro lado, el uso de un motor eléctrico aumenta el coeficiente entre el trabajo producido y la energía hasta niveles de del 90% aproximadamente. Por tal motivo, la electrificación de los vehículos representa un importante ahorro energético.

Asimismo, se espera que las reducciones en el peso del vehículo, mejoras en los coeficientes de resistencia aerodinámica y otros avances incrementen en un 15% los ahorros de combustible para el año 2025 (Nylund, 2013). Este estudio asume un incremento del 30% en 2050. Los vehículos híbridos y de carga directa (plug-in) son capaces de aumentar los ahorros de combustible en un 15% a 25% (Fueleconomy, 2015). Un estudio reciente (BNEF, 2016), estima que los precios de las baterías eléctricas se redujeron en 35% durante 2015 y están en una trayectoria de costos que permitirá a los vehículos eléctricos aún sin subsidios fiscales competir con

los vehículos convencionales para el 2022. De acuerdo al mismo análisis, los vehículos eléctricos con rango equivalente a la flota convencional costarán menos que sus contrapartes. De hecho, en el futuro cercano, Tesla, Chevy, Nissan y otras empresas planean vender vehículos eléctricos en el rango de US\$30,000. Otras empresas están invirtiendo sumas cuantiosas en el desarrollo de otros vehículos, inclusive para mercados de transporte público y de carga. Estos avances suponen que las nuevas tecnologías (vehículos eléctricos y sistemas de carga) tendrán que surgir para todos los subsectores relevantes (es decir, automóviles y autobuses, camiones de carga, barcos) durante este período.

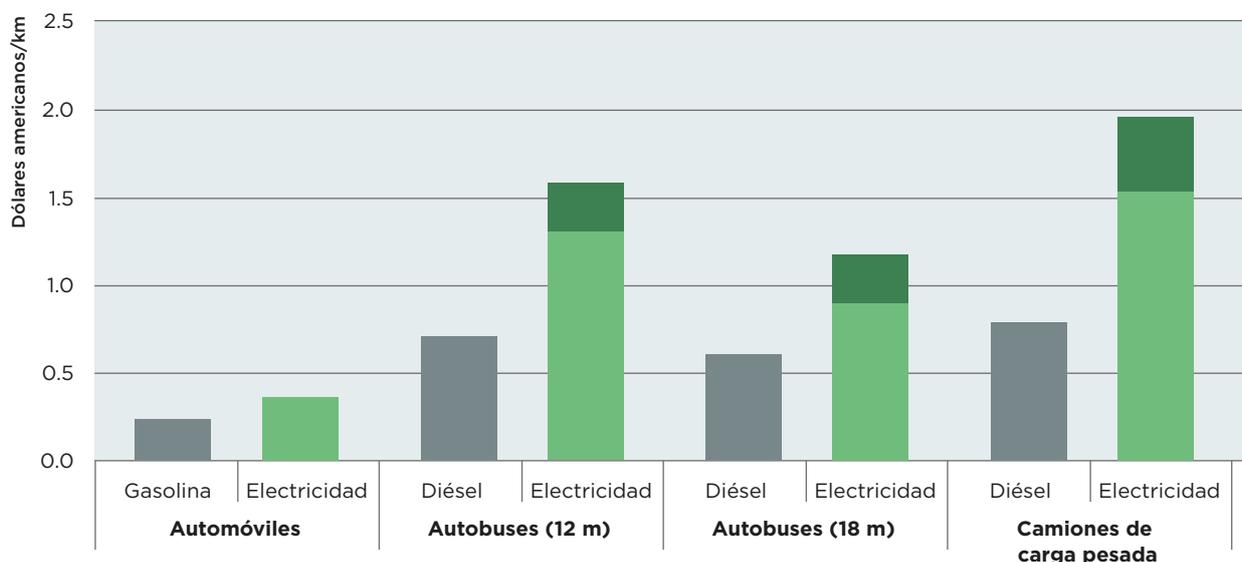
Así pues, los avances tecnológicos apoyados en mejoras en la competitividad económica están impulsando el potencial de la electrificación masiva del transporte. Se prevé que estas mejoras también se apliquen en otros medios de transporte. La Tabla 3.4 resume las expectativas para una transformación de los diferentes segmentos de la flota dentro del sector.

3.5 COSTO NIVELADO DEL TRANSPORTE ELÉCTRICO

El costo anualizado del transporte para vehículos de diesel, gasolina y eléctricos bajo las condiciones actuales se presenta en la Figura 3.11. Estos costos se han calculado con base en el costo actual de los vehículos y los costos de operación y mantenimiento estimados. El costo de la opción eléctrica es siempre mayor en las condiciones actuales. Sin embargo, cuando se incluye un crédito por los costos evitados de contaminación atmosférica, con base en las estimaciones presentadas en la sección 3.3, se reduce la diferencia entre las opciones. El mayor impacto de un crédito por costos evitados de la calidad del aire recae en los vehículos diesel, los cuales son responsables de la mayor proporción de los costos económicos de la contaminación del aire.

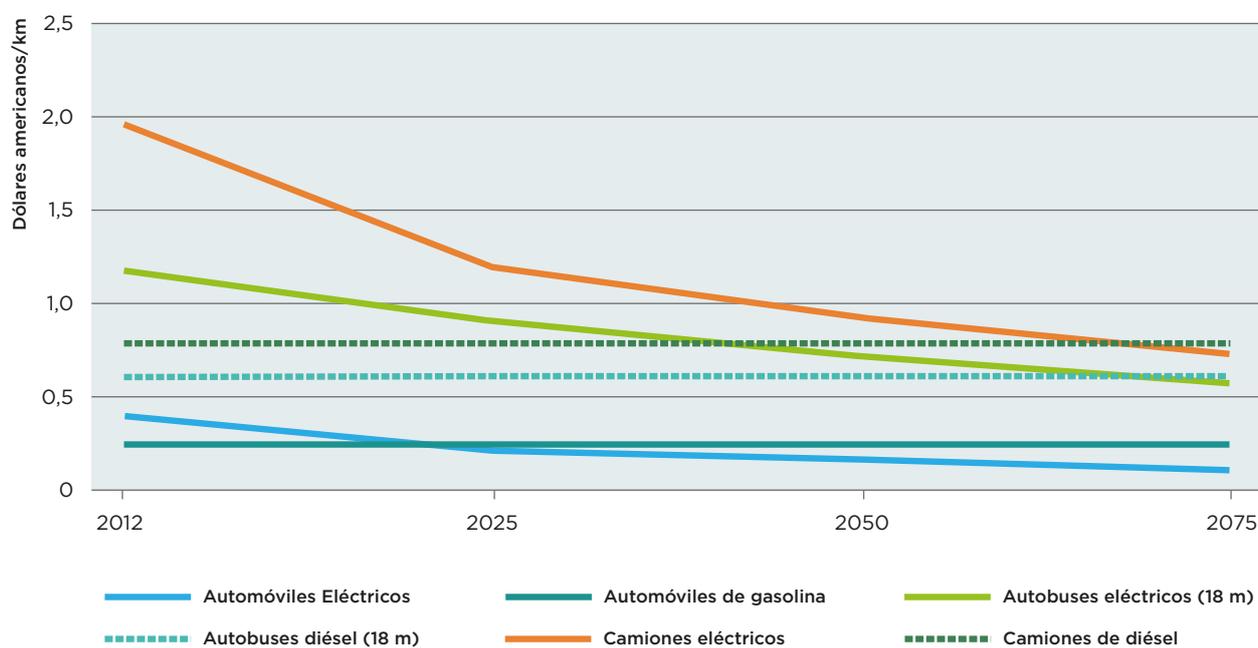
También se ha hecho una comparación de los costos anualizados proyectados de vehículos eléctricos versus vehículos tradicionales, sobre la base de las ganancias estimadas en la eficiencia y la densidad del almacenamiento de energía en los vehículos; la reducción estimada de los precios de la electricidad derivada de la introducción generalizada de las energías renovables; y las proyecciones de reducciones sustanciales a través del tiempo en el costo de los vehículos eléctricos. Las premisas asumidas con respecto al capital futuro y los

Figura 3.11 - Costo nivelado actual (2012) de las opciones de transporte alternativo.



Fuente: Estimaciones del autor; el área superior en las barras refleja el costo evitado estimado de la contaminación del aire cuando se reemplazan vehículos de gasolina y diésel por opciones eléctricas.

Figura 3.12 - Curvas de aprendizaje proyectadas para opciones de vehículos eléctricos.



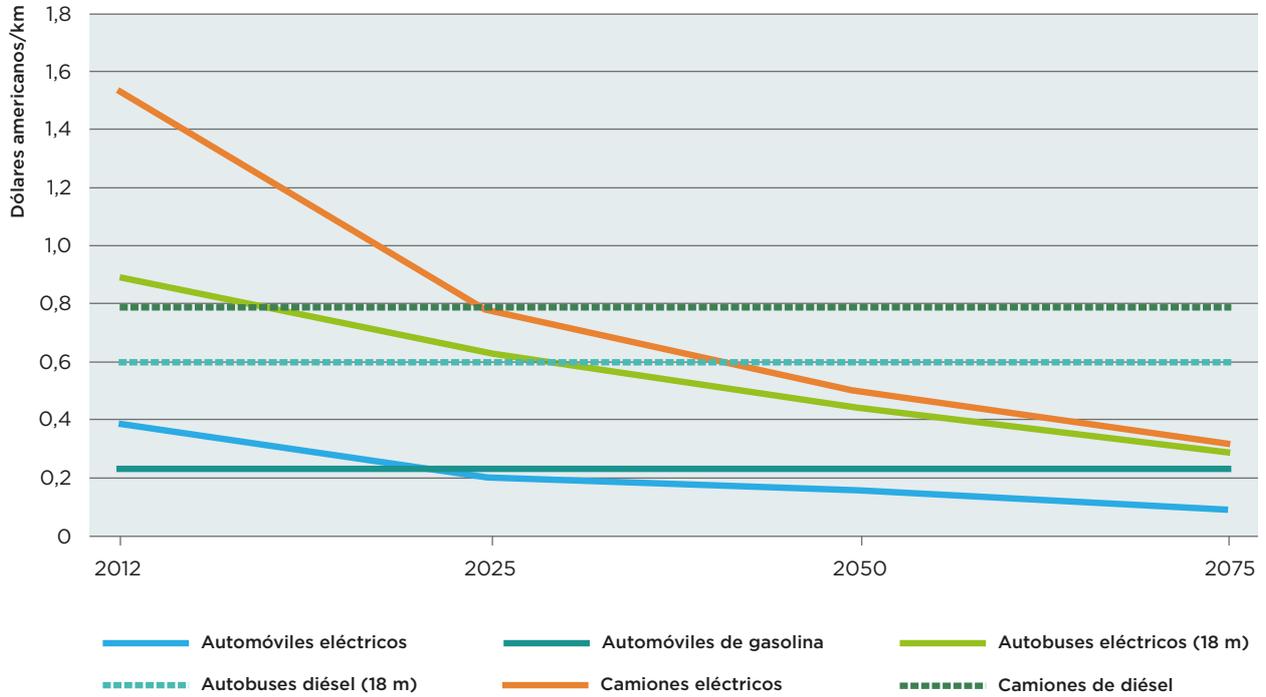
Fuente: Cálculos del autor.

costos de operación y mantenimiento se resumen en el Anexo IV. Las estimaciones resultantes se resumen en la Figura 3.12³¹.

De acuerdo a los cálculos, los vehículos eléctricos, en todos los segmentos de la flota considerados (automóviles, autobuses, camiones de carga), aumentarían su competitividad y en algunos casos superarían las opciones de combustibles fósiles correspondientes mucho antes del año 2050. En particular, los automóviles eléctricos deben ser capaces de competir y desplazar a

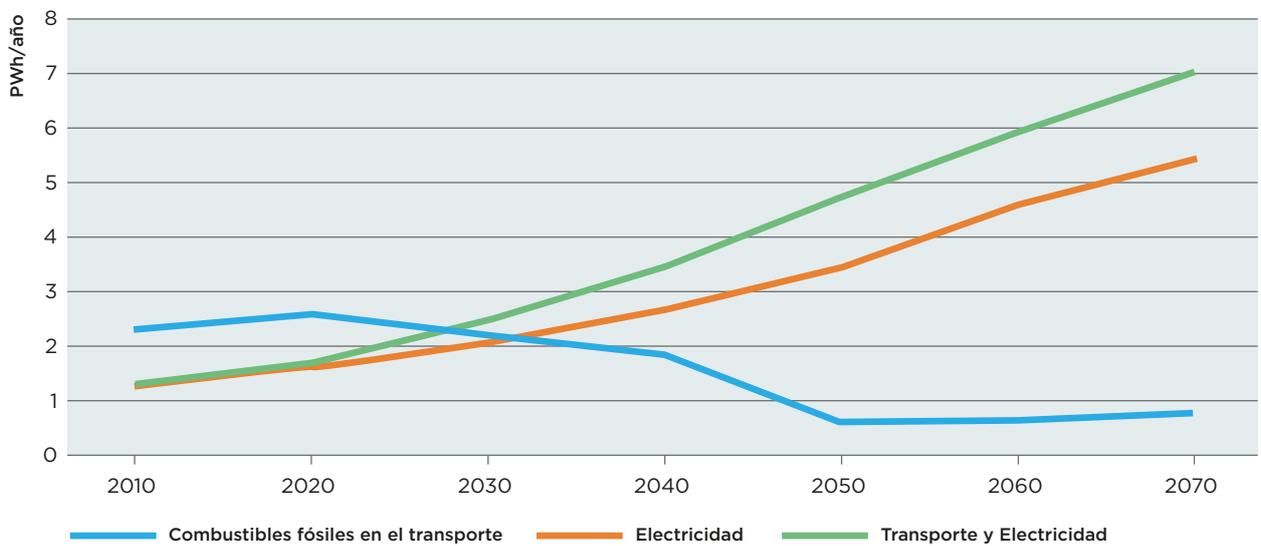
³¹ Para las reducciones estimadas en los costos de los vehículos eléctricos ligeros, este análisis utilizó el 25% en 2013 y alrededor del 50% en 2050, a partir de los costos actuales.

Figura 3.13 - Curvas de aprendizaje proyectadas para opciones de vehículos eléctricos con crédito por el costo evitado de la contaminación del aire



Fuente: Cálculos de los autores.

Figura 3.14 - Demanda de energía estimada por un sector de transporte electrificado



Fuente: Cálculos de los autores, con base en (IIASA, 2012) escenario ELB.



los automóviles que consumen combustibles fósiles en el corto plazo.

Muchas otras empresas y analistas ofrecen indicios de que la electrificación del transporte podría ser factible en algún momento entre 2030 y 2050, aunque no todas las cuestiones relacionadas con la tecnología parecen haberse resuelto a la fecha. Si bien algunas empresas de tecnología han abierto sus patentes al público, todavía sería necesario garantizar una transferencia in trabas de estas tecnologías en la región de América Latina y el Caribe, por ejemplo, a través del Mecanismo de Tecnología de la CMNUCC.

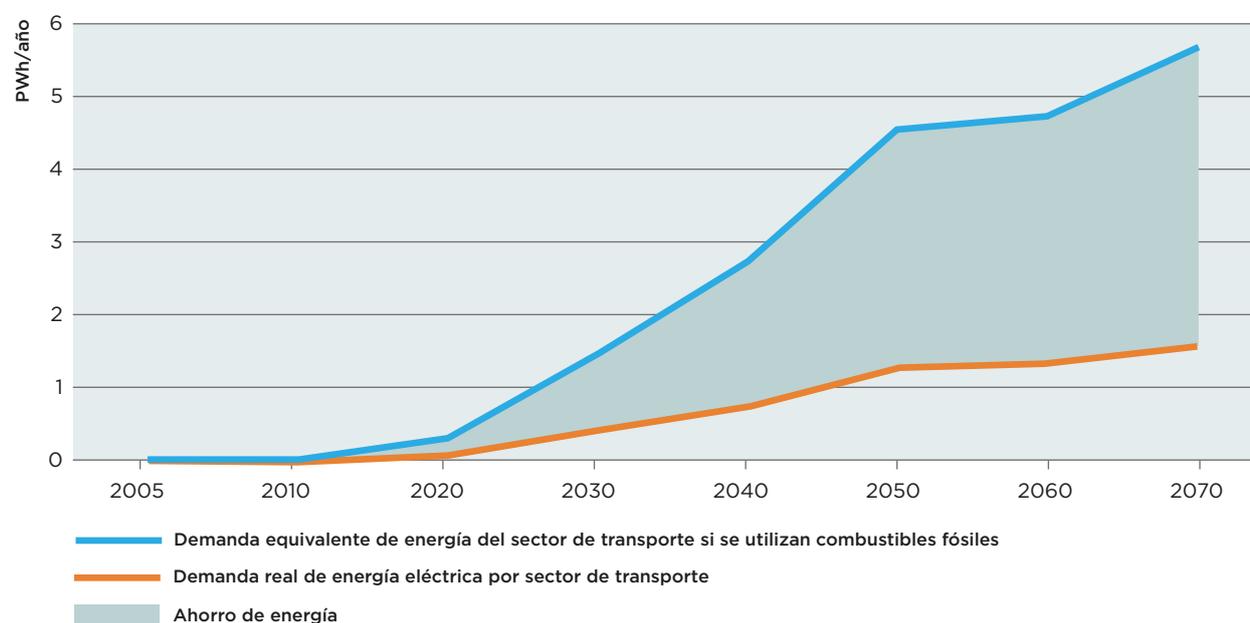
Si se toman en cuenta los costos evitados de la contaminación del aire en la curva de aprendizaje, se refuerza el argumento económico para el cambio hacia opciones

eléctricas (Figura 3.13). Esto ocurre en particular en el caso de los autobuses y camiones diesel. El costo evitado relativamente grande permite que las versiones eléctricas sean competitivas con respecto a las opciones que consumen combustibles fósiles en 2025.

3.5.1 EFECTO NETO DE LA ELECTRIFICACIÓN MASIVA DEL SECTOR DEL TRANSPORTE EN LA DEMANDA DE ENERGÍA ELÉCTRICA

El efecto neto sobre la demanda de energía por una flota electrificada también se calculó y se presenta en la Figura 3.14. La demanda adicional de energía es considerable y requeriría un aumento correspondiente en la capacidad de generación, de aproximadamente 1,26 PWh (4,5 EJ) en 2050.

Figura 3.15 - Ahorros de energía a partir de la electrificación completa del transporte.



Fuente: Cálculos de los autores (IIASA, 2012)

Sin embargo, para los automóviles eléctricos la opción de energía distribuida de origen residencial podría desempeñar un papel relevante, al igual que las centrales de recarga de flotas de vehículos ligeros. Si se gestiona la carga del transporte, esta podría concentrarse en períodos en los que la demanda de energía es relativamente baja (noche-madrugada). El efecto neto sería un menor rango de variación en la carga eléctrica diaria, y esto podría tener un efecto positivo sobre las finanzas de los generadores.

La sustitución de los motores de combustión interna por motores eléctricos también tendrá un impacto significativo en el uso global de energía primaria del sector. Importantes ahorros de energía estarán relacionados con la electrificación del sector, como resultado de la eficiencia termodinámica inherentemente baja de los ciclos Otto y diesel que serán reemplazados. Las ganancias en la eficiencia se traducen en importantes emisiones evitadas.

La Figura 3.15 muestra una estimación del ahorro, en EJ por año, resultante de la conversión de la flota de transporte. Los ahorros netos estimados ascienden a 4 PWh por año en 2050, probablemente una de las mayores medidas de eficiencia energética y ahorro de energía disponibles en la región.

3.5.2 ALGUNOS OBSTÁCULOS A LA ELECTRIFICACIÓN MASIVA DEL TRANSPORTE

El impulso tecnológico y económico consistente con un cambio hacia la opción eléctrica en el transporte está adquiriendo fuerza, y en última instancia puede implicar modificaciones profundas en los sistemas de transporte a nivel mundial. Sin embargo, en el corto plazo y en el contexto de América Latina, este cambio se enfrenta a obstáculos importantes que deben superarse. Estos incluyen los siguientes:

- Los subsidios a los combustibles fósiles continúan promoviendo el uso de combustibles a partir de una posición ventajosa y retrasan la adopción de fuentes alternativas de energía en el transporte. Se ha estimado que los subsidios a los combustibles fósiles en la región de América Latina y el Caribe representaron el 1% del PIB en 2011-13 y aproximadamente el 2% del PIB durante el mismo período si se contabilizan las externalidades negativas (Di Bella et al., 2015). La eliminación de los subsidios también tendría un efecto positivo sobre los ingresos fiscales.
- Por lo general, no se incluyen consideraciones relacionadas con los beneficios para la salud y el ambiente asociados con el desplazamiento del diesel, com-

bustóleo y gasolina por electricidad en el transporte. Estos beneficios son de tipo social y representan costos evitados que deben acreditarse para promover la adopción de sistemas eléctricos.

- c) Los patrones de consumo sugieren que, a medida que aumentan los ingresos, se presenta una reducción en la participación de los gastos y un aumento en los egresos asociados al “transporte privado”. Este patrón indica que los usuarios no están satisfechos con las opciones de transporte público existentes y cambian al uso de automóviles privados cuando se adquiere la capacidad económica para ello y/o alternativamente que la opción de transporte privado continúa a ser un símbolo de clase. Por tanto, se requieren mejoras sustanciales en la calidad del transporte privado a fin de evitar la erosión del uso de los sistemas de transporte público.
- d) Es necesario un uso más amplio de las políticas y los incentivos que fomenten el uso eficiente del espacio público en zonas urbanas, como por ejemplo, en la asignación preferencial de carriles de tránsito para los sistemas de transporte público, tales como los sistemas de autobuses de tránsito rápido y el apoyo a opciones de transporte no motorizado.
- e) El valor del capital y los puestos de trabajo y empresas asociados vinculados a la refinación del petróleo y la distribución de combustibles líquidos serían desplazados por la introducción de vehículos eléctricos y esto crea una resistencia natural de parte de esos sectores. Por otra parte, la electrificación del transporte puede concebirse como una oportunidad de crecimiento, ya que los nuevos sistemas de transporte necesitarán ingenieros, economistas del transporte, operadores y expertos en logística.
- f) Además, la discusión de la electrificación del sector del transporte no ha evolucionado a la par de la que se ha dado en el sector de la energía. Como consecuencia, existe la necesidad de desarrollar un marco normativo para aquellos aspectos (peso de los vehículos, estaciones de carga, disposición de las baterías) que son intrínsecos a la opción eléctrica. Algunas ciudades (Bogotá, por ejemplo) han iniciado el desarrollo de un entorno normativo favorable a la electrificación de los sistemas de autobuses de tránsito rápido, pero aún se requieren discusiones extensas y mucho trabajo adicional a nivel regional.



4. USO DE LA TIERRA: CONVERSION DE FUENTE A SUMIDERO DE CARBONO

La mayor parte de las emisiones de gases de efecto invernadero en América Latina se generan a partir de la agricultura, la silvicultura y otros usos de la tierra (ASOUT) (por ejemplo, residuos). De la estimación de 4,6 GtCO₂e emitidas en América Latina y el Caribe en 2012, aproximadamente la mitad estuvieron asociadas con ASOUT (Tabla 1.1). Por lo tanto, el cambio de uso de la tierra es un pilar fundamental de cualquier vía de descarbonización: cualquier esfuerzo a gran escala para reducir la intensidad de carbono en América Latina y el Caribe deberá estar fuertemente asociado a esta opción.

En esta sección del documento se examinan perspectivas de reducciones importantes en las emisiones de carbono derivadas del uso de la tierra y la posibilidad de acumulación neta de estoques de carbono. Se incluye una revisión de las posibilidades para la deforestación evitada y de alcanzar incrementos considerables en los estoques de carbono mediante la reforestación y la restauración de la tierra. También se identifican medidas para reducir las emisiones procedentes de actividades agrícolas, incluyendo la pecuaria. Por último, en esta sección se revisan los costos y beneficios económicos asociados a estas actividades.

4.1 SITUACIÓN ACTUAL

En América Latina y el Caribe, se estima que la producción agregada agrícola y forestal superó el 5% del PIB regional total en 2012 (World Bank, 2015), impulsada principalmente por aumentos en el valor de los productos agrícolas, y también por aumentos de la productividad y del área productiva. Esta producción juega un papel central en la actividad económica en las zonas rurales y comunidades urbanas pequeñas en América Latina y probablemente este continúe a ser el caso en el futuro previsible.

A nivel mundial, se espera que la región de América Latina y el Caribe desempeñe un papel cada vez más importante en el mercado global, como uno de los principales productores y exportadores de productos agrícolas. Las exportaciones agrícolas representan actualmen-

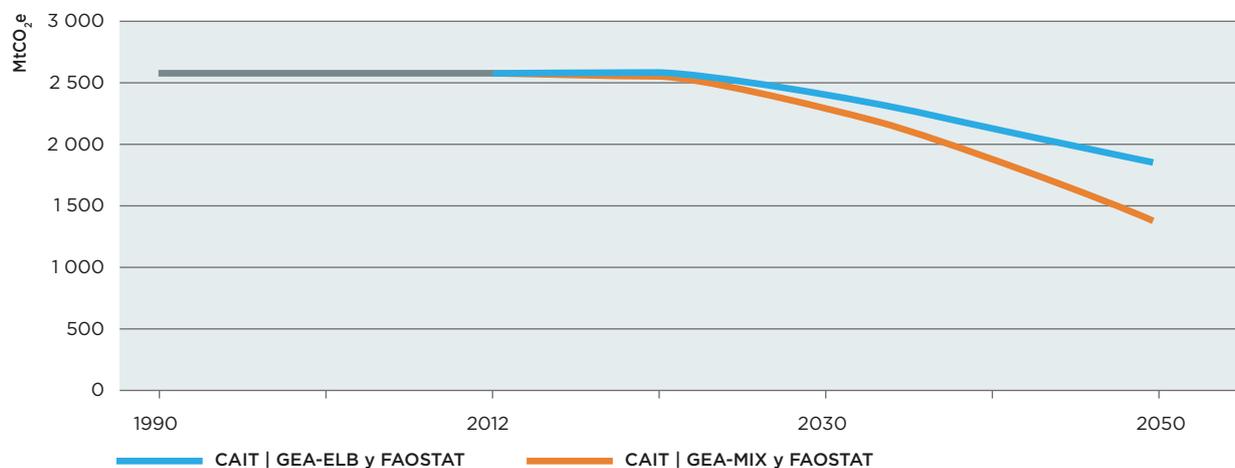
te el 23% del total de las exportaciones de la región, y han contribuido con aproximadamente el 11% del comercio mundial de alimentos, forrajes y fibras en 2013 (Vergara et al., 2014); ambos índices han sido impulsados por incrementos en la demanda mundial. Además, la agricultura y la silvicultura son importantes para la subsistencia de millones de personas en la región. La participación de la agricultura y la silvicultura en el ingreso total es mayor del 50% en los hogares rurales pobres en varios países³². Estas actividades emplearon aproximadamente el 15% del total de la mano de obra durante el período 2008-2011, y alcanzaron niveles de empleo mayores del 50% fuera de los grandes centros urbanos (World Bank, 2014b).

Sin embargo, el predominio de las emisiones relacionadas con el uso de la tierra dentro del perfil regional está cambiando. Las evidencias señalan descensos significativos en la tasa regional de deforestación: 67% de la deforestación en la Amazonia brasileña en 2004-2010 y un tercio en América Central desde mediados de la década de 1990 (Kaimowitz, 2008; el INPE, 2010; Hecht, 2014). Si se mantienen, estos logros constituyen un buen presagio para una reducción sustancial y duradera de las emisiones relacionadas con la silvicultura. Por otro lado, los datos muestran que las emisiones derivadas de la agricultura aumentaron un 18% desde 2000 hasta 2012 (CAIT, 2015).

Estos acontecimientos han sido utilizados como base para proyectar importantes reducciones en las emisiones derivadas de la silvicultura bajo los escenarios GEA-ELB y GEA-MIX. Aun así, bajo las condiciones normales, incluso después de considerar una reducción significativa en las tasas de deforestación, se espera que el total de emisiones a nivel regional llegue a casi 5,3 GtCO₂e en 2050 (Tabla 6.5), con una contribución de ASOUT de unos 1,9 GtCO₂e, o 38%, para entonces (Figura 4.1). Como se discute en el Capítulo 6, para que la región alcance cero emisiones para mediados de este siglo, se

³² Incluyendo, entre otros, Nicaragua (IFAD, 2010), Brasil (Valdes & Misti-aen, 2003) y El Salvador (World Bank, 1998).

Figura 4.1 – Datos históricos y proyección de IIASA sobre emisiones de GEI asociadas al uso de la tierra, cambios en el uso de la tierra y agricultura.



Fuente: Datos de emisiones históricas obtenidos de (CAIT, 2015), proyecciones basadas en las tasas de crecimiento de emisiones futuras calculadas por IIASA-GEA (IIASA, 2012) combinadas con la proyección de la FAOSTAT para emisiones derivadas de la agricultura (FAOSTAT, 2015).

requerirán aumentos netos en los sumideros de carbono en el sector de uso de la tierra.

4.2 DEFORESTACIÓN EVITADA

Desde un punto de vista climático, y considerando todas las actividades de uso de la tierra, detener la deforestación y reducir la degradación de los bosques son las primeras acciones que deben ser consideradas. La reducción de la deforestación podría evitar emisiones de CO₂ y también prevendría cambios en los patrones de precipitación pluvial a niveles local y regional y la desestabilización del clima³³. El detener la deforestación podría disminuir estos impactos. Además, existe un beneficio neto en el clima, de la reducción de los incendios forestales y, por consiguiente, de la reducción de las emisiones de carbono negro, que contribuyen al cambio de albedo en la atmósfera (Hurteau & Brooks, 2011). La deforestación también debe ser acreditada con los costos evitados de la destrucción del hábitat, incluyendo sus impactos sobre la biodiversidad, la conservación del suelo y el agua, y en muchos casos la herencia ancestral.

³³ En varias evaluaciones se ha descrito la relación entre la deforestación, el clima y la precipitación (da Silva Dias, 2008; Vergara & Scholz, 2011) y se ha concluido que existe un riesgo considerable de que el clima afecte la biomasa en pie en bosques tropicales, así como de que la deforestación afecte los patrones locales del clima y la precipitación.

Por ello, eliminar la deforestación debe ser una parte importante de los esfuerzos inmediatos para reducir la huella de carbono de la región.

Esto no será fácil. La Tabla 4.1 resume las tasas de deforestación actuales en algunos países de la región. En algunos casos, el proceso de deforestación no muestra disminución alguna, ya que los bosques frecuentemente son considerados no como un recurso, sino como una molestia. En 2013, se eliminaron aproximadamente unas 3.4 millones de hectáreas de bosques en la región (Hansen et al., 2015). Brasil, México, Perú, Argentina y Paraguay fueron responsables de más del 60% de la superficie deforestada, y es en estos países donde los esfuerzos para detener la deforestación tendrían el mayor impacto.

Se requieren esfuerzos importantes en materia de políticas, reglamentos e incentivos para detener las tasas de deforestación. En Brasil, por ejemplo, un análisis reciente (Tollefson, 2015) ha identificado una serie de medidas que han sido utilizadas para frenar la deforestación, incluyendo incentivos directos para los agricultores, el trabajo con cadenas de suministro, un enfoque territorial para abordar la deforestación, el fortalecimiento de las áreas protegidas y naturales, la mejora de la gobernanza y otros.

Tabla 4.1 – Panorama de la deforestación en la región (en Mha).

País	Cobertura de árboles en 2000	Área deforestada en 2013	Pérdida de cobertura de árboles (2001-2013)	Ganancia en Cobertura de Árboles (2001-2013)
México	53	0,19	2,41	(2001-2013)
Argentina	39	0,35	4,68	0,64
Belice	2	0,02	0,14	0,01
Bolivia	65	0,17	3,16	0,17
Brasil	519	1,72	35,76	7,59
Chile	19	0,10	1,31	1,46
Colombia	82	0,12	0,27	0,55
Costa Rica	4	0,01	0,17	0,04
Cuba	4	0,01	0,17	0,23
República Dominicana	3	0,01	0,2	0,04
Ecuador	19	0,04	0,56	0,1
El Salvador	1	0	0,06	0,01
Guatemala	8	0,05	0,93	0,11
Guyana	19	0,01	0,10	0,01
Haití	0,9	0	0,03	0
Honduras	8	0,04	0,52	0,06
Jamaica	0,8	0	0,03	0,01
Nicaragua	8	0,04	0,85	0,07
Panamá	6	0,01	0,28	0,03
Paraguay	24	0,3	4,13	0,05
Perú	78	0,19	1,74	0,19
Surinam	14	0,01	0,08	0,01
Trinidad y Tobago	0,4	0	0,02	0
Uruguay	2	0,02	0,24	0,5
Venezuela	57	0,05	1,28	0,19
TOTAL	1036	3,4	59,1	12,7

Fuente: (Hansen et al., 2015)

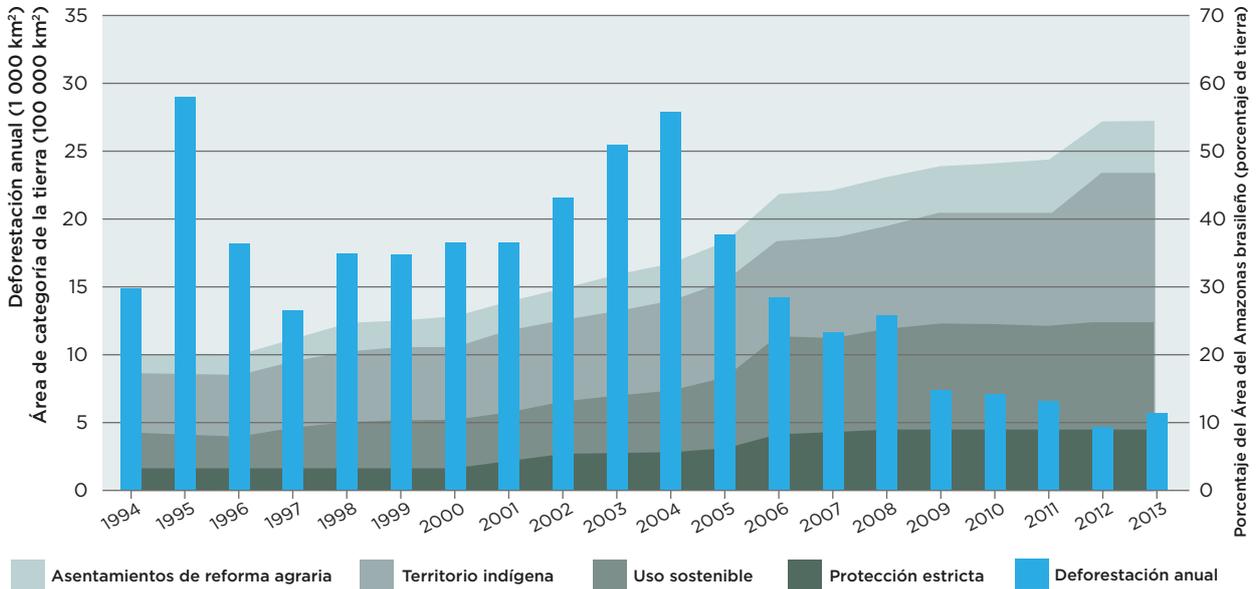
Además, acuerdos de deforestación cero asociada a ganadería firmados por grandes compañías empacadoras de cárnicos en el estado brasileño de Pará en el Amazonas muestran que se está evitando la compra desde propiedades asociadas a deforestación, lo cual no sucedía antes de los acuerdos (Gibbs et al., 2015)³⁴. El registro reciente

de estos esfuerzos ilustra el efecto de reducir los incentivos para la deforestación; de la adopción de políticas de tenencia de la tierra; y de cambiar los subsidios y los incentivos fiscales que promueven la deforestación.

A pesar de la notable reducción en el ritmo de destrucción de los bosques tropicales, aproximadamente 580 000 hectáreas de bosques primarios en la región del Amazonas fueron destruidas durante 2013 (Nepstad et al., 2014). Esta es un área muy grande y sería responsable

³⁴ Los rancheros proveedores inscribieron sus propiedades en un registro ambiental público casi dos años antes que las propiedades no proveedoras vecinas, y el 85% de los rancheros encuestados indicaron que los acuerdos fueron la fuerza motriz (Gibbs et al., 2015).

Figura 4.2 - Deforestación histórica en la región del Amazonas de Brasil.



Fuente: (Nepstad et al., 2014)

de emisiones equivalentes a 0,5 GtCO₂e³⁵. La Figura 4.2 muestra cómo la reforma agraria; medidas de protección rigurosas; la organización y protección de los territorios indígenas; y el uso sostenible de la tierra han ido de la mano con las reducciones en la tasa de deforestación en Brasil. Sin embargo, aún queda mucho por hacer para eliminar completamente la deforestación.

Se han realizado varias evaluaciones de los costos de detener la deforestación. Típicamente, estas estimaciones incluyen el valor de la actividad económica por hectárea que conduce a la deforestación (Grieg-Gran, 2008), el cual incluye la agricultura, así como los costos administrativos, de supervisión y aplicación de la ley por parte del gobierno, y un elemento de incentivo para promover el cambio.

De las estimaciones regionales en la región de América Latina y el Caribe, el Informe McKinsey (Enkvist et al., 2007) estimó que el costo promedio de una reducción del 75% en las emisiones derivadas de la deforestación sería de 50 dólares/tCO₂e. Las estimaciones de campo para esta región son mucho más bajas. Olsen y Bishop (2009), por ejemplo, han estimado que los costos de oportunidad para evitar la deforestación en el Amazo-

nas son de alrededor de 5 dólares/tCO₂e de emisiones de carbono evitadas.

Sin embargo, todas estas estimaciones normalmente no acreditan los costos evitados vinculados a la pérdida de capital natural y de los numerosos servicios ambientales proporcionados por los bosques (Tabla 4.2). Si bien los costos de evitar la deforestación no son insignificantes, los beneficios pueden ser mucho mayores. Estos beneficios incluyen la protección y formación del suelo, el mantenimiento de la hidrología superficial y de las precipitaciones, el almacenamiento de carbono, la protección de la diversidad biológica, los recursos genéticos y el patrimonio cultural. Los bosques tropicales también regulan el clima y la calidad del aire a nivel regional.

Muchos de estos servicios son difíciles de contabilizar en términos económicos, y, por lo tanto, los intentos para estructurar argumentos económicos para la conservación de los bosques han tenido un éxito limitado. Una evaluación del valor de los productos no maderables en Malasia estimó valores entre 45 dólares/ha al año y 2 455 dólares/ha al año (Svarrer & Olsen, 2005) en bosques tropicales. Heubach et al. (2011) han reportado que los productos forestales no maderables podrían representar hasta el 39% de los ingresos rurales. Si se

³⁵ Asumiendo un contenido de carbono promedio de 260 tC por hectárea.

Tabla 4.2 – Estimaciones del costo de evitar la deforestación.

Nivel de disminución	Costo en dólares/ tCO ₂ e	Fuente
Deforestación (disminución del 49%)	2,2	(Kindermann et al., 2008)
Deforestación (disminución del 65%)	4	(Blaser y Robledo, 2007)
Deforestación	5	(Olsen y Bishop, 2009)
Deforestación en América del Sur y Central	2-9	(Overmars et al., 2014)
Deforestación (disminución del 65% en 2030)	2,8	(Blaser y Robledo, 2007)
Deforestación en ALC (disminución del 75%)	50	(Enkvist et al., 2007)

Tabla 4.3 – Oportunidades de restauración en América Latina y el Caribe.

Condición del bosque [Mha]			Oportunidad de restauración en tierras degradadas y deforestadas [Mha]	% del Total	
Intacta	449		Restauración a gran escala	91	14
Fragmentada	559		Restauración en mosaico	456	70
Degradada	299		Restauración natural	2	-
Deforestada	349		Tierras agrícolas	99	15
Total	1,656			648	

Fuente: (Potapov et al., 2011).

considera, por ejemplo, un costo de 5 dólares/tCO₂e, esto sería aproximadamente equivalente al valor de carbono en el mercado voluntario. Sin embargo, la expectativa es que los futuros mercados de carbono, ya sean nacionales o regionales, deberán superar este valor. Si esto sucede, los esfuerzos por evitar la deforestación serían neutrales en términos de costos, incluso antes de contar con los numerosos cobeneficios asociados³⁶.

³⁶ Para fines de este estudio se utiliza un valor de mercado conservador de 5 dólares/tCO₂. Este valor corresponde a un nivel de precio previsto en ausencia de un mercado de carbono global o regional totalmente funcional (Peters-Stanley & González, 2014) que, por tanto, refleja el precio promedio bajo condiciones voluntarias. Sin embargo, las proyecciones de precios que se asumen normalmente en estudios de mercado de carbono bajo escenarios conservadores son mucho más altas, del orden de 20 dólares/tCO₂, para el periodo 2020-2040 (por ejemplo, ver Lucklow et al. (2015)). Además, las consecuencias económicas estimadas de las emisiones de CO₂ a la atmósfera calculadas por Stern son de 100 dólares/tCO₂ (Stern, 2006). En cualquier caso, el incremento probable en el valor del carbono en el periodo de análisis futuro solo reforzaría el caso de la restauración.

4.3 LA REFORESTACIÓN Y LA RESTAURACIÓN DE LA TIERRA

Según algunos analistas (Potapov et al., 2011), la región tiene el potencial para restaurar unos 650 millones de hectáreas de tierras deforestadas y degradadas (Tabla 4.3). Más de dos tercios (450 millones de hectáreas) de las posibilidades de restauración se encuentran en paisajes de bosque degradados que han sido convertidos en matorrales, en sabanas y en tierras agrícolas degradadas en ecosistemas y bajo condiciones sociales que permiten la aplicación de técnicas de restauración por mosaicos (World Bank, 2014a).

Los enfoques de restauración incluyen áreas de silvopastoreo y agrosilvicultura, junto con esquemas más “pasivos”, que incluyen la regeneración asistida de bosques naturales. Esta sección del análisis revisa el potencial de desarrollar sumideros de carbono mediante la reforestación y la restauración de tierras.

4.2.1 REFORESTACIÓN

El IPCC define “reforestación como el establecimiento de bosques en tierras en que había una cubierta de árboles reciente, mientras que la aforestación se refiere a tierras en las que no ha habido bosque durante mucho tiempo” (IPCC, 2007). Para los fines de este documento, no se hace diferenciación entre estos dos conceptos. En la reforestación se consideran todas las actividades que dan por resultado la recuperación de la cubierta forestal, incluyendo la reforestación natural, asistida y por plantaciones.

La reforestación natural y asistida consiste en dejar que las tierras deforestadas o parcialmente reforestadas recuperen su cubierta forestal natural. Bajo el esquema de reforestación asistida, se realizan esfuerzos para proteger y conservar las plántulas de árboles naturales en las áreas boscosas. Además de los esfuerzos de protección, se plantan árboles nuevos cuando es necesario o deseado (enriquecimiento de los bosques). Con esta técnica, los bosques crecen más rápido de lo que lo harían naturalmente, y así se logra una contribución significativa a los esfuerzos de secuestro de carbono. También sirve como una alternativa más barata a la reforestación debido a la disminución de las necesidades de viveros.

La reforestación natural asistida ofrece ventajas sobre otras técnicas, pero puede requerir períodos de implementación más largos. El proceso es laborioso y puede ser más costoso que la regeneración natural por el crecimiento secundario (reforestación natural). Sin embargo, puede representar una alternativa a la regeneración de los bosques al tiempo que se recupera parte de la funcionalidad perdida a través del proceso de degradación de la tierra.

La reforestación puede ser una herramienta importante para el almacenamiento de carbono. Cuando se realiza con especies locales y variadas, puede mejorar los recursos de biodiversidad. Se han realizado numerosos estudios sobre el carbono almacenado en los bosques del Amazonas; la Tabla 4.4 resume algunos de ellos, de acuerdo con el reporte de (Nair & Garrity, 2012).

Puede esperarse que los bosques tropicales en la región amazónica almacenen aproximadamente 260 tC por hectárea en las selvas vírgenes y entre 110-260 tC por hectárea si se incluyen bosques manejados, explotados e inundables. Aunque Nair & Garrity (2012) reportan de un promedio de 260 tC por hectárea, en este estudio se ha elegido usar un promedio más bajo y un nivel más

conservador de las existencias de carbono, de aproximadamente 140 tC, que corresponde al valor promedio reportado para bosques bajo manejo.

Los costos de la reforestación natural no están bien documentados. Sin embargo, se espera que los costos de la reforestación natural y asistida sean menores que los de las plantaciones forestales. En una evaluación de los costos de las reforestaciones pasiva (natural) y activa (asistida) en las tierras áridas de Chile se concluyó que el valor actual neto de las inversiones en restauración sería de unos 5-700 dólares por hectárea para la reforestación pasiva, y el valor actual neto de los costos sería de aproximadamente 21-772 dólares para la reforestación activa (Birch et al., 2010).

Los costos de las plantaciones de bosques mixtos compuestos por especies nativas varían considerablemente, dependiendo de la ubicación y las especies utilizadas. En un estudio realizado en Australia se estiman costos de reforestación que van desde 1,1-6,4 mil dólares por hectárea (Summers et al., 2015), y otras estimaciones oscilan entre 100 y 300 dólares por hectárea en los EE. UU. (Bair & Alig, 2007). El IPCC (2007) ha concluido que “los costos de mitigación a través de la silvicultura oscilan entre 0,1-20 dólares/tonelada métrica de dióxido de carbono en algunos países tropicales en desarrollo”. Este amplio rango de valores hace difícil una generalización del costo de la reforestación.

4.3.2 RESTAURACIÓN DE TIERRAS

La restauración de tierras puede definirse como el proceso por el cual se recupera la funcionalidad del suelo, medida a través de la capacidad de recuperar la calidad del suelo, la hidrología de superficie, la biodiversidad y los estoques de carbono. Al igual que la deforestación evitada y la reforestación, la restauración también puede redundar en una amplia gama de beneficios. Estos beneficios incluyen: la conservación del suelo y sus nutrientes o la prevención de la erosión del suelo; el mantenimiento de la estabilidad de los ciclos hidrológicos, las corrientes de agua y la capacidad de retención de agua de la tierra; la conservación de la biodiversidad y el mantenimiento de un conjunto complejo de interacciones en bosques y sabanas naturales que son propicias para el sustento de la vida; y un aumento en el almacenamiento de carbono que contribuye a estabilizar el clima y evita daños a los ecosistemas.

Además, la restauración de tierra también podría frenar la expansión de la agricultura hacia los bosques y otros

Tabla 4.4. Sumideros de carbono en bosques tropicales (región del Amazonas) en América Latina.

Sistema de gestión/ tipo/edad	En la superficie (tC/ha)		Subterránea (tC/ha)	Fuente
	Promedio	Total		
Inalterado	258,3	148		(Rodrigues et al., 1999)
		158,9	32,4 (40 cm)	(Fujisaka et al., 1998)
		161,7		(Alegre et al., 2001)
		277,7-337,5		(Yquise et al., 2009)
		294		(Palm et al., 2004)
		322±20		(Salimon et al., 2011)
		367	98,8	(Callo-Concha et al., 2002)
Gestionado/talado	140,5	85,1	95,9	(Callo-Concha et al., 2002)
		105,8±23,7		(Fearnside et al., 2007)
		116,7	43,6	(Lapeyre et al., 2004)
		126,3 (6y)		(Yquise et al., 2009)
		150 (123-185)		(Palm et al., 2004)
Bosque de palmeras (Mauritia flexuosa)	118,7	97,6-139,9	315,5-433,5	(Guzmán & Arévalo, 2003)
Tierras bajas, bosques inundables (varzea)	109	80		(Klinge et al., 1995)
		138		(Tsuchiya & Hiraoka, 1999)

Fuente: (Nair & Garrity, 2012)

hábitats naturales al encauzar la nueva demanda de productos agrícolas y forestales hacia tierras degradadas. Esto daría por resultado un aumento de la cubierta vegetal y el consiguiente aumento de los estoques de carbono tanto en la superficie como en el suelo.

La Agrosilvicultura y el silvopastoreo se consideran como métodos de restauración que pueden ofrecer una medida del almacenamiento de carbono. La agrosilvicultura generalmente se define como la integración de la agricultura con la silvicultura a fin de que la tierra puede utilizarse simultáneamente para ambos propósitos. La agrosilvicultura ya se utiliza ampliamente en América Latina: se ha estimado que entre 200 y 360 millones de hectáreas están actualmente bajo sistemas agroforestales en la región (Nair & Garrity, 2012), lo cual es en sí mismo una indicación de su factibilidad financiera. Aun así, existe un potencial considerable

para el desarrollo adicional de esquemas agroforestales. Asimismo, los esquemas de silvopastoreo combinan la agricultura y la cría de ganado. Además del almacenamiento neto de carbono, este enfoque de combinación del paisaje ha demostrado acarrear beneficios en términos de rendimientos y conservación del suelo y el agua (Jianbo, 2006).

Desde un punto de vista climático, el almacenamiento total de carbono en la biomasa y en el suelo en sistemas agroforestales y silvopastorales generalmente es mucho mayor que en el uso de la tierra sin árboles. Se ha demostrado que las prácticas agroforestales y silvopastorales sostenibles producen un almacenamiento neto de carbono en la vegetación del orden de 6-63 toneladas de carbono (tC)/ha, dependiendo de las condiciones del bioma y en comparación con tierras degradadas (Montagnini & Nair, 2004).

Por ejemplo, las mejoras en el cuidado de praderas y pastizales daría por resultado un almacenamiento sustancial de carbono en los suelos, lo cual puede lograrse ajustando el número de animales y agregando leguminosas al sistema (Henderson et al., 2015). Estimaciones en México (Soto-Pinto et al., 2010) colocan al almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales en 50 tC por hectárea. En el promedio de este rango, 35 tC por hectárea, la agrosilvicultura se convierte en una herramienta muy importante para el almacenamiento de carbono. La Tabla 4.5 resume las tasas reportadas de almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales y silvopastorales tropicales selectos, así como el almacenamiento neto de carbono calculado que resultaría de la implementación de la iniciativa 20x20³⁷ en América Latina. La mayoría de las estimaciones se encuentran en el rango de 2 a 6 tC por hectárea y año. En este análisis se utiliza un valor de 2C/ha-año como un valor conservador en los cálculos.

Parece que existen abundantes evidencias de que el potencial de restauración y los esfuerzos de reforestación aumentan las reservas de carbono en la tierra. Una combinación de los esfuerzos de reforestación y restauración de tierras de magnitud suficiente podría neutralizar todas las emisiones procedentes de actividades del uso de la tierra en la región. Por ejemplo, un esfuerzo de 250 Mha (50 Mha en reforestación y 200 Mha en restauración) daría lugar a una acumulación en sumideros de unos 2,0 GtCO₂e por año (ver detalles en la Tabla 4.8).

En resumen, las actividades de restauración podrían ser esenciales para adoptar una senda de desarrollo con baja emisión de carbono en la región, y también serían un apoyo estratégico importante para el mantenimiento y

restablecimiento de la amplia gama de servicios ecosistémicos reguladores críticos que requieren y proveen los paisajes de bosques y tierras arboladas³⁸. No obstante, ¿estos esfuerzos son económicamente viables?

4.4 BENEFICIOS ECONÓMICOS DE LAS ACTIVIDADES DE REFORESTACIÓN Y RESTAURACIÓN

Dado que existe una serie de esquemas de restauración, así como muchas combinaciones de paisajes susceptibles de restauración, es difícil emitir generalizaciones acerca de los beneficios que pueden obtenerse. Una clasificación simple de los posibles beneficios puede incluir las siguientes categorías:

- *productos forestales leñosos*, o ingresos derivados de la recolección de madera, leña y otros productos que implican una reducción, aunque temporal, en la biomasa forestal en pie, ya sea en actividades de agrosilvicultura, silvopastoreo o reforestación;
- *productos forestales no maderables*, o ingresos procedentes de los productos cosechados de manera sostenible sin afectar negativamente la biomasa del bosque natural (por ejemplo, plantas medicinales y productos de origen animal, frutas, nueces), también en actividades de agrosilvicultura, silvopastoreo o reforestación;
- los posibles beneficios del *ecoturismo* generados por los bosques, las áreas naturales y los paisajes relacionados (incluyendo los parques nacionales), que podrían ser complementados por actividades de restauración del paisaje. Existen datos de ingresos históricos de Costa Rica, donde los ingresos derivados del ecoturismo han sido vinculados a programas de reforestación; estos ingresos están relacionados con el turismo en áreas protegidas en lugar de tierras degradadas;
- beneficios de *la producción agrícola o la agricultura animal* que podrían mejorarse mediante esfuerzos de restauración del paisaje. En particular, aumento previsto de los ingresos derivados de la producción agrícola como resultado de actividades agroforestales y silvopastorales en tierras agrícolas degradadas;
- *costos anuales evitados de seguridad alimentaria* que representan la posible disminución de las primas de

³⁷ La iniciativa 20x20 es un esfuerzo a nivel nacional para iniciar la restauración de 20 millones de hectáreas para el año 2020 en América Latina. La iniciativa incluye tres actividades: 1. Impulso político. Un diálogo robusto con los Ministros de Agricultura y Medio Ambiente en la región, que busque a) asegurar una política y un marco regulatorio sostenibles para la restauración de la tierra y la deforestación evitada, y b) incorporar programas y actividades a nivel nacional en apoyo a los esfuerzos de restauración y la deforestación evitada en la región de aproximadamente 28 millones de ha (superando los propósitos iniciales) para 2020. 2. Análisis. Una evaluación de los beneficios sociales (prevención de costos y beneficios económicos) derivados de la restauración de la tierra y los esfuerzos de prevención de la deforestación que pueden utilizarse para dirigir políticas e inversiones fundamentadas a nivel local. 3. Impulso financiero. Asegurar compromisos del orden de 855 millones de dólares de 11 inversionistas de impacto, fondos y empresas, para el financiamiento de los esfuerzos de restauración de la tierra en la región derivados de fondos de inversión para impactos, y una cantidad similar de fondos bi- y multilaterales, para prácticas racionales de agrosilvicultura, agropastoreo y agricultura, reforestación y deforestación evitada.

³⁸ Las actividades de restauración de la tierra, incluyendo las que se centran en los agroecosistemas, han sido correlacionadas positivamente con la recuperación de los servicios ambientales, incluyendo las mejoras en la diversidad biológica (Berra et al., 2013).

Tabla 4.5 – Algunas tasas netas de almacenamiento de carbono en sistemas de restauración de tierras (en tC/ha-año).

Sistema de restauración	En la superficie	En suelos	Fuente
Agroforestal de múltiples estratos (Cacao) en Costa Rica		4,2	De acuerdo con los reportes de Lorenz & Lal (2014)
Agroforestal de múltiples estratos (Cacao) en Ghana		0,1	De acuerdo con los reportes de Lorenz & Lal (2014)
Sistema de cultivo en franjas en Costa Rica		1,8-2,3	(Oelbermann et al., 2006)
Cultivo tropical en franjas en Nigeria Occidental	13,6		(Lal, 2005)
Plantaciones intercaladas de árboles en África	0,5-4,0	1,5-3,5	(Nair, 2012)
Silvopastoreo en África	0,5-4,0		Según lo reportado por Nair & Garrity (2012)
Silvopastoreo en India	6,5		(Kumar et al., 1998)
Programa de ALC 20x20, estimado	2,3		(WRI, 2015) Estimación de los autores

seguridad alimentaria a medida que aumenta la producción agrícola y se vuelve más estable en el seno de cualquier frontera agrícola estable en paisajes no degradados. Es decir, la mejora de la producción alimentaria sostenible debería traducirse en una reducción de la inseguridad alimentaria, la cual es parcialmente capturada por el valor de mercado de las primas de seguridad alimentaria en el mercado de seguros de cultivos de la región;

- beneficios económicos en *el almacenamiento de carbono* como resultado de la restauración. Este beneficio económico de la captura y el almacenamiento de carbono podría mejorar como resultado del aumento de la cubierta vegetal derivada de la reforestación, la regeneración asistida, la agrosilvicultura, el silvopastoreo y la deforestación evitada, todo ello reflejado en los mercados del carbono.

Datos sustanciales y limitaciones metodológicas y de otro tipo hacen que sea difícil intentar una estimación que capte e incorpore otras ventajas de la restauración del paisaje, tales como mejoras en, o pérdidas evitadas de diversidad biológica, protección del suelo y del agua, adaptación al cambio climático, etc.

En la literatura están disponibles varios estudios de caso sobre aspectos financieros de la reforestación en

la región. En muchos casos, la reforestación ha demostrado ser financieramente atractiva, especialmente con monocultivos, frecuentemente de especies exóticas. Sin embargo, más recientemente, una serie de experiencias han demostrado los beneficios potenciales de la reforestación con varias especies nativas. A continuación se mencionan algunos ejemplos exitosos de reforestación con especies autóctonas:

- Se ha reportado que 15 000 hectáreas de plantaciones comerciales con especies nativas y exóticas en Chinchina (Colombia) y 15 000 hectáreas de bosques nativos manejados sosteniblemente han producido ganancias económicas adecuadas capaces de garantizar la sostenibilidad a largo plazo de las inversiones (<http://www.fao.org/forestry/12077-0e9dadce-99fo2474339f5e5c17abe-1fci.pdf>);
- 1 000 hectáreas han sido reforestadas con especies nativas en la región Mixteca de México. Apoyándose en árboles de especies nativas, técnicas agrícolas en terrazas y zanjas de contención para impedir la erosión de laderas en la región Mixteca, el Centro de Desarrollo Integral Campesino de la Mixteca o CEDICAM no solo ha reforestado, sino ayudado a crear más oportunidades económicas e incluso la igualdad de género dentro de la región. El fundador del CEDICAM, José Jesús Santos, fue galardonado

- con el Premio Ambiental Goldman en 2008 (<http://www.cedicam-ac.org>);
- A principios de la década de 1980, los residentes de Gaviotas en Colombia, dirigidos por Paolo Lugari, comenzaron a plantar pinos caribeños, y aseguraron su supervivencia en el suelo ácido aplicando hongos micorrízicos a sus raíces. Los aldeanos han repoblado con éxito alrededor de 8 000 hectáreas y han creado oportunidades económicas (<http://www.friendsofgaviotas.org>);
 - En Brasil, el proyecto de restauración forestal del ITPA (Instituto Terra de Preservação Ambiental) ha repoblado alrededor de 950 hectáreas de ladera anteriormente yerma con especies forestales nativas del Atlántico tales como el Araguaneý y la especie de crecimiento rápido Angico Artemisiana, algunos de los cuales miden casi 10 metros de altura (<http://www.itpa.org.br>);
 - Existen muchos otros proyectos, algunos de ellos apoyados por el *Bio Carbon Fund* y otros a través del mercado voluntario. Los detalles pueden consultarse en <http://www.biocarbonfund-isfl.org>.
 - Más recientemente, CONAFOR (en México) ha reportado la reforestación de casi 600,000 de bosques.

A pesar del número creciente de experiencias de reforestación, siguen existiendo barreras considerables a la expansión de los esfuerzos en la escala que se requiere para consolidar un sumidero de carbono de importancia regional. Estos incluyen: a) la falta de suficientes incentivos fiscales y financieros; b) la incapacidad para asimilar los beneficios económicos de la reforestación; y c) la falta de suficiente material de vegetación nativa (germoplasma).

Asimismo, existe un conjunto de evidencias cada vez mayor del mercado que apuesta en esquemas de agro-silvicultura y silvopastoreo en tierras degradadas en América Latina. Se están desarrollando inversiones en restauración de tierras a través de estos esquemas a un ritmo acelerado en la región. Esto refleja el hecho de que los argumentos económicos a favor de la restauración han sido adoptados por el sector privado. En el marco de la Iniciativa 20x20, por ejemplo, once importantes inversionistas privados han asignado 855 millones de dólares para inversiones en restauración. Numerosos proyectos ya están en ejecución. Por ejemplo:

- el proyecto CIPAV en Colombia, que busca la restauración de tierras bajo cría de ganado extensiva a través de la aplicación de esquemas de silvopastoreo,

el cual ha tenido un éxito económico considerable (<http://www.cipav.org.co>);

- la Alianza Peru-Cocoa (<http://www.carana.com>), que busca restaurar la tierra a través de esquemas agroforestales con pequeños propietarios en Perú, que también ha tenido un éxito notable.
- el manejo de praderas y pastizales en la Patagonia argentina y chilena, desarrollado a través de una red de 400 millones de acres de pastizales templados que sustentan un patrimonio biológico y cultural único, y que proveen muchos servicios ecosistémicos importantes, incluyendo agua y aire limpios, forraje para el ganado, secuestro de carbono y hábitat para la vida silvestre (<http://www.fao.org/nr/sustainability/grassland/best-practices/projects>);
- el desarrollo de un programa para fortalecer granjas pequeñas y medianas en la región de Matagalpa, Nicaragua, que se han visto gravemente afectadas por la roya y los efectos del calentamiento global (http://www.moringapartnership.com/jt_files). Podrían citarse muchos otros proyectos.

Además de inversiones y proyectos específicos, las actividades de reforestación y restauración tienen el potencial de reactivar o promover la actividad económica en las zonas rurales. Por ejemplo, un análisis reciente ha proporcionado un recuento de alto nivel del tamaño y el alcance de la economía de restauración en términos de empleo, valor agregado y producción económica global a escala nacional para los Estados Unidos. Con base en este análisis, se concluyó que el sector doméstico de restauración ecológica emplea directamente a unos 126 000 trabajadores y genera alrededor de 9 500 millones de dólares en rendimientos económicos (ventas) anualmente. Se ha encontrado que esta actividad apoya unos 95 000 empleos adicionales y genera 15 mil millones de dólares a través de vínculos indirectos (entre negocios) e incrementos en el gasto de los hogares (BenDor et al., 2015).

4.5 LA AGRICULTURA DE BAJAS EMISIONES DE CARBONO

Las prácticas insostenibles en la agricultura en la región han dado por resultado reducciones de los niveles de carbono en vegetación y los suelos. Los incendios, la expansión de la frontera de producción, la degradación de las tierras agrícolas y la producción ganadera son grandes contribuyentes al total de las emisiones del sector. La FAO (2014) ha estimado que las emisiones

globales derivadas de la agricultura han aumentado en un 14% desde 2001.

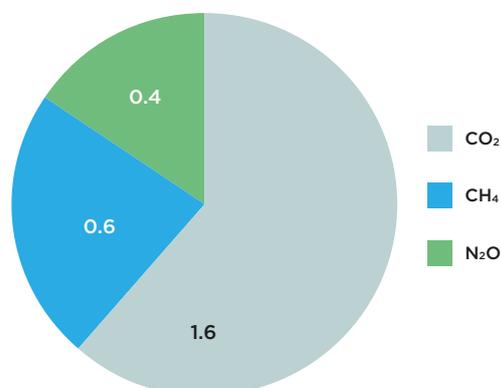
La agricultura es también la principal fuente de N_2O y CH_4 en América Latina y el Caribe. Como el N_2O y el CH_4 tienen un alto potencial de calentamiento, incluso pequeñas cantidades de estos gases pueden contribuir significativamente a las emisiones totales de gases de efecto invernadero medidos en CO_2e . Las emisiones estimadas de CH_4 y N_2O en términos de CO_2e se presentan en la Figura 4.3, junto con las emisiones de la deforestación y la degradación de la tierra.

Las emisiones de N_2O procedentes de la agricultura se derivan de la incorrecta aplicación de fertilizantes, la aeración y descompactación del suelo y escurrimientos provenientes de áreas agrícolas. El manejo de los suelos agrícolas generalmente representa más de la mitad de las emisiones del sector agrícola. La ganadería, especialmente de ganado bovino, produce metano (CH_4) como parte de su digestión en un proceso llamado fermentación entérica, y también se genera como resultado del manejo y la disposición del estiércol, lo que representa alrededor de una cuarta parte de las emisiones derivadas del sector agrícola a nivel mundial. Los métodos de almacenamiento de estiércol y el grado de exposición al oxígeno y la humedad pueden afectar la manera en que se producen estos gases de efecto invernadero. Otras fuentes de emisiones son el cultivo de arroz, que produce CH_4 , y la quema de residuos de la cosecha, que produce CH_4 y N_2O . Como la cría de ganado es una de las principales actividades de uso de la tierra en la región, las emisiones de CH_4 procedentes de la ganadería constituyen una importante preocupación.

4.5.1 ALGUNAS POSIBLES MEDIDAS PARA REDUCIR LAS EMISIONES DE LA AGRICULTURA EN LA REGIÓN

El manejo de nutrientes en tierras de cultivo para la disminución de las emisiones de GEI comprende actividades enfocadas en la generación de N_2O derivado de la agricultura. Se han propuesto numerosas medidas de manejo de nutrientes para reducir las emisiones de GEI en la agricultura (por ejemplo, IPCC, 2007; Smith et al., 2008). Este estudio ha elegido centrar la atención en tres medidas en las que se ha identificado un potencial importante en la región: la agricultura orgánica (a través de la sustitución de fertilizantes sintéticos en sus operaciones), la agricultura sin aeración del suelo, o labranza

Figura 4.3 – Emisiones de gases de efecto invernadero estimadas en el 2012 provenientes de agricultura/silvicultura (en $GtCO_2e/año$).



Fuente: FAOSTAT (2015) consultado en septiembre de 2015 y GFW (2015) consultado en septiembre de 2015; año de los datos, 2012.

y la aplicación de fertilizantes de liberación controlada (FLC, por sus siglas en inglés).

La agricultura orgánica reemplaza a los insumos químicos en la producción agrícola por fuentes naturales. En particular, en la agricultura orgánica, los fertilizantes sintéticos que liberan N_2O se sustituyen por productos naturales. El mercado de la agricultura orgánica ha crecido exponencialmente. Por ejemplo, en los Estados Unidos, el mercado de los productos orgánicos pasó de 1 000 millones de dólares en 1990 a 31 mil millones de dólares en 2011 (Scherer, 2013). Seis de los quince principales proveedores de productos orgánicos del mercado estadounidense son de América Latina.

En América Latina, se considera que la agricultura orgánica aporta beneficios considerables manteniendo tradiciones ancestrales de América Latina; promoviendo la salud; agregando valor de mercado; y, como una forma alternativa de proteger los recursos locales. El área de superficie dedicada a la agricultura orgánica en la región casi se duplicó a 6,4 millones de hectáreas entre los años 2000 y 2009 (Garibay & Ugas, 2009). Quince países de ALC han promulgado regulaciones sobre agricultura orgánica, y otros cuatro están elaborando reglamentos sobre agricultura orgánica. Costa Rica y Argentina han alcanzado el estado de terceros países de acuerdo con las regulaciones de la UE sobre agricultura orgánica (Scherer, 2013). Las perspectivas para el creci-

miento ulterior en el sector de productos orgánicos en la región son buenas.

La **agricultura sin labranza** se define como un sistema de siembra de cultivos en suelos sin labrar, que consiste en abrir un surco suficientemente estrecho para obtener una cobertura adecuada de las semillas. En 2009 había unos 111 Mha a nivel mundial de agricultura sin labranza (Derpsch et al., 2010). En todo el mundo, las tasas de adopción más rápidas se han presentado en América del Sur, donde algunos países están utilizando agricultura sin labranza en aproximadamente el 70% de la superficie cultivada (Derpsch et al., 2010). En comparación con las prácticas de labranza intensiva, las fuerzas motrices de la opción sin labranza son ahorros de tiempo, trabajo y combustible, así como mayores rendimientos económicos. El programa “Agricultura de Baixo Carbono” (ABC), un ambicioso esfuerzo agrícola de baja emisión de carbono apoyado por el gobierno brasileño, incluye la no labranza como un elemento central de sus actividades (Magalhães & Lunas Lima, 2014). Principalmente a través de los esfuerzos de los propios agricultores, el sistema se ha consolidado como un nuevo estándar de prácticas agrícolas y una forma diferente de pensar acerca de la agricultura sostenible.

La **fertilización de liberación controlada (FLC)**. Las aplicaciones ineficientes o inoportunas de fertilizantes pueden llevar a la escorrentía de los fertilizantes hacia los cuerpos de agua, su liberación en la atmósfera, la desnitrificación o nitrificación para producir N_2O , o un aprovechamiento deficiente de los nutrientes por los cultivos (Dowbenko, 2003). Los fertilizantes de liberación controlada pueden reducir las emisiones de N_2O mediante la liberación de N cuando se acerca el momento de la absorción por la planta y, por lo tanto, limitan la cantidad de N expuesto a condiciones de desnitrificación. En la actualidad, el uso de FLC en la agricultura es limitado, y representa menos del 1% del consumo de fertilizantes en todo el mundo. La razón principal de esto es el costo: los FLC pueden costar entre tres y ocho veces lo que un fertilizante estándar correspondiente. Además, la agricultura de precisión es una opción de bajo costo, lo que implica la aplicación basada en las necesidades y la aplicación de los fertilizantes en el momento oportuno, todo lo cual reduce el costo de los insumos pero aumenta los costos administrativos.

4.5.2 REDUCCIÓN DE LAS EMISIONES DE CH_4 DERIVADAS DE LA GANADERÍA

El ganado (bovino y ovino) es una fuente importante de emisiones de metano y contribuye significativamente al total de emisiones de carbono procedentes de la agricultura. Se estima que el total de las emisiones de metano en la región de América Latina y el Caribe representa cerca de un tercio de todas las emisiones de la agricultura. El ganado es responsable de la mayoría de estas emisiones, que ascienden a aproximadamente 0,7 GtCO₂e/año (Lesschen et al., 2011). La mayoría del ganado en América Latina no está confinado en corrales, sino que pasta en tierras de pastoreo. Por lo tanto, algunas de las medidas que se proponen en las naciones industriales o en zonas con uso extensivo de corrales no son aplicables en la región de América Latina y el Caribe.

Se han sugerido tres enfoques principales para mitigar las emisiones de metano procedentes de la producción de rumiantes (Yañez-Ruiz et al., 2013; Henderson et al., 2015): a) la aplicación de las mejores prácticas en la gestión “en la granja”; b) la aplicación de soluciones biotecnológicas basadas en la introducción de microorganismos en la función intestinal del animal; y c) cambios en la dieta, incluyendo los forrajes, pastos y suplementos dietéticos que manipulan la función del rumen. No se dispone de estimaciones del impacto potencial de estas medidas en la región.

Científicos del *Agriculture and Agri-Food Canada* que laboran en el Centro de Investigación Lethbridge en Alberta (AAFC, 2012) han realizado una evaluación del impacto potencial de las medidas encaminadas a reducir las emisiones de metano. En la evaluación se concluye que la mayoría de estas medidas serían capaces de reducir las emisiones en el rango de 5-20%. No obstante, dada la dispersión y la pequeña escala de la mayoría de las operaciones ganaderas en la región de ALC, será difícil aplicar estos hallazgos en el contexto de las condiciones de la región.

De todas estas medidas, la mejora en la nutrición es la opción que parece estar más a la mano para reducir las emisiones de metano por unidad de producción incrementando el aumento de peso y la producción de leche. La mejora de la nutrición también podría reducir las emisiones de metano por unidad de energía digestible consumida. El proporcionar suplementos importantes en un bloque de melaza o urea es una técnica que podría utilizarse para reducir directamente la producción de metano, aumentando así el rendimiento. Actualmente,

Tabla 4.6 – Opciones que han sido propuestas para alcanzar reducciones netas de emisiones de GEI de la agricultura a través de la gestión de nutrientes.

Esquema	Tamaño del esfuerzo (millones de ha en 2050)	Tasas de almacenamiento de carbono potenciales (tC/ha-año)	Comentarios
Reemplazo de fertilizantes químicos por estiércol u otros compuestos sin urea	64	0,4	Se asume que la agricultura orgánica en ALC aumenta 10 veces para 2050 en relación con la producción en 2007
Fertilizantes de liberación controlada (urea recubierta)	71	0,3	Se asume que el 10% de la aplicación de fertilizante va a FLC en 2050, a partir del 1% en el 2010
Eliminación de labranza	21	0,15	Se asume que todas las tierras agrícolas se gestionan en esquemas sin labranza en 2050 en contraste con el 70% en 2010 ^a

Fuente: estimaciones del autor^b.

^a El carbono puede acumularse en los suelos, pero el nivel se estabiliza después de veinte años. Cualquier alteración, como el arado, acelerará la liberación de C de los suelos.

^b Los cálculos se incluyen en el Anexo V.

Tabla 4.7 – Algunos esquemas para la disminución del metano asociado al ganado bovino en Argentina.

Esquema	Disponibilidad	Costo relativo	Complejidad técnica	Potencial de reducción de metano
Mejora en la nutrición (ingesta calórica y minerales)	Inmediata	Bajo a medio	Baja	5-10%
Uso de bloques de melaza y urea	Inmediata	Bajo a medio	Baja	Hasta del 40%
Tratamiento alcalino	Inmediato	Bajo	Media	10% o mayor

Fuente: (Berra et al., 2013)

la aplicación de esta técnica está limitada por los requisitos de infraestructura y elaboración y por el nivel de escolaridad de los productores (Berra et al., 2013).

Los suplementos de proteínas y minerales también podrían ser utilizados en situaciones concretas para corregir deficiencias en la dieta. Esta técnica se ha aplicado principalmente a animales de pastoreo y ha logrado mejorar exitosamente la eficiencia reproductiva en el ganado. Sin embargo, sus costos han limitado su aplicación. La Tabla 4.7 resume los efectos de ciertas medidas

evaluadas en Argentina sobre la generación de metano por ganado vacuno. Para los fines del presente estudio, se ha asumido que las emisiones de metano solo se reducirían para el año 2050 a través de técnicas de manejo de nutrientes en un 30%, o aproximadamente 0,2 GtCO₂e. No se ha considerado la aplicación de soluciones biotecnológicas. Aun así, se requerirían cambios considerables en la dieta, que no se limitarían a la región, para reducir aún más las emisiones de CH₄ a partir de la cría de animales.

Tabla 4.8 - Tasas de almacenamiento/disminución de carbono potenciales a través de la reforestación y la restauración y de esfuerzos de agricultura sustentable.

Esquema	Tamaño del esfuerzo (millones de ha para el 2050)	Tasas de almacenamiento de carbono (tC/ha-año)	Sumideros de Carbono Acumulado (GtCO ₂ e/año)
Reforestación	50	3,5	0,6
Restauración a través de agro-silvicultura y silvopastoreo	200	2	1,3
Deforestación evitada	0,8	260 (*)	0,7
Manejo de fertilizantes en tierras de cultivo para disminuir el N ₂ O	n.a.	0,2 -0,4	0,2
Manejo de nutrientes para ganado para disminuir el CH ₄	n.a.	n.a.	0,2
Total	250		3,0

Fuente: elaboración del autor. La estimación para la reforestación utiliza 140 tC/ha como el promedio de carbono almacenado en bosques gestionados como se reporta en la Tabla 4.4 y un periodo de reforestación de cuarenta años; para la restauración, la estimación utiliza una tasa de almacenamiento de carbono a través de silvopastoreo y agrosilvicultura en el rango bajo, de 2 tC/ha, de los valores en la literatura (Tabla 4.5); (*) Las emisiones de carbono evitadas a través de la prevención de la deforestación utilizan 260 tC/ha como el promedio de carbono almacenado por los bosques, de acuerdo con lo estimado por Nair & Garrity (2012) y lo reportado en la Tabla 4.4.

4.6 RESUMEN DE LAS POSIBLES MEDIDAS EN EL USO DE LA TIERRA

En suma, la reforestación, la restauración de tierras y las prácticas agrícolas sostenibles son la clave para asegurar los sumideros de carbono basados en el uso de la tierra. Existe un gran potencial. La Tabla 4.8 resume las distintas contribuciones estimadas discutidas en este capítulo.

Claramente, la deforestación evitada representa la mayor contribución potencial para lograr un futuro de cero emisiones de carbono, y desde un punto de vista climático debería concedérsele un esfuerzo prioritario. Además de detener la deforestación, los esfuerzos para la reforestación y la restauración de tierras a las tasas que se muestran en la Tabla 4.8 también pueden contribuir sustancialmente. La adición de otras medidas en la agricultura y la ganadería podría contribuir a alcanzar un total de 3 GtCO₂e por año.

La información analizada en esta sección también apoya la idea de que las inversiones en la restauración de tierras y la deforestación evitada tienen una amplia justificación económica (Tabla 4.9). Los costos de la deforestación evitada son bajos y son susceptibles de ser

compensados en el mercado voluntario de emisiones de carbono en las condiciones actuales y previsibles. Las inversiones en la reforestación han aumentado a través del tiempo, pero siguen siendo limitadas en ausencia de incentivos fiscales y financieros atractivos. La restauración de tierras a través de la agrosilvicultura y el silvopastoreo bien administrados, y la gestión sostenible de los pastizales, está siendo adoptada de manera creciente por el sector privado en la región, lo que es una prueba de su atractivo financiero.

La reducción de las emisiones de N₂O y CH₄ requerirá gastos iniciales, pero ahora es tecnológicamente factible. Se beneficiaría de una política agrícola explícita que reconociera estas medidas como parte de las políticas y objetivos en materia de clima.

El potencial para la restauración de tierras, que incluye la reforestación, es aún mayor que las áreas contempladas en este análisis. Este potencial abre la posibilidad de que la región en su conjunto podría ser un sumidero neto de carbono. Entonces, América Latina podría proveer un servicio global de gran valor que es muy necesario. La Tabla 4.9 resume los argumentos económicos discutidos en este capítulo.

Tabla 4.9 – Resumen del potencial económico para el cambio en el uso de la tierra y medidas de disminución de GEI en América Latina.

Cambio en el uso de la tierra	Tamaño del esfuerzo (millones ha en 2050)	Comentarios
Deforestación evitada	0,8 (cero deforestación)	Se estima que el costo de la deforestación evitada se encuentra en el rango de 5 dólares/tCO ₂ e o de alrededor del nivel del mercado de carbono voluntario actual. Sin embargo, es probable que los costos evitados sean mucho mayores (en pérdidas de suelo, agua y biodiversidad) y, por lo tanto, ofrecen una justificación económica sólida. Se requieren fuertes incentivos de gobernanza, educación y fiscales o financieros para eliminar la deforestación.
Reforestación	50	Existe una amplia variedad de costos de reforestación en la región. Se están desarrollando e implementando programas de reforestación en la región, algunos de los cuales utilizan especies nativas, con un éxito relativo, pero se requieren incentivos fiscales y financieros para hacer uso del vasto potencial en la región. Los costos de la reforestación asistida y natural son menores, pero estos esfuerzos también requieren incentivos fiscales. Sin estos, los esfuerzos de reforestación pueden permanecer limitados.
Restauración	200	El interés del sector privado en la agrosilvicultura y el silvopastoreo está aumentando. Estas inversiones son económicamente atractivas para el sector privado en varios casos. De cualquier manera, son esenciales una gobernanza robusta y los incentivos fiscales para promover la restauración como una alternativa a la expansión de la frontera agrícola.
Manejo de nutrientes para disminuir el N₂O		Las medidas consideradas para la disminución de N ₂ O también derivarían en mejoras de las finanzas de las operaciones comerciales o en un valor agregado para los productos. El desarrollo de un mercado de carbono podría contribuir a su implementación.
Manejo de CH₄ en el ganado		Las medidas de disminución de metano abordadas en este reporte poseen fuertes cobeneficios pero pueden requerir incentivos adicionales para su aplicación amplia.



5. DESCARBONIZACIÓN DE LA INDUSTRIA

El sector industrial en América Latina es muy heterogéneo. En conjunto, los procesos industriales, junto con la industria manufacturera y la construcción, representan aproximadamente el 11% de las emisiones totales de GEI (Tabla 1.1). Utilizando información ya publicada, en este capítulo se examina el potencial de alcanzar reducciones rentables de las emisiones procedentes de los principales subsectores industriales.

5.1 SITUACIÓN ACTUAL

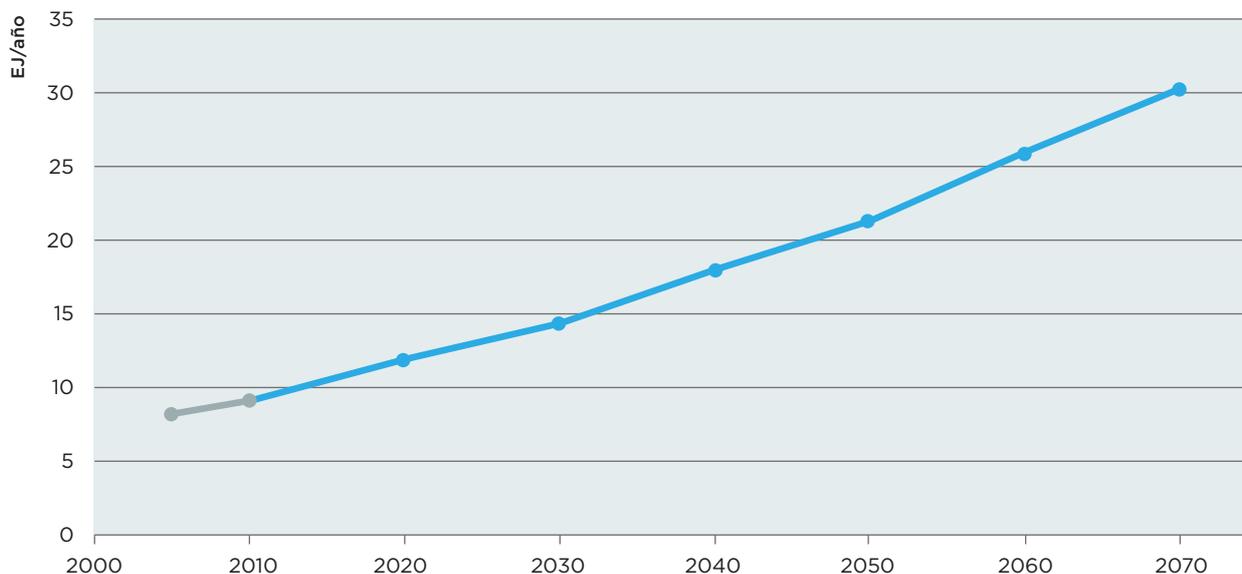
El uso de energía y las emisiones de GEI por la industria, la manufactura y la construcción en ALC están creciendo a la segunda más elevada tasa de todos los sectores de la economía regional (ver la Tabla 1.1). Un índice relativamente bajo de eficiencia energética de la actividad industrial también ha contribuido a la magnitud de las emisiones. El acelerado crecimiento del sector se ha visto favorecido por la demanda de minerales y metales y la rápida expansión de los subsectores del cemento, fertilizantes y productos químicos durante la última década. Más recientemente, sin embargo, la producción industrial se ha contraído o ha moderado

su ritmo de crecimiento en muchos países de la región (Deloitte, 2015).

Los procesos industriales en ALC muestran variaciones significativas en el uso de la energía por unidad de producto, dependiendo de la edad del proceso de manufactura, la tecnología empleada, la calidad de los materiales y la escala. Como consecuencia, es difícil emitir generalizaciones sobre el sector. No obstante, puede decirse que un componente importante del crecimiento en el uso de la energía ha sido la demanda internacional para las exportaciones de mineral de hierro, cobre, aluminio y carbón de los países de América Latina. Las emisiones históricas de GEI de la industria se muestran en la Figura 5.2. Sin embargo, ahora se prevé que durante los próximos años el crecimiento de la demanda de estas materias primas disminuirá.

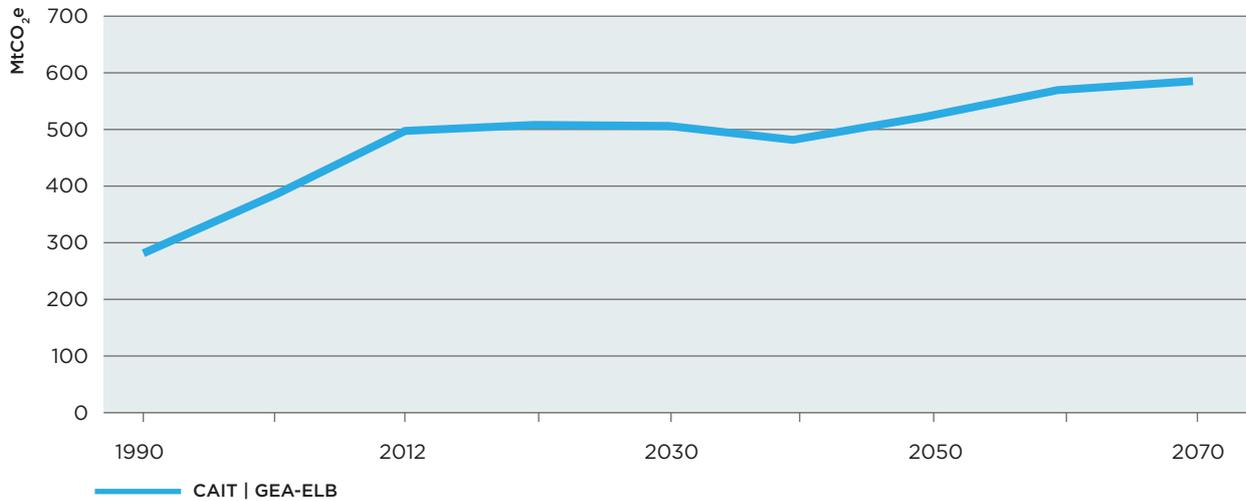
El uso de energía proyectado para 2050 es del orden de 15 a 22 EJ (Figura 5.1). Además, una fracción importante de la producción industrial se ha orientado a satisfacer la demanda internacional. La demanda local y regional de las mismas materias primas se ha retrasado, pero ahora puede constituir una fuente importante de cre-

Figura 5.1 - Uso de energía proyectado por actividades industriales



Fuente: (IIASA, 2012)

Figura 5.2 – Emisiones de actividades industriales históricas y proyectadas



Fuente: (CAIT, 2015; IIASA, 2012)

cimiento en el futuro. Actualmente se ha proyectado que la tasa de crecimiento del índice de fabricación de ALC disminuirá en un 1-2% en el corto plazo (F. Sedano, 2015).

5.2 ANÁLISIS DE RUTA PARA EVALUAR POSIBLES REDUCCIONES DE LAS EMISIONES GENERADAS POR LA INDUSTRIA

Dada la heterogeneidad del sector industrial en la región, es difícil agrupar todas las actividades industriales bajo un escenario común de proyección del uso de energía o generación de emisiones. Las emisiones por sector y su potencial de ahorro de energía deben ser analizadas de manera independiente. El potencial de reducción se ha calculado utilizando un análisis de ruta. Este análisis muestra cómo diferentes sectores podrían descarbonizarse desde 2012 (año de referencia) hasta 2050 (Tabla 5.1). Cada ruta consta de diferentes opciones tecnológicas que se implementan a lo largo del tiempo en diferentes grados. Se desarrollaron hasta cinco rutas para cada sector, tres de las cuales fueron creadas para explorar posibles formas de reducir las emisiones de CO₂ a las bandas de descarbonización establecidas para 2050, es decir, reducciones del 20-40%, 40-60% y 60-80%, respectivamente, en comparación con el año de referencia.

También se desarrollaron dos nuevas rutas, para evaluar (i) ¿qué ocurriría si no se realizaran intervenciones adicionales para acelerar la descarbonización (escenario de línea base, ELB)?, y (ii) el máximo potencial técnico para la descarbonización del sector (Max Tec). La ruta Max Tec utiliza una serie de tecnologías, usualmente al menos en la fase piloto de desarrollo, sujeto a restricciones razonables. Está diseñada para investigar aquello que podría ser técnicamente posible cuando se hacen a un lado los obstáculos lado.

Para determinar el precio por MtCO₂ en cada sector industrial (rentabilidad [millones de dólares/MtCO₂]), este análisis utilizó los resultados de (GOV.UK, 2015). El costo de las reducciones de CO₂ en la industria en América Latina y el Caribe se ha obtenido de esta calificación de rentabilidad y las emisiones de cada subsector específico. Esto es esencialmente una apreciación sobre el grado de reducción que es técnicamente posible. La reducción total se ha estimado a partir de la suma de las emisiones de cada subsector. En la región, las reducciones son de aproximadamente 120 MtCO₂e. Sin embargo, algunas de estas reducciones son bastante costosas. Si se establece un límite superior de la rentabilidad por tCO₂e de 30 dólares, las reducciones de las emisiones en 2050 serían del orden de 112 MtCO₂e. Esta cifra equivale a casi el 22% de las emisiones proyectadas para el sector en 2050 bajo el ELB de IIASA. Para los fines del informe, se ha

Tabla 5.1 – Resultados del análisis para estimar las reducciones de gases de efecto invernadero en la industria.

Sector de la Industria	Eficiencia de costos [millones de dólares/MtCO ₂]	Opciones implementadas (% de reducción total de emisiones con la implementación de las opciones para el 2050)	Costo de la reducción de CO ₂ reducción [millones de dólares]	Reducción [%]	Reducción total
Hierro y Acero	7,7	<ul style="list-style-type: none"> • Tecnologías avanzadas sin CC y reconstrucción (45%) • Soluciones de adaptación sin CAC (34%) • Reciclaje de estufas de gas con CAC (8%) • Mejoras en el Sistema de producción de vapor y de energía (5%) • Mejora en plantas e integración del sector (4%) • Otros (4%) 	368	60	29
Sustancias químicas	23,1	<ul style="list-style-type: none"> • CCS^a (combustión) (49.4%) • CCS (proceso) (13.1%) • Eficiencia energética (11.8%) • Otras innovaciones (10.2%) • Metano descarbonizado como combustible (5.2%) • Otros (10.4%) 	793	79-88	29
Refinamiento de petróleo	7,6	<ul style="list-style-type: none"> • Captura y Almacenamiento de carbono (CAC) – Parte 1, aplicada a CHP y planta de generación de hidrógeno (34,7%) • Captura y Almacenamiento de Carbono (CAC) – Parte 2, aplicado a la pila FCC (21,1%) • Recuperación de calor y energía de residuos (18,1%) • Motores, bombas, compresores y ventiladores (6%) • Otros (20,1) 	559	64	47
Alimentos y Bebidas	289,7	<ul style="list-style-type: none"> • Electrificación de la calefacción (45%) • Diseño del proceso (22,5%) • Biomasa y bioenergía (15%) • Producción, distribución y uso final de vapor (6,4%) • Otros (11%) 	3 183	66-75	8
Pulpa y Papel	28,9	<ul style="list-style-type: none"> • Agrupamiento industrial y creación de redes térmicas (28%) • Electricidad al 100% (ahorro térmico) (22,2%) • Recuperación térmica en toldos futuros (16,5%) • Mejoras en el control del proceso (8,1%) • Otros (25,2%) 	231	98	8
Total			5 134		120

Fuente: estimaciones del autor basadas en datos de (Enerdata, 2015; GOV.UK, 2015)

^a La CAC es aplicada en el futuro (a partir del 2040) bajo la premisa de que esta opción se ha vuelto técnica y económicamente viable y que existen suficientes impulsores para alentar la inversión (GOV.UK, 2015). Los costos mencionados en la columna “eficiencia de costos” son los promedios de los costos de todas las opciones implementadas.

Tabla 5.2 – Potencial de ahorro de energía en la industria.

	Potencial de mejora (%)	
	Países industrializados	Países en desarrollo
Sust. químicas de alto valor	15-25	25-30
Amoniaco, metanol	10-15	15-30
Producción de alúmina	30-40	40-55
Fundiciones de aluminio	5-10	5
Fundición de materiales no ferrosos y otros no ferrosos	35-60	
Hierro y acero	10-15	25-35
Fundición de materiales ferrosos	25-40	
Cemento	20-25	20-30
Cal	10-40	20-50
Vidrio		
Cerámicas		
Pulpa y papel	20-30	15-30
Alimentos, bebidas y tabaco	25-40	0,9
Otros sectores	10-15	25-30
Total	10-20	30-35
Total (excl. material prima)	15-20	30-35

Fuente: (Saygin et al., 2011)

asumido que podría reducirse un volumen adicional de 0,1 GtCO₂e a través de medidas de eficiencia energética.

Esta cifra se compara favorablemente con la estimación del ahorro de energía en la industria propuesta por Saygin et al. (2011). Sin embargo, bajo los supuestos del análisis, es poco probable que las medidas de ahorro de energía sean suficientes para descarbonizar completamente la industria. Existe la posibilidad de electrificar los procesos industriales; cabe señalar, sin embargo, que este factor no se incluyó en el análisis debido a la ausencia de datos.

Además de este potencial para mejorar la eficiencia de carbono, las acciones necesarias para la descarbonización de otros sectores generarían una oportunidad para desarrollar servicios industriales de “baja emisión de carbono”. Las inversiones necesarias para la incorporación a gran escala de las energías renovables incluirían el suministro de un gran número de turbinas eólicas, paneles fotovoltaicos, unidades de energía geotérmica y los equipos electrónicos y mecánicos asociados. Tendría sentido económico desarrollar al menos algunos de estos componentes en la región. Asimismo, las inversiones en la fabricación de vehículos eléctricos, estaciones de carga, componentes electrónicos y otros insumos para el transporte eléctrico podrían ser de origen local.

Además, al menos algunas de las inversiones vinculadas a la descarbonización de la economía regional se utilizarían para adaptar el suministro de componentes a las características del mercado de América Latina. Por ejemplo, los autobuses eléctricos para sistemas ATR, sus estaciones de carga y equipos auxiliares son más propensos a ser implementados primero en América Latina. De hecho, las características de la flota regional, con su énfasis en vehículos colectivos, constituiría una demanda de vehículos eléctricos que es bastante diferente del énfasis actual en automóviles de pasajeros en otras regiones.

Estas oportunidades también podrían generar empleos, promover la creación de empresas y estimular la generación de conocimiento para el desarrollo de recursos para la descarbonización. Estos avances podrían compensar, al menos parcialmente, cualquier alteración del mercado en el corto plazo causada por el ocaso de la industria de los combustibles fósiles en la región.





6. UNA RUTA A CERO EMISIONES DE CARBONO

La ruta hacia una economía de cero emisiones netas de carbono para mediados del siglo XXI analizada en este informe incluye las siguientes acciones: la descarbonización total del sector energético; la electrificación masiva del sector del transporte; la integración de una red de las economías regionales; la expansión del sistema de generación de energía eléctrica para satisfacer las nuevas demandas del transporte; una deforestación neta de cero; la restauración de aproximadamente 250 millones de hectáreas de tierras degradadas mediante una combinación de reforestación natural y asistida, agrosilvicultura y silvopastoreo; la reducción de las emisiones de la agricultura a través de medidas de gestión de nutrientes; y medidas de reducción en el sector industrial.

6.1 LA RUTA A LA DESCARBONIZACIÓN DEL SECTOR ELÉCTRICO

La ruta utilizada en las estimaciones se resume en la Tabla 6.1. La estimación utiliza como punto de partida el escenario de línea base de IIASA-GEA descrito en la base de datos de IIASA para una proyección de las emisiones del sector energético hasta el año 2050. También utiliza sus proyecciones de demanda de energía como se describe en el Capítulo 2.

Para calcular la ruta para llegar a la descarbonización completa, se parte de las siguientes premisas:

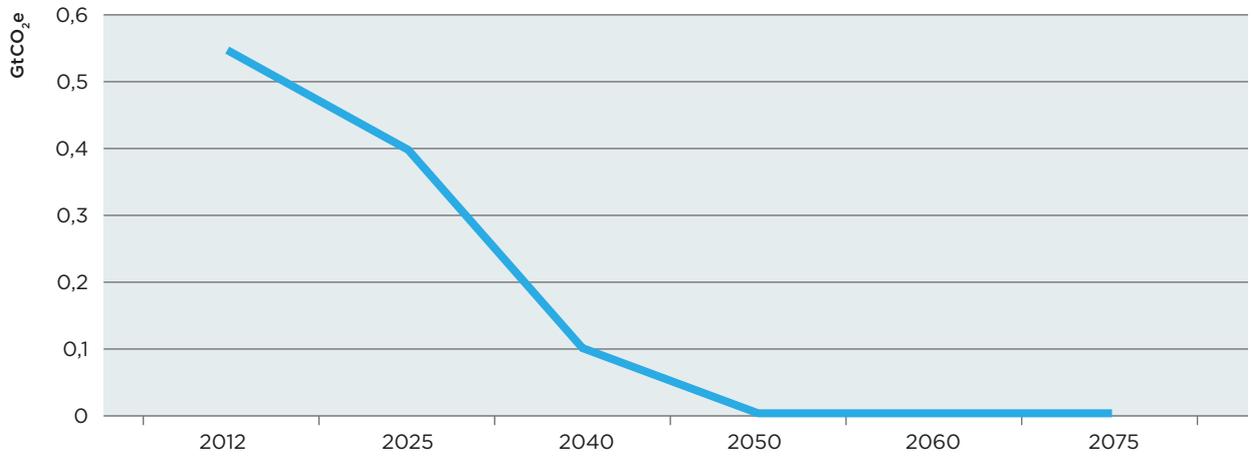
1. Comenzando alrededor de 2020, toda nueva demanda de electricidad será satisfecha a través de energías renovables, es decir, mediante una combinación de la expansión de la capacidad hidroeléctrica complementada con nuevas centrales de energía eólica, solar y geotérmica, que ya tienen LCOEs menores a los del gas natural y el carbón (Figura 2.7). En este informe, esta premisa se justifica por la competitividad de las energías eólica, solar y geotérmica, aunada a la proyección del logro de la paridad para entrega de energía a la red para estas tecnologías, como se discutió en el Capítulo 2.
2. En el año 2030 todas las plantas de producción de combustibles fósiles diferentes de gas actualmente en operación se habrán desmantelado, y para el año 2050 todas las unidades de gas natural también estarán inactivas. La demanda será cubierta por las adiciones correspondientes de las energías renovables (principalmente energías eólica, solar y geotérmica complementadas por la expansión de la hidroeléctrica) con un aumento de la participación de energía solar concentrada y energía distribuida. Debería esperarse para entonces la utilización a gran escala

Tabla 6.1 – Ruta de descarbonización proyectada para el sector energético.

Año	Demanda (PWh)	Crecimiento de la demanda desde 2012 (PWh)	Capacidad instalada de combustibles fósiles (GW)	Factor en línea para nuevas energías renovables (%)	Nueva capacidad instalada para energías renovables desde 2012 (GW)	Emisiones de CO ₂ e remanentes (GtCO ₂ e)
2012	1,3	0	160	48	0	0,5
2025	1,8	0,5	120	40	80	0,4
2040	2,8	1,5	40	40	240	0,1
2050	3,5	2,2	0	48	540	0
2075	5,4	4,1	0	50	960	0

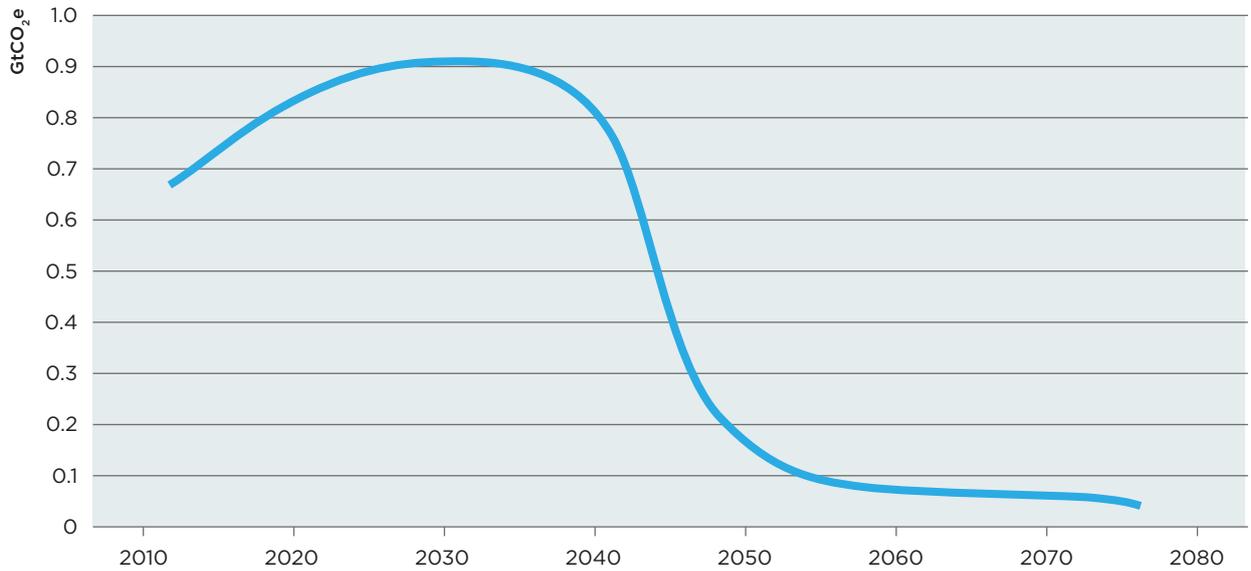
Fuente: elaboración del autor. El crecimiento en la demanda se basa en la IIASA-ELB. La capacidad recién instalada se calcula con base en el factor en línea y 8 500 horas por año.

Figure 6.1 - Descarbonización del sector energético



Fuente: Estimaciones de los autores, consultar Tabla 6.1.

Figura 6.2 - Descarbonización del Sector de Transporte



Fuente: Estimativos de los autores, consultar Tabla 6.2 .

Tabla 6.2 – Ruta de descarbonización proyectada para el sector del transporte

Año	Demanda de combustible en EJ	Crecimiento de la demanda desde 2012 (EJ)	Fracción de la demanda de transporte electrificada (%)	Demanda de energía por sector de transporte bajo la ruta de descarbonización (EJ) (***)	Emisiones de CO ₂ remanentes (GtCO ₂ e)
2012	8	–	pequeña	Desp.	0,67
2025	12	4	0-15	0.9	0,89
2040	16	8	40-60	2.7	0,81
2050	19	11	88 (*)	4.5	0,16 (*)
2075	24	18	88	5.8	0 (**)

Fuente: estimaciones del autor. La demanda de electricidad equivalente se estimó utilizando un cociente de energía y energía de 0,25 para los motores de combustión interna en 2025, con un aumento a 0,30 y 0,32 para 2050 y 2075 y un índice trabajo:energía de 0,9 para los motores eléctricos. Para fines de simplificación se asume que el crecimiento en la demanda para todos los segmentos de la flota es el mismo. (*) La huella de carbono remanente refleja la dificultad para visualizar opciones competitivas para la eliminación de la demanda por el sector de la aviación para mediados de siglo. (**) Se asume que las medidas para desarrollar combustibles de aviación muy bajos en carbono se aplicarán en la segunda mitad del siglo. (***) La demanda de energía se basa en la fracción de la flota que está electrificada y la demanda de energía total proyectada. La electrificación del sector del transporte agregará una demanda de energía adicional sustancial, que se discute en el Capítulo 3.

de centros para el uso y desarrollo de tecnología renovable. Entre los ejemplos se incluye el desarrollo de centrales de generación de energía fotovoltaica y energía solar concentrada a niveles de GW en el desierto de Atacama y otras áreas de alta irradiancia, así como un uso similar localizado de centrales de energía eólica.

- La integración de redes se logrará en 2030, lo cual se reflejará en un incremento en el factor de conexión de fuentes de energía renovable intermitentes. En 2050, la estructura del mercado permitirá que los recursos de energía hidroeléctrica funcionen eficientemente como capacidad de almacenamiento regional, con lo que el factor de conexión de energías renovables llegará al 50%. La energía distribuida seguirá contribuyendo a la generación de capacidad.

El aumento previsto en la demanda es considerable y requerirá un ritmo acelerado de adiciones de capacidad complementadas por un aporte de energía distribuida. En esencia, serán necesarios unos 20 GW anuales de nueva capacidad entre 2025 y 2050. Los requisitos de costo de capital anual serían del orden de 30 mil millones a 40 mil millones de dólares, o menos si la energía distribuida se integra a las opciones de generación. La integración de redes y el uso generalizado de la energía eléctrica distribuida contribuirían así a reducir la tasa de crecimiento requerida para las centrales eléctricas

mediante el aumento de la capacidad firme de fuentes intermitentes, mejorando el aprovechamiento de los embalses hidroeléctricos y contribuyendo al volumen combinado de la auto-generación de pequeña escala.

El análisis muestra (ver la sección 2.9.1) que los LCOEs probablemente sean incluso inferiores que si las inversiones se enfocaran en gas natural. Por lo tanto, un cambio hacia fuentes renovables redundaría en ahorros para los inversionistas y los consumidores. En 2050, sería necesario satisfacer una demanda prevista de 3,5 PWh mediante 540 GW adicionales de energía renovable además de los 171 GW ya instalados para alcanzar un total de alrededor de 0,7 TW. La Figura 6.1 muestra los resultados de esta ruta según se refleja en la huella de carbono prevista del sector de la energía.

Por otra parte, como se discutió en el Capítulo 3, la demanda de energía de un sistema de transporte basado en la electricidad aumentará la demanda de energía en general. Las consecuencias para la demanda total se discuten a continuación.

6.2 LA RUTA A LA ELECTRIFICACIÓN DEL SECTOR DEL TRANSPORTE

La ruta a la electrificación utilizada en el análisis se presenta en la Tabla 6.2. También se ha utilizado el escena-

Tabla 6.3 – Sinergias entre las tecnologías que apoyan la energía y el transporte con bajas emisiones de carbono.

Tecnología	Ritmo global del cambio	Impacto
Generación de energía a partir de fuentes renovables	Los costos de la magnitud de las instalaciones fotovoltaicas ha estado disminuyendo a una tasa del 22% anual desde 1976. El tamaño de Mercado para las celdas fotovoltaicas registró un aumento del 42% anual durante el periodo 2000-2013. La generación de energía distribuida contribuiría a disminuir las tarifas.	Reduce los costos de operación de los vehículos eléctricos
Dispositivos de almacenamiento de energía	Los costos del almacenamiento de energía han disminuido en un 14% anual en los últimos quince años	Mejora la correspondencia entre el suministro y la demanda
Vehículos eléctricos	Los precios de los vehículos eléctricos están disminuyendo y actualmente se prevé que estarán a la par con los de los vehículos de combustión interna para 2020.	El cambio en la demanda de combustibles fósiles a energía eléctrica en el sector del transporte contribuye a una mejora en la correspondencia entre generación y demanda
Estaciones de carga	Están instalándose estaciones de carga inalámbrica como fuente de energía para vehículos grandes.	Aumento en el rango de recorrido de los autobuses, por ejemplo en una ruta de autobuses de tránsito rápido

Fuente: basada en (Seba, 2014)

Tabla 6.4 – Ruta proyectada de disminución/sumidero de carbono del uso de la tierra previsto y cambio del uso de la tierra para América Latina y el Caribe en referencia a IIASA-ELC.

Cambio de uso de la tierra	2020	2030	2050
Área deforestada (Mha) (*)	1,9	1,6	0
Emisiones evitadas provenientes de tasas de deforestación reducidas (GtCO ₂ e) contra las tasas de deforestación proyectadas bajo IIASA-ELB	0	0	0,7
Tierra en restauración (Mha)	20	100	200
Sumidero de carbono anual por la restauración (GtCO ₂ e)	0,1	0,6	1,3
Tierra en reforestación (Mha)	10	20	50
Sumidero de carbono anual por la reforestación (GtCO ₂ e)	0,1	0,2	0,6
Área adicional bajo medidas de gestión de N ₂ O			0,15-0,4
Disminución de N ₂ O en GtCO ₂ e/año por encima del ELB	0	0,1	0,2
Implementación de medidas de disminución de CH ₄ en GtCO ₂ e/año por encima del ELB	0	0,1	0,2
Total (GtCO₂e)	0,2	1,0	3,0

Fuente: estimativos de los autores. (*) En exceso a los estimativos del IIASA y basados en almacenamientos netos de carbono por deforestación evitada de 260 tC per ha de bosques primarios.

rio de línea base de IIASA presentado en el Capítulo 3 para establecer la proyección de la demanda energética del sector, que caería entre 14 y 19 EJ en 2050. El impulsor económico detrás de electrificación masiva fue revisado en el Capítulo 3. Una rápida evolución de la competitividad favorecería la transición a los vehículos eléctricos, mientras que la internalización de los beneficios de la calidad del aire podría fortalecer aún más el escenario económico.

La ruta a la electrificación masiva presupone lo siguiente:

- a) El proceso comienza con el cambio a vehículos eléctricos para todos los sistemas ATR en la región en 2025, y con la adopción de nuevos sistemas ATR eléctricos desde la etapa de diseño en 2025. Aunque este cambio no producirá reducciones sustanciales en el consumo de combustibles fósiles, podría ser un cambio emblemático que ilustre el potencial de la tecnología y con cobeneficios evidentes en las zonas urbanas, y que además estimule el desarrollo del mercado de vehículos eléctricos en el segmento del transporte público.
- b) La flota de vehículos de pasajeros incluye el 15% de unidades eléctricas en 2025, 60% en 2040 y 100% en 2050. Se presenta el mismo ritmo de conversión en los camiones de carga ligera y en todos los autobuses. Esta predicción se basa en las ganancias previstas en la competitividad que se logra en un período de tiempo muy corto, como se explica en el Capítulo 3. Estos segmentos representan el 47% de las emisiones de vehículos de transporte por carretera en la región.
- c) Todo el transporte de carga y de pasajeros por ferrocarril estará electrificado en 2040. De nuevo, este no es un segmento importante del sector, pero la conversión de los ferrocarriles a la red eléctrica es factible en el marco de la tecnología existente y disponible, y señalará la decisión de electrificar el sector.
- d) Todo el transporte marítimo migrará a motores híbridos para el año 2050.
- e) El transporte de carga pesada por carretera funcionará con energía eléctrica en el 5% de las unidades para el año 2025, el 60% en 2040 y será completamente electrificado en 2050.
- f) El transporte aéreo seguirá funcionando con combustibles fósiles hasta 2050.

Las transiciones en los sectores de energía y de transporte pueden apoyarse mutuamente (Tabla 6.3). Las tecno-

logías para la generación de energía, el almacenamiento de energía, las estaciones de carga y los vehículos están avanzando en paralelo, pero tienen el potencial para apoyar la evolución de manera congruente con un futuro de bajas emisiones de carbono.

6.3 CONVERSION DEL USO DE LA TIERRA Y CAMBIO DE USO DE LA TIERRA DE FUENTE A SUMIDERO DE CARBONO

La deforestación evitada tiene costos que podrían ser cubiertos bajo un mercado de carbono en operación y la internalización de los costos económicos evitados. La restauración de las tierras a través de la agrosilvicultura y el silvopastoreo ya está aportando beneficios económicos importantes. Varias de las medidas consideradas en la agricultura se traducirían en una reducción de los costos o el acceso a mercados premium. La ruta para el uso de la tierra y el cambio de uso de la tierra para convertirse en un sumidero neto de carbono supone lo siguiente:

- a) Las tasas de deforestación caen rápidamente desde los niveles altos actuales (ca. 3,4 Mha por año) hasta llegar a cero en 2050 en toda la región. Eliminar la deforestación tendría un efecto importante en las emisiones regionales. En 2050, la deforestación cero significaría que se dejarán de generar unas 0,7 Gt-CO₂e de las emisiones en la proyección del escenario de línea base de IIASA.³⁹ En 2050, la magnitud de los sumideros de carbono asociadas con la deforestación evitada sería equivalente a aproximadamente el 30% de las emisiones bajo el escenario de línea base.
- b) La restauración de tierras a través de la agrosilvicultura y el silvopastoreo, mediante la iniciativa 20x20 como una plataforma de lanzamiento llevará a una tasa de captación de carbono gradual de 2 tC por hectárea y año. En 2020 se estarán restaurando 20 millones de hectáreas (en consonancia con la Iniciativa 20x20), y en el año 2050 se restaurarán 200 millones de hectáreas.
- c) En paralelo, en 2050 se revertiría la deforestación y se realizaría la reforestación de bosques húmedos tropicales en cerca de 50 millones de hectáreas.

³⁹ Se asume que 1 hectárea de deforestación evitada daría por resultado que se eviten 240 tC de emisiones de carbono por retención en bosques no perturbados. La tasa de deforestación previsto bajo el escenario de línea base de IIASA para 2050 equivale a 0,8 Mha.

Tabla 6.5 – Emisiones de gases de efecto invernadero bajo ELB y ruta de descarbonización proyectada en 2050.

Categoría	2012 (MtCO ₂ e)	2050 GEA-ELB (GtCO ₂ e)	Ruta de descarbonización en 2050 (GtCO ₂ e)	Impulsor
Total	4 623	5,3	-0,1	
Generación de energía (*)	544	1,1	0	Las energías solar, eólica y geotérmica ya son competitivas, y sus márgenes están aumentando con el tiempo; la integración de la red eléctrica y la energía distribuida ayudan a la transición.
Procesos industriales, fabricación y construcción	494	0,5	0,4	La industria/fabricación implementa ahorros de energía y medidas de mejora en la tecnología.
Transporte	665	1,4	0,2	Las tecnologías de vehículos eléctricos en rápida evolución y las políticas de calidad de aire contribuyen a la transformación, superando las opciones de combustión interna para la electrificación del sector
Uso de la tierra y silvicultura, agricultura y residuos	2 574	1,9	-1,1**	Se implementan medidas de cero deforestación y de restauración y reforestación a gran escala. Se implementan medidas de gestión de nutrientes en tierras de cultivo y de disminución de CH ₄ del ganado siguiendo las tendencias actuales.
Otros sectores***	346	0,4	0,4	Las emisiones fugitivas y otros consumos de combustible se mantienen constantes conforme al GEA-ELB

(*) En la base de datos de IIASA, la electricidad se combina con la categoría de calefacción. Sin embargo, en América Latina únicamente existe un uso marginal de energía para la calefacción fuera de la industria; (**) valor neto entre las emisiones previstas por uso de la tierra y cambio en el uso de la tierra y sumideros netos de 3,0 GtCO₂e/año; (***) emisiones fugitivas y otra combustión de combustible.

Fuente: datos de emisiones de 2012 por (CAIT, 2015); los datos de GEA-ELB se calcularon de (IIASA, 2012; CAIT, 2015); consultar el texto principal.

- d) Se alcanzaría gradualmente la reducción de las emisiones de N₂O a través de técnicas de manejo de nutrientes.
- e) Se reducirían las emisiones de CH₄ derivada de actividades ganaderas a través de técnicas de gestión de la alimentación.

6.4 TASA DE DESCARBONIZACIÓN PROYECTADA

Las estimaciones para los diferentes sectores y una comparación con el escenario de línea base se muestran en la Tabla 6.5.

6.3 DESCARBONIZACIÓN DE LA INDUSTRIA

La ruta a la descarbonización de la industria utilizada en las estimaciones supone la implementación de todas las medidas con un costo menor de 5 dólares por tCO₂e para 2025 y de todas las medidas con un costo menor de 30 dólares/tCO₂e para 2050.



7. CONCLUSIONES

El informe concluye que el contexto económico y tecnológico actual, así como el entorno de políticas emergentes, ya son propicios para lograr reducciones significativas de las emisiones de carbono en la región de América Latina y el Caribe. El informe también concluye que los avances tecnológicos previsibles y las mejoras previstas en la rentabilidad también apoyarán las medidas de reducción en los sectores de energía, transporte, uso de la tierra e industrial.

Si bien se ha encontrado que los marcos normativos y de políticas actualmente son más favorables a esta evolución que en el pasado, se requieren medidas adicionales, tales como la eliminación de los subsidios a los combustibles fósiles; la voluntad política para lograr la integración de redes de suministro de energía; y reglas claras para la energía distribuida para facilitar la transición expedita del sector de la energía. En el sector del transporte siguen existiendo obstáculos importantes, que incluyen el uso generalizado de subsidios a los combustibles fósiles; la falta de internalización de los costos evitados de la contaminación del aire asociados al uso de vehículos eléctricos; las políticas para asignar espacios públicos a los sistemas de transporte público; el estímulo a movilidad no motorizada; y la necesidad de disposiciones para facilitar la reducción y eventual eliminación de la refinación y distribución de combustibles fósiles.

Los avances recientes en la reducción de la deforestación ilustran el potencial para cambiar la dinámica del cambio de uso de la tierra. El alcance de una deforestación neta igual a cero tendrá un efecto inmediato sobre las emisiones de carbono. Sin embargo, existen importantes barreras que dificultan afianzar estos sumideros. La deforestación continúa irrestricta en muchas áreas de

la región, donde la pobreza y la incapacidad para internalizar el valor de los bosques no han cambiado.

Existe un potencial significativo para la reforestación en la región, y aunque existe un número creciente de experiencias exitosas, los incentivos fiscales y financieros no se encuentran en el nivel necesario para expandir sustancialmente los esfuerzos de reforestación. La agrosilvicultura y el silvopastoreo, como alternativas para la restauración de tierras, tienen un gran potencial para una mayor expansión. Se espera que estos enfoques de paisaje, cuando se gestionan adecuadamente, proporcionen retornos financieros atractivos en promedio. La incorporación de opciones bien conocidas de gestión de nutrientes y medidas de reducción de metano en la ganadería también contribuirá a las reducciones de las emisiones asociadas a la agricultura.

El análisis de ruta para las reducciones de las emisiones derivadas de la industria permite concluir que la implementación de las mejores tecnologías disponibles provocaría una reducción de las emisiones en el sector.

Las medidas revisadas (Tabla 7.1) tienen el potencial de impulsar a la región de América Latina y el Caribe hacia una economía de con cero emisiones netas de carbono, respaldada en sólidos principios económicos y con cobeneficios importantes, aunque no siempre fáciles de monetizar. Sin embargo, la consecución de este objetivo dependerá de la capacidad de transitar y abordar las importantes barreras que se han levantado a lo largo del tiempo por los comportamientos y las políticas habituales. Aun así, desde todas las perspectivas, la región está en una situación propicia para lograr este objetivo.

Tabla 7.1 – resumen de las medidas examinadas como parte de la ruta a cero neto de carbono en América Latina.

Actividades	Tecnología	Beneficios	Costos	Contexto de políticas	Principales barreras
Descarbonización del sector de energía Implementación a gran escala de las energías renovables	Tecnologías disponibles actualmente para energía geotérmica, energía solar y eólica. La energía marina está en desarrollo.	Reducción en los costos de generación. Mejoras en la seguridad energética. Reducción de las emisiones de GEI y contaminantes criterio. La energía libre de carbono contribuirá a las reducciones de GEI en otros sectores.	Costos de generación anualizados para energías fotovoltaica y eólica ya son menores que para gas y carbón en muchos lugares. ESC competitiva en áreas de irradiancia alta; se prevén mejoras adicionales en el corto plazo. Mayor inversión pero menores costos de operación y mantenimiento. Se requieren al menos una inversión de 1 billón de dólares hasta el 2050.	Entorno de políticas cada vez más favorable, un conjunto creciente de incentivos fiscales y un acceso más fácil a la red.	Los subsidios para los combustibles fósiles, en particular para carbón y gas, constituyen un obstáculo importante para la transición. La falta de un mercado de CO ₂ o de un impuesto sobre el carbono retrasa la transición a las energías renovables.
Descarbonización del sector eléctrico Integración de una red regional	Bien establecida. Existen tecnologías y procesos para minimizar los impactos ambientales y sociales.	Optimización de los costos de generación y transmisión. Menores costos de operación y mantenimiento.	El costo de las principales inversiones requeridas para lograr una redintegrada es de unos 5 mil millones de dólares.	Este aspecto se enmarca en el movimiento político más amplio de la integración económica regional.	Falta de voluntad política para avanzar en el proceso de integración de una red en la región.
Descarbonización del sector energético Sistemas de energía distribuida	Disponible.	Cada vez más atractiva económicamente en instalaciones residenciales, comerciales e industriales. Confiabilidad mejorada localmente y menores pérdidas en la transmisión.	Los costos siguen bajando y hacen que la energía distribuida sea una opción atractiva en muchas áreas.	Varios, pero no todos los países han adoptado disposiciones legales que impulsen el desarrollo de sistemas de energía distribuida.	Ausencia de reglas para permitir sistemas de energía distribuida en muchos países.
Electrificación del sector de transporte	Tecnologías disponibles vehículos ligeros y autobuses; en desarrollo para los camiones pesados y los vehículos marítimos	Menores costos de operación y mantenimiento. Beneficios en la calidad del aire en zonas urbanas, así como en generación, eficiencia y seguridad energética. Potencial para el desarrollo de la industria, las empresas y la generación de empleos.	El CNT ya es menor que los Combustibles convencionales para vehículos ligeros. El transporte eléctrico podría llevar al desplazamiento de los recursos de infraestructura vinculados a la refinación, el transporte y la distribución de los destilados líquidos y la fuerza laboral y actividades comerciales asociadas. El costo estimado del reemplazo de la flota de carretera Es de 100 millones de dólares al año.	EL marco de políticas necesita desarrollarse a la par con el sector energético (incentivos fiscales y normativos). Ya se han adoptado políticas que favorecen la implementación de sistemas de transporte público tales como los sistemas ATR en muchos países.	Los subsidios a los combustibles fósiles son un obstáculo clave para la adopción de alternativas. La falta de internalización de los beneficios de salud y otros beneficios ambientales impide la adopción de opciones más limpias. Falta de mercados/ impuestos sobre el carbono retrasa la transición. No existen políticas de transporte público que fomenten el uso de sistemas ATR y transporte no motorizado en muchos países.

Actividades	Tecnología	Beneficios	Costos	Contexto de políticas	Principales barreras
Deforestación Evitada	Disponible	Cobeneficios en la conservación del suelo, el agua y la biodiversidad.	El costo de la deforestación evitada estimado es de unos 5 dólares/tCO ₂ e, que es aproximadamente equivalente al nivel de los mercados voluntarios del carbono actuales. Riesgo sustancial de la respuesta climática en la estabilidad de los bosques.	Aún deben implementarse políticas, reglamentos e incentivos a nivel regional.	Se necesitan incentivos fuertes de gobernanza, educación y fiscales/económicos para eliminar la deforestación. Es necesaria la monetización de los beneficios económicos.
Reforestación	Técnicas disponibles para la reforestación natural, asistida y de plantaciones.	Algunos programas de reforestación con especies nativas están siendo desarrollados e implementados en la región con relativo éxito.	Existe una amplia gama de costos de reforestación en la región. El IPCC (2007) ha concluido que "los costos de mitigación a través de la silvicultura varían de 0,1 a 20 dólares por tonelada de dióxido de carbono en algunos países tropicales en desarrollo".	El marco de políticas ha mejorado considerablemente en algunos países (Brasil, Por ejemplo), pero se requieren medidas adicionales en toda la región ALC.	Se requieren incentivos fiscales y financieros para aprovechar el vasto potencial de la región. Sin estos, los esfuerzos de reforestación podrían seguir siendo limitados.
Restauración	Técnicas agroforestales y silvopastorales ampliamente disponibles y técnicamente comprobadas.	Seguridad alimentaria. Cobeneficios en la conservación de los suelos o la evitación de la erosión de los suelos; mantenimiento de los nutrientes del suelo; mantenimiento de la estabilidad de los ciclos hidrológicos, la conservación de la biodiversidad y el almacenamiento de carbono.	El interés creciente del sector privado en el sector agroforestal y silvopastoral refleja el hecho de que estas inversiones son económicamente atractivas para el sector privado.	La política agraria y forestal podría reflejar de mejor manera el énfasis en la restauración de las tierras como un elemento clave de la sostenibilidad.	Se necesitan sólidas iniciativas de gobernanza e incentivos fiscales para promover la restauración como una alternativa a la expansión de la frontera agrícola.
Manejo de nutrientes para abatir el N₂O	Medidas incluidas (fertilizantes sin NH ₄ , de liberación controlada y eliminación de labranza) bien establecidas.	Las medidas consideradas para abatir el N ₂ O también se traducirían en una mejora financiera de las operaciones comerciales o en el valor premium de los productos.	La técnica sin labranza se ha expandido rápidamente, lo cual indica su atractivo financiero. Los costos de los fertilizantes de liberación controlada pueden oscilar entre 3 y 8 veces el costo de los fertilizantes convencionales.	Las políticas agrícolas deben internalizar el potencial de reducciones de NO ₂ como parte de las políticas de clima.	La ausencia de un sólido mercado de carbono impide una adopción más rápida. Se necesitan incentivos fiscales para su aplicación generalizada.
Gestión de CH₄ en la cría de ganado	Medidas incluidas bien establecidas.	Las medidas darían como resultado mejores rendimientos y un valor premium de los productos.	Se necesitan costos adicionales por adelantado.	Las políticas agrícolas deben internalizar el potencial de lograr reducciones en las emisiones de CH ₄ como parte de las políticas de clima.	La ausencia de un sólido mercado de carbono impide la adopción más rápida. El nivel de conciencia limita la implementación.
Descarbonización de la industria	Tecnologías disponibles.	Las medidas llevarían a reducciones en el uso de la energía.	La mayoría de las medidas tienen un costo menor de 30 dólares /tonelada de CO ₂ e.		La ausencia de un mercado de carbono sólido y de un impuesto sobre el carbono impide una adopción más rápida.

REFERENCIAS

- AAFC (2012): 'Reducing methane emissions from live-stock'. Alberta. Available from: <http://www.agr.gc.ca/eng/science-and-innovation/science-publications-and-resources/technical-factsheets/reducing-methane-emissions-from-live-stock/?id=1305058576718> [Accessed 04 November 2015].
- Alegre, J., Arévalo, L., Ricse, A., Barbaran, J. & Palm, C. (2001): 'Reservas de Carbono y emisión de gases con diferentes sistemas de uso de la tierra en dos sitios de la amazonía peruana'. Tibaitatá, Colombia.
- ANTF (2011): 'Rail Freight Transportation in Brazil: Post-concessions advances and investments'. Sao Paulo, Brazil. Available from: <http://www.antf.org.br/pdfs/palestra-vilaca-2011antf1205---sao-paulo---rail-and-metro---latin-america-2011---ingles.pdf> [Accessed 04 November 2015].
- Bair, L.S. & Alig, R.J. (2007): 'Regional Cost Information for Private Timberland: Conversion and Management'. DIANE Publishing.
- Banerjee, R., Cong, Y., Gielen, D., Jannuzzi, G., Maréchal, F., McKane, A.T., Rosen, M.A., Es, D. van & Worrell, E. (2012): 'Chapter 8 – Energy End Use: Industry'. In: *Global Energy Assessment: Toward a Sustainable Future*. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press. Available from: http://www.iiasa.ac.at/web/home/research/Flagship-Projects/Global-Energy-Assessment/GEA_Chapter8_industry_hires.pdf [Accessed 04 November 2015].
- Barbero, J.A. (2014): 'Transporte y energía: los desafíos del desarrollo sostenible'. Available from: <http://www.uncu.edu.ar/centrosasuntosglobales/upload/barbero-jose-transporte-y-energia-uncuyo-ceag-seminario-11-4-14.pdf> [Accessed 04 November 2015].
- Di Bella, G., Norton, L., Ntamatungiro, J., Ogawa, S., Samake, I. & Santoro, M. (2015): 'Energy Subsidies in Latin America and the Caribbean: Stocktaking and Policy Challenges'. Available from: <https://www.imf.org/external/pubs/ft/wp/2015/wp1530.pdf> [Accessed 04 November 2015].
- BenDor, T., Lester, T.W., Livengood, A., Davis, A. & Yonavjak, L. (2015): 'Estimating the size and impact of the ecological restoration economy'. *PloS one*. 10 (6). pp. e0128339.
- Berlin (2013): 'Berlin traffic data'. Available from: http://www.stadtentwicklung.berlin.de/verkehr/politik_planung/zahlen_fakten/download/Mobilita_en_Chap-1-2.pdf [Accessed 04 November 2015].
- Berra, G., Finster, L., Castuma, E. & Maldonado, V. (2013): 'Reducción de emisiones de metano provenientes del ganado bovino'. Available from: <http://www.estrucplan.com.ar/Producciones/entrega.asp?IDEntrega=3073> [Accessed 04 November 2015].
- BID (2015): 'Observatorio Regional de Transporte de Carga y Logística del BID'. Available from: <http://www.iadb.org/es/proyectos/project-information-page,1303.html?id=RG-T1897> [Accessed 04 November 2015].
- Birch, J.; Newton, A.; Alvarez, C.; Cantarello, E.; Echeverría, C.; Kirtzberger, E.; Schiappacasse, I.; Tejedor, N.; and Polasky, S. (2010): 'Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America', Vol. 107, No. 50 (December 14, 2010), pp. 21925-21930
- Blaser, J. & Robledo, C. (2007): 'Initial Analysis of the Mitigation Potential in the Forestry Sector'. Berne. Available from: https://unfccc.int/files/cooperation_and_support/financial_mechanism/application/pdf/blaser.pdf [Accessed 04 November 2015].
- Bloomberg (2011): 'Solar, Energy Smart Technologies: Research Note'. Available from: http://sun-connect-news.org/fileadmin/DATEIEN/Dateien/New/PV_and_Batteries_as_Alternative_to_Off-Grid_Diesel_Markets_-_Bloomberg_New_Energy_Dec_2011.pdf [Accessed 04 November 2015].
- BNEF, 2016. *Electric Vehicles To Be 35% Of Global New Car Sales By 2040*. Bloomberg New Energy Finance. February, 2016.
- Bogotá (2013): 'Cámara de Comercio de Bogotá'. Available from: <http://www.ccb.org.co/Investigaciones-Bogota-y-Region/Desarrollo-Urbano-y-Movilidad/Movilidad/Transporte-publico-y-privado> [Accessed 04 November 2015].
- Brander, M., Sood, A., Wylie, C., Haughton, A. & Lovell, J. (2011): 'Electricity-specific emission factors for grid electricity'. Available from: <http://ecomet-rica.com/assets/Electricity-specific-emission-factors-for-grid-electricity.pdf> [Accessed 04 November 2015].
- BRTdata (2015): 'Global BRT Data'. Available from: www.BRTdata.org [Accessed 04 November 2015].
- CAF (2011): 'Desarrollo Urbano y Movilidad en América Latina'. Available from: http://omu.caf.com/media/30839/desarrollourbano_y_movilidad_americalatina.pdf [Accessed 04 November 2015].
- CAF (2010): 'Observatorio de Movilidad Urbana para América Latina'. Available from: <http://www.caf.com/es/temas/o/observatorio-de-movilidad-urbana/> [Accessed 04 November 2015].
- CAF (2012): 'Nuevas Oportunidades de Interconexión Eléctrica en América Latina'. Colombia. Available from:

- <http://publicaciones.caf.com/media/18406/opportunidades-interconexion-electrica-america-latina.pdf> [Accessed 04 November 2015].
- CAIT (2015): 'Climate Analysis Indicators Tool: WRI's Climate Data Explorer'. Washington, DC. Available from: <http://cait.wri.org/> [Accessed 04 November 2015].
- Callo-Concha, D., Krishnamurthy, L. & Alegre, J. (2002): 'Secuestro de carbono por sistemas agroforestales amazónicos'. México. Available from: <http://www.redalyc.org/pdf/629/62980202.pdf> [Accessed 04 November 2015].
- Del Campo, S. (2012): 'Estrategia Nacional de Energía 2012–2030'. Ministerio de Energía, Gobierno de Chile. Available from: <http://www.minenergia.cl/estrategia-nacional-de-energia-2012.html> [Accessed 04 November 2015].
- CEPROEC (2015): 'Estimación del consumo de combustibles en el transporte terrestre en Ecuador'. Quito, Ecuador. Available from: [http://ceproec.iaen.edu.ec/download/wps\(2\)/2015_05.pdf](http://ceproec.iaen.edu.ec/download/wps(2)/2015_05.pdf) [Accessed 04 November 2015].
- CleanTechnica (2015): 'US & Brazil Pledge Jointly To Raise Renewable Energy To 20% By 2030'. Available from: <http://cleantechnica.com/2015/07/01/us-brazil-pledge-jointly-raise-renewable-energy-20-2030/> [Accessed 04 November 2015].
- Copenhagen (2013): 'Copenhagen: Preferred Transit Mode'. Available from: <http://ddotdish.com/page/4/> [Accessed 04 November 2015].
- Curitiba (2011): 'Curitiba, Brazil: a model of transit oriented planning'. Available from: http://www.ecomobility.org/fileadmin/template/project_templates/ecomobility/files/Publications/Case_stories_EcoMobility_Curitiba_PDF_print.pdf [Accessed 04 November 2015].
- Deloitte (2015): 'Latin America Economic Outlook'. Available from: <http://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/global/Documents/About-Deloitte/gx-gbc-latin-america-economic-outlook-july-2015.pdf> [Accessed 04 November 2015].
- Derpsch, R., Friedrich, T., Kassam, A. & Hongwen, L. (2010): 'Current status of adoption of no-till farming in the world and some of its main benefits'. Available from: <https://ijabe.org/index.php/ijabe/article/view/223> [Accessed 04 November 2015].
- Deutsche Bank (2015): 'Deutsche Bank report: solar grid parity in a low oil price era'. Frankfurt am Main. Available from: <https://www.db.com/cr/en/concrete-deutsche-bank-report-solar-grid-parity-in-a-low-oil-price-era.htm> [Accessed 04 November 2015].
- DNV (2010): 'Pathways to low carbon shipping: abatement potential towards 2030'. Høvik, Norway. Available from: <http://cleantech.cnss.no/wp-content/uploads/2011/05/2010-DNV-Pathways-to-low-carbon-shipping-Abatement-potential-towards-2030.pdf> [Accessed 04 November 2015].
- Dowbenko, R.E. (2003): 'New Fertility Product – ESN: Controlled-Release Nitrogen for Enhanced Nitrogen Efficiency and Improved Environmental Safety'. Available from: http://www.umanitoba.ca/faculties/afs/MAC_proceedings/proceedings/2006/dowbenko_new_fertility_product.pdf [Accessed 04 November 2015].
- Dutzik, T. & Baxandall, P. (2013): 'A New Direction: Our Changing Relationship with Driving and the Implications for America's Future'. Available from: <http://usp.org/reports/usp/new-direction> [Accessed 04 November 2015].
- Ebinger, J. & Vergara, W. (2011): 'Climate impacts on energy systems: key issues for energy sector adaptation'. Washington, DC. Available from: <http://documents.worldbank.org/curated/en/2011/01/13888226/climate-impacts-energy-systems-key-issues-energy-sector-adaptation> [Accessed 04 November 2015].
- Ecofys (2009): 'Role and Potential of Renewable Energy and Energy Efficiency for Global Energy Supply'. Dessau-Roßlau, Germany. Available from: http://www.ecofys.com/files/files/report_role_potential_renewable_energy_efficiency_global_energy_supply.pdf [Accessed 04 November 2015].
- Ecofys (2015): 'G7+EU INDCs: some improvement, but a large emissions gap remains – Climate Action Tracker policy brief'. Available from: <http://www.ecofys.com/en/publications/g7eu-indcs-some-improvement-but-a-large-emissions-gap-remains/> [Accessed 04 November 2015].
- EFE (2015): 'Chile sets 70 pct. non-conventional renewable energy target for 2050'. Santiago, Chile. Available from: <http://www.efc.com/efc/english/business/chile-sets-70-pct-non-conventional-renewable-energy-target-for-2050/50000265-2726425> [Accessed 04 November 2015].
- EIA (2015): 'International Energy Statistics'. Washington, D.C. Available from: <http://www.eia.gov/cfapps/ipdbproject/IEDIndex3.cfm?tid=2&pid=2&aid=12> [Accessed 04 November 2015].
- Enerdata (2015): 'Research on energy efficiency, CO₂ emissions, energy consumption, forecast'. Available from: <http://www.enerdata.net/> [Accessed 04 November 2015].

REFERENCIAS

- Enkvist, P.-A., Naucclér, T. & Rosander, J. (2007): 'A cost curve for greenhouse gas reduction'. Available from: http://www.mckinsey.com/insights/sustainability/a_cost_curve_for_greenhouse_gas_reduction [Accessed 04 November 2015].
- EPA (2015): 'Emissions Factors & AP 42, Compilation of Air Pollutant Emission Factors'. Available from: <http://www3.epa.gov/ttnchie1/ap42/> [Accessed 04 November 2015].
- F. Sedano (2015): 'Latin America Manufacturing Outlook July 2015'. Available from: <https://www.mapi.net/RESEARCH/PUBLICATIONS/LATIN-AMERICA-MANUFACTURING-OUTLOOK-JULY-2015> [Accessed 04 November 2015].
- Falcochchio, J.C. & Levinson, H.S. (2015): 'The Costs and Other Consequences of Traffic Congestion'. pp. 159–182. Available from: http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-15165-6_13 [Accessed 04 November 2015].
- FAO (2014): 'Agriculture's greenhouse gas emissions on the rise'. Rome, Italy. Available from: <http://www.fao.org/news/story/en/item/216137/icode/> [Accessed 04 November 2015].
- FAOSTAT (2015): 'Food and Agriculture Organization of the United Nations'. Database. Available from: <http://faostat3.fao.org/download/G1/GT/E> [Accessed 04 November 2015].
- Farrell, A.E., Plevin, R.J., Turner, B.T., Jones, A., O'Hare, M. & Kammen, D.M. (2006): 'Ethanol Can Contribute to Energy and Environmental Goals'. *Science*. 311 (5760). pp. 506–508. Available from: <http://www.sciencemag.org/cgi/doi/10.1126/science.1121416> [Accessed 04 November 2015].
- Fearnside, P.M., Barbosa, R.I. & de Alencastro Graça, P.M.L. (2007): 'Burning of secondary forest in Amazonia: biomass, burning efficiency and charcoal formation during land preparation for agriculture in Apiaú, Roraima, Brazil'. *Forest Ecology and Management*. 242 (2-3). pp. 678–687. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378112707001260> [Accessed 04 November 2015].
- Feldman, D., Barbose, G., Margolis, R., James, T., Weaver, S., Darghouth, N., Fu, R., Davidson, C., Booth, S. & Ryan, W. (2014): 'Photovoltaic System Pricing Trends Historical, Recent, and Near-Term Projections 2014 Edition'. Available from: <http://www.nrel.gov/docs/fy14osti/62558.pdf> [Accessed 04 November 2015].
- Fenhann, J. (2015): 'Greenhouse Gas Abatement Cost Model GACMO'. Copenhagen, Denmark. Available from: <http://www.cdmpipeline.org/> [Accessed 04 November 2015].
- Ferreira, F.H.G., Messina, J., Rigolini, J., López-Calva, L.-F., Lugo, M.A. & Vakis, R. (2012): 'Economic Mobility and the Rise of the Latin American Middle Class'. Washington D.C.: The World Bank. Available from: <http://elibrary.worldbank.org/doi/book/10.1596/978-0-8213-9634-6> [Accessed 04 November 2015].
- Franck, N.T. (2015): 'Flexibility from an Institutional Viewpoint, DK experiences'. Available from: www.energinet.dk [Accessed 04 November 2015].
- FS UNEP Centre (2015): 'Global Trends in Renewable Energy Investment 2015'. Available from: <http://fs-unep-centre.org/publications/global-trends-renewable-energy-investment-2015> [Accessed 04 November 2015].
- Fueleconomy (2015): 'Plug-in Hybrid Electric Vehicles'. Available from: <https://www.fueleconomy.gov/feg/label/learn-more-PHEV-label.shtml> [Accessed 04 November 2015].
- Fujisaka, S., Castilla, C., Escobar, G., Rodrigues, V., Veneklaas, E., Thomas, R. & Fisher, M. (1998): 'The effects of forest conversion on annual crops and pastures: Agriculture, Ecosystems & Environment'. 69 (1). pp. 17–26. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167880998000917> [Accessed 04 November 2015].
- Garibay, S. V. & Ugas, R. (2009): 'Organic Farming in Latin America and the Caribbean'. In: *The World of Organic Agriculture: Statistics and Emerging Trends 2009*. Frick, Bonn and Geneva: FiBL, IFOAM and ITC, pp. 176–185. Available from: <http://orgprints.org/17931/> [Accessed 04 November 2015].
- Gélvez, J.A.G. & Obando, C. (2014): 'La motorización, el número de viajes y la distribución modal en Bogotá: pasado y posible futuro'. Available from: <http://www.scielo.org.co/pdf/ring/n40/n40a02.pdf> [Accessed 04 November 2015].
- GENI (2011): 'Renewable Energy Potential of Chile', Global Energy Network Institute. Available from: http://www.geni.org/globalenergy/research/renewable-energy-potential-of-chile/Chile_2020_Report_II_PBM_final.pdf [Accessed 04 November 2015].
- GFW (2015): 'Global Forest Watch'. Available from: <http://www.globalforestwatch.org/> [Accessed 04 November 2015].
- Gibbs, H.K., Munger, J., L'Roe, J., Barreto, P., Pereira, R., Christie, M., Amaral, T. & Walker, N.F. (2015): 'Did Ranchers and Slaughterhouses Respond to ZeroDeforestation Agreements in the Brazilian Amazon?' *Conservation Letters*.

- Gorham, R. (2002): 'Air pollution from ground transportation: an assessment of causes, strategies and tactics, and proposed actions for the international community'. Tournesol Conseils.
- GOV.UK (2015): 'Industrial Decarbonisation and Energy Efficiency Roadmaps to 2050'. Available from: <https://www.gov.uk/government/publications/industrial-decarbonisation-and-energy-efficiency-roadmaps-to-2050> [Accessed 04 November 2015].
- GOV.UK (2012): 'Marine Energy Development: Taking Steps for Developing the Chilean Resource'. Available from: https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/207868/Marine_Energy_Report_-_ENGLISH.pdf [Accessed 04 November 2015].
- Grieg-Gran, M. (2008): 'The Cost of Avoiding Deforestation'. London. Available from: <http://pubs.iied.org/pdfs/Go2489.pdf> [Accessed 04 November 2015].
- Guerrero, P. & Abad, J. (2013): 'Assessment of Port Performance and Port Connectivity Study in Belize, Central America and the Dominican Republic'. Available from: <http://idbdocs.iadb.org/wsdocs/getdocument.aspx?docnum=37578169> [Accessed 04 November 2015].
- Guzmán, W. & Arévalo, L. (2003): 'Servicios ambientales de almacenamiento de carbono como activo para el desarrollo en la Amazonía Peruana: avances y retos'. Pucallpa, Universidad Nacional de Ucayali.
- Hansen, M. C., P. V. Potapov, R. Moore, M. Hancher, S. A. Turubanova, A. Tyukavina, D. Thau, S. V. Stehman, S. J. Goetz, T. R. Loveland, A. Komareddy, A. Egorov, L. Chini, C. O. Justice, and J. R. G. Townshend (2013): 'Hansen/UMD/Google/USGS/NASA Tree Cover Loss and Gain Area'. University of Maryland, Google, USGS, and NASA. Accessed through Global Forest Watch. Available from: <http://earthenginepartners.appspot.com/science-2013-global-forest> [Accessed 04 November 2015].
- Hecht, S.B. (2014): 'The Natures of Progress: Land Use Dynamics and Forest Trends in Latin America and the Caribbean'. Available from: <http://www.iadb.org/wms-files/products/publications/documents/36735843.pdf> [Accessed 04 November 2015].
- Henderson, B., Falcucci, a., Mottet, a., Early, L., Werner, B., Steinfeld, H. & Gerber, P. (2015): 'Marginal costs of abating greenhouse gases in the global ruminant livestock sector. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*'. Available from: <http://link.springer.com/10.1007/s11027-015-9673-9> [Accessed 04 November 2015].
- Heubach, K., Wittig, R., Nuppenau, E.-A. & Hahn, K. (2011): 'The economic importance of non-timber forest products (NTFPs) for livelihood maintenance of rural west African communities: a case study from northern Benin'. *Ecological Economics*. 70 (11). pp. 1991–2001. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921800911002047> [Accessed 04 November 2015].
- Hurteau, M.D. & Brooks, M.L. (2011): 'Short- and Long-term Effects of Fire on Carbon in US Dry Temperate Forest Systems'. *BioScience*. 61 (2). pp. 139–146. Available from: <http://www.jstor.org/doi/abs/10.1525/bio.2011.61.2.9> [Accessed 04 November 2015].
- IEA (2015): 'Consumption of oil products: Non-OECD Americas'. Washington, DC. Available from: <http://www.iea.org/stats/WebGraphs/LATINAMERI1.pdf> [Accessed 04 November 2015].
- IFAD (2010): 'Rural Poverty Report 2011'. *New Realities, New Challenges: New Opportunities for Tomorrow's Generation*. Rome, Italy.
- IIASA – Riahi, K., F. Dentener, D. Gielen, A. Grubler, J. Jewell, Z. Klimont, V. Krey, D. McCollum, S. Pachauri, S. Rao, B. van Ruijven, D. P. van Vuuren and C. Wilson (2012): 'Chapter 17: Energy Pathways for Sustainable Development. In *Global Energy Assessment: Toward a Sustainable Future*', Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA and the International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, pp. 1203–1306. ISBN - 9781 10700 5198 hardback / ISBN - 9780 52118 2935 paperback
- INEGI (2012): 'Encuesta Anual de Transportes 2011'. Available from: http://www.inegi.org.mx/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/integracion/encues-trans/2011/EAT1_2011.pdf [Accessed 04 November 2015].
- INPE (2010): 'Desmatamento Cai'. Available from: <http://www.inpe.br/ingles/index.php> [Accessed 04 November 2015].
- IPCC (2007): 'The Physical Science Basis'. *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press.
- IPCC (2014): 'Climate Change 2014: Synthesis Report'. *Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

REFERENCIAS

- IRENA (2012): 'Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series – Concentrating Solar Power'. Available from: http://www.irena.org/documentdownloads/publications/re_technologies_cost_analysis-csp.pdf [Accessed 04 November 2015].
- IRENA (2015a): 'Renewable Energy in Latin America 2015: An Overview of Policies'. Abu Dhabi. Available from: http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_RE_Latin_America_Policies_2015.pdf [Accessed 04 November 2015].
- IRENA (2015b): 'Renewable Power Generation Costs in 2014'. Available from: http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_RE_Power_Costs_2014_report.pdf [Accessed 04 November 2015].
- Istamto, T., Houthuijs, D. & Leuret, E. (2014): 'Willingness to pay to avoid health risks from road-traffic-related air pollution and noise across five countries'. *Science of The Total Environment*. 497-498. pp. 420–429. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969714011474> [Accessed 04 November 2015].
- Jianbo, L. (2006): 'Energy balance and economic benefits of two agroforestry systems in northern and southern China'. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 116 (3-4). pp. 255–262. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167880906000971> [Accessed 04 November 2015].
- Justen, A., Martínez, F., Lenz, B. & Cortés, C. (2012): 'Santiago 2030: Perspectives on the Urban Transport System'. In: *Risk Habitat Megacity*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, pp. 207–227. Available from: <http://www.springerlink.com/content/g86567515285wk80/> [Accessed 04 November 2015].
- Kaimowitz, D. (2008): 'The Prospects for Reduced Emissions from Deforestation and Degradation (REDD) in Mesoamerica'. *International Forestry Review*. 10 (3). pp. 485–495. Available from: <http://openurl.ingenta.com/content/xref?genre=article&issn=1465-5489&volume=10&issue=3&page=485> [Accessed 04 November 2015].
- Kindermann, G., Obersteiner, M., Sohngen, B., Sathaye, J., Andrasko, K., Rametsteiner, E., Schlamadinger, B., Wunder, S. & Beach, R. (2008): 'Global cost estimates of reducing carbon emissions through avoided deforestation'. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. [Online]. 105 (30). pp. 10302–10307. Available from: <http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0710616105> [Accessed 04 November 2015].
- Klinge, H., Adis, J. & Worbes, M. (1995): 'The vegetation of a seasonal varzea forest in the lower Solimões river, Brazilian Amazonia', Scielo, Acta Amazonica. Available from: http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0044-59671995000400201&script=sci_abstract [Accessed 04 November 2015].
- Kost, C., Mayer, J.N., Thomsen, J., Hartmann, N., Senkpiel, C., Philipps, S., Nold, S., Lude, S., Saad, N. & Schlegl, T. (2013): 'Levelized Cost of Electricity Renewable Energy Technologies'. Freiburg, Germany. Available from: <http://www.ise.fraunhofer.de/en/publications/veroeffentlichungen-pdf-dateien-en/studien-und-konzeptpapiere/study-levelized-cost-of-electricity-renewable-energies.pdf> [Accessed 04 November 2015].
- Kumar, B.M., George, S.J., Jamaludheen, V. & Suresh, T.K. (1998): 'Comparison of biomass production, tree allometry and nutrient use efficiency of multi-purpose trees grown in woodlot and silvopastoral experiments in Kerala, India'. *Forest Ecology and Management*. 112 (1). pp. 145–163.
- Lal, R. (2005): 'Forest soils and carbon sequestration'. *Forest Ecology and Management*. 220 (1). pp. 242–258.
- Lantz, E., Hand, M. & Wisser, R. (2012): 'The Past and Future Cost of Wind Energy'. Denver, Colorado. Available from: <http://www.nrel.gov/docs/fy12osti/54526.pdf> [Accessed 04 November 2015].
- Lapeyre, T., Alegre, J. & Arévalo, L. (2004): 'Determinación de las reservas de carbono de la biomasa aérea, en diferentes sistemas de uso de la tierra en San Martín, Perú'. Available from: http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1726-22162004000100006 [Accessed 04 November 2015].
- Law 20571 (2012): 'Reference to law 20571 of Chile'. Available from: <http://www.minenergia.cl/ley20571/wp-content/uploads/2015/03/Ley20571.pdf> [Accessed 04 November 2015].
- Lesschen, J.P., van den Berg, M., Westhoek, H.J., Witzke, H.P. & Oenema, O. (2011): 'Greenhouse gas emission profiles of European livestock sectors'. *Animal Feed Science and Technology*. 166-167. pp. 16–28. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0377840111001775> [Accessed 04 November 2015].
- Lorenz, K. & Lal, R. (2014): 'Soil organic carbon sequestration in agroforestry systems: a review'. *Agronomy for Sustainable Development*. 34 (2). pp. 443–454. Available from: <http://link.springer.com/10.1007/s13593-014-0212-y> [Accessed 04 November 2015].

- Luckow, P., Stanton, E.A., Fields, S., Biewald, B., Jackson, S., Fisher, J. & Wilson, R. (2015): '2015 Carbon Dioxide Price Forecast'. Cambridge, Massachusetts. Available from: [http://www.synapse-energy.com/sites/default/files/2015 Carbon Dioxide Price Report.pdf](http://www.synapse-energy.com/sites/default/files/2015%20Carbon%20Dioxide%20Price%20Report.pdf) [Accessed 04 November 2015].
- Magalhães, M.M. de & Lunas Lima, D.A.L. (2014): 'Low-Carbon Agriculture in Brazil: The Environmental and Trade Impact of Current Farm Policies'. Geneva, Switzerland. Available from: [http://www.ictsd.org/sites/default/files/research/Low-Carbon Agriculture in Brazil.pdf](http://www.ictsd.org/sites/default/files/research/Low-Carbon%20Agriculture%20in%20Brazil.pdf) [Accessed 04 November 2015].
- Martin, E.W., Chester, M. V. & Vergara, S.E. (2015): 'Attributional and Consequential Life-cycle Assessment in Biofuels: A Review of Recent Literature in the Context of System Boundaries'. *Current Sustainable/Renewable Energy Reports*. 2 (3). pp. 82–89. Available from: <http://link.springer.com/10.1007/s40518-015-0034-9> [Accessed 04 November 2015].
- Maurer, E.P., Adam, J.C. & Wood, A.W. (2008): 'Climate model based consensus on the hydrologic impacts of climate change to the Rio Lempa basin of Central America'. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*. 5 (6). pp. 3099–3128. Available from: <http://www.hydrol-earth-syst-sci-discuss.net/5/3099/2008/> [Accessed 04 November 2015].
- Mena-Carrasco, M., Oliva, E., Saide, P., Spak, S.N., de la Maza, C., Osses, M., Tolvett, S., Campbell, J.E., Tsao, T. es C.-C. & Molina, L.T. (2012): 'Estimating the health benefits from natural gas use in transport and heating in Santiago, Chile'. *Science of The Total Environment*. 429. pp. 257–265. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969712005694> [Accessed 04 November 2015].
- Messner, S. & Struebegger, M. (1995): 'User's guide for MESSAGE III'. Laxenburg, Austria.
- Montagnini, F. & Nair, P.K.R. (2004): 'Carbon sequestration: an underexploited environmental benefit of agroforestry systems'. *Agroforestry Systems*. 61-62 (1-3). pp. 281–295. Available from: <http://link.springer.com/10.1023/B:AGFO.000029005.92691.79> [Accessed 04 November 2015].
- Moore, S. & Newey, G. (2012): 'Something in the air: the forgotten crisis of Britain's poor air quality'. London. Available from: http://www.policyexchange.org.uk/images/publications/something_in_the_air.pdf [Accessed 04 November 2015].
- Moran, D., Macleod, M., Wall, E., Eory, V., McVittie, A., Barnes, A., Rees, R., Topp, C.F.E. & Moxey, A. (2011): 'Marginal Abatement Cost Curves for UK Agricultural Greenhouse Gas Emissions'. *Journal of Agricultural Economics*. 62 (1). pp. 93–118. Available from: <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1477-9552.2010.00268.x> [Accessed 04 November 2015].
- Moreira, M.R.P. & Dourado, A.B. de F. (2014): 'A taxa de motorização nas cidades brasileiras e a questão da mobilidade urbana'. Available from: http://www.antp.org.br/_5dotSystem/download/dcmDocument/2013/10/07/F5EE6A8C-151A-403D-8C98-56488342AEE1.pdf [Accessed 04 November 2015].
- Nair, P.K.R. (2012): 'Carbon sequestration studies in agroforestry systems: a reality-check'. *Agroforestry Systems*. [Online]. 86 (2). pp. 243–253. Available from: <http://link.springer.com/10.1007/s10457-011-9434-z> [Accessed 04 November 2015].
- Nair, P.K.R. & Garrity, D. (2012): 'Agroforestry: The Future of Global Land Use'. Advances in Agroforestry'. P. K. R. Nair & D. Garrity (eds.). Dordrecht: Springer Netherlands. Available from: <http://link.springer.com/10.1007/978-94-007-4676-3> [Accessed 04 November 2015].
- Nakaegawa, T. & Vergara, W. (2010): 'First Projection of Climatological Mean River Discharges in the Magdalena River Basin, Colombia, in a Changing Climate during the 21st Century'. *Hydrological Research Letters*. 4. pp. 50–54. Available from: <http://joi.jlc.jst.go.jp/JST.JSTAGE/hrl/4.50?from=CrossRef> [Accessed 04 November 2015].
- NCCS (2013). *Mexico (2013): 'National Climate Change Strategy: The 10-20-40 Vision'*. Available from: <http://mitigationpartnership.net/mexico-2013-national-climate-change-strategy-10-20-40-vision> [Accessed 04 November 2015].
- Nepstad, D., McGrath, D., Stickler, C., Alencar, A., Azevedo, A., Swette, B., Bezerra, T., DiGiano, M., Shimada, J., Seroa da Motta, R., Armijo, E., Castello, L., Brando, P., Hansen, M.C., McGrath-Horn, M., Carvalho, O. & Hess, L. (2014): 'Slowing Amazon deforestation through public policy and interventions in beef and soy supply chains'. *Science*. 344 (6188). pp. 1118–1123. Available from: <http://www.sciencemag.org/cgi/doi/10.1126/science.1248525> [Accessed 04 November 2015].
- Nielsen, R. (2005): 'Solar Radiation'. Available from: <http://home.iprimus.com.au/nielsens/solrad.html> [Accessed 04 November 2015].
- NOAA (2015): 'Earth System Research Laboratory: Trends in Atmospheric Carbon Dioxide'. Available from: <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/weekly.html> [Accessed 04 November 2015].
- Noreña, J.E.O., García, C.G., Conde, A.C. & Magaña, V. (2009): 'Vulnerability of water resources in the

REFERENCIAS

- face of potential climate change: generation of hydroelectric power in Colombia'. *Atmósfera*. 22 (3). Available from: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-62362009000300001&script=sci_arttext [Accessed 04 November 2015].
- Nykvist, B. & Nilsson, M. (2015): 'Rapidly falling costs of battery packs for electric vehicles'. *Nature Climate Change*. 5 (4). pp. 329–332. Available from: <http://www.nature.com/doi/10.1038/nclimate2564> [Accessed 04 November 2015].
- Nylund, N.-O. (2013): '*Transport Technology Gaps*'. Available from: https://www.iea.org/media/workshops/2013/egrdmobility/Nylund_transport_technology_gaps.pdf [Accessed 04 November 2015].
- OECD (2014): '*The Cost of Air Pollution*'. OECD Publishing. Available from: http://www.oecd-ilibrary.org/environment/the-cost-of-air-pollution_9789264210448-en [Accessed 04 November 2015].
- Oelbermann, M., Voroney, R.P., Thevathasan, N. V., Gordon, A.M., Kass, D.C.L. & Schlönvoigt, A.M. (2006): 'Soil carbon dynamics and residue stabilization in a Costa Rican and southern Canadian alley cropping system'. *Agroforestry Systems*. 68 (1). pp. 27–36. Available from: <http://link.springer.com/10.1007/s10457-005-5963-7> [Accessed 04 November 2015].
- Olsen, N. & Bishop, J. (2009): '*The Financial Costs of REDD: Evidence from Brazil and Indonesia*'. Gland. Available from: <https://portals.iucn.org/library/efiles/documents/2009-047.pdf> [Accessed 04 November 2015].
- Overmars, K.P., Stehfest, E., Tabeau, A., van Meijl, H., Beltrán, A.M. & Kram, T. (2014): 'Estimating the opportunity costs of reducing carbon dioxide emissions via avoided deforestation, using integrated assessment modelling'. *Land Use Policy*. 41. pp. 45–60. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0264837714000799> [Accessed 04 November 2015].
- Palm, C., Tomich, T., Van Noordwijk, M., Vosti, S., Gockowski, J., Alegre, J. & Verchot, L. (2004): 'Mitigating GHG Emissions in the Humid Tropics: Case Studies from the Alternatives to Slash-and-Burn Program (ASB)'. *Environment, Development and Sustainability*. 6 (1/2). pp. 145–162. Available from: <http://link.springer.com/10.1023/B:ENVL.0000003634.50442.ca> [Accessed 04 November 2015].
- Peters-Stanley, M. & Gonzalez, G. (2014): 'Sharing the stage state of the voluntary carbon markets 2014'. *A Report by Forest Trends' Ecosystem Marketplace: Executive Summary, Washington DC*.
- Potapov, P., Laestadius, L. & Minnemeyer, S. (2011): '*Global Map of Forest Landscape Restoration Opportunities*'. Washington, DC. Available from: www.wri.org/forest-restoration-atlas [Accessed 04 November 2015].
- REN21 (2014): '*RENEWABLES 2014: GLOBAL STATUS REPORT*'. Paris: REN21 Secretariat. Available from: http://www.ren21.net/Portals/0/documents/Resources/GSR/2014/GSR2014_full_report_low_res.pdf [Accessed 04 November 2015].
- REN21 (2015): '*RENEWABLES 2015: GLOBAL STATUS REPORT*'. Paris: REN21 Secretariat. Available from: <http://www.ren21.net/status-of-renewables/global-status-report/> [Accessed 04 November 2015].
- Renewable energy world (2013): '*The Future of Solar in Latin America*'. Available from: <http://www.renewableenergyworld.com/articles/2013/05/the-future-of-solar-in-latin-america.html> [Accessed 04 November 2015].
- Riahi, K., Dentener, F., Gielen, D., Grubler, A., Jewell, J., Klimont, Z., Krey, V., McCollum, D., Pachauri, S., Rao, S., Ruijven, B. van, Vuuren, D.P. van & Wilson, C. (2011): '2011: Energy Pathways for Sustainable Development'. In: and A. P. L. Gomez-Echeverri, T. B. Johansson, N. Nakicenovic (ed.). *In Global Energy Assessment: Toward a Sustainable Future*. Laxenburg: International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA); Cambridge and New York: Cambridge University Press. Available from: <http://opensky.library.ucar.edu/collections/OSGC-000-000-010-509> [Accessed 04 November 2015].
- Riahi, K., F. Dentener, D. Gielen, A. Grubler, J. Jewell, Z. Klimont, V. Krey, D. Mccollum, S. Pachauri, S. Rao, B. van Ruijven, D.P. van Vuuren, and C. Wilson (2011): '*Energy pathways for sustainable development*'. *Global Energy Assessment: Toward a Sustainable Future*, Cambridge University Press.
- Riahi, K., Grubler, A. & Nakicenovic, N. (2007): 'Scenarios of long-term socio-economic and environmental development under climate stabilization'. *Technological Forecasting and Social Change*. 74 (7). pp. 887–935.
- RMI (2014): '*The Economics of Grid Defection*'. Available from: http://www.rmi.org/electricity_grid_defection [Accessed 04 November 2015].
- RMI (2015): '*Tesla Hitting the Battery Accelerator*'. Available from: http://blog.rmi.org/blog_2015_06_11_tesla_hitting_the_battery_accelerator [Accessed 04 November 2015].

- Rodrigues, V.G.S., Castilla, C., Costa, R.S.C. & Palm, C. (1999): 'Estoque de carbono em sistema de uso da terra em Rondônia'. Available from: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/77901/1/FOL-6097-0001.pdf> [Accessed 04 November 2015].
- Rubio Varas, M. del M. & Tafunell, X. (2014): 'Latin American hydropower: a century of uneven evolution'. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 38 (C). pp. 323–334. Available from: <http://econpapers.repec.org/RePEc:eee:rensus:v:38:y:2014:i:c:p:323-334> [Accessed 04 November 2015].
- Salimon, C.I., Putz, F.E., Menezes-Filho, L., Anderson, A., Silveira, M., Brown, I.F. & Oliveira, L.C. (2011): 'Estimating state-wide biomass carbon stocks for a REDD plan in Acre, Brazil'. *Forest Ecology and Management*. 262 (3). pp. 555–560. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378112711002404> [Accessed 04 November 2015].
- Saygin, D., Worrell, E., Patel, M.K. & Gielen, D.J. (2011): 'Benchmarking the energy use of energy-intensive industries in industrialized and in developing countries'. *Energy*. 36 (11). pp. 6661–6673. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S036054421100555X> [Accessed 04 November 2015].
- Scandlines (2015): 'Scandlines Hybrid Ferries'. Copenhagen, Denmark. Available from: <https://stateofgreen.com/en/profiles/scandlines/solutions/scandlines-hybrid-ferries> [Accessed 04 November 2015].
- Schellnhuber, H.J. (2009): 'Tipping elements in the Earth System'. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 106 (49). pp. 20561–3. Available from: <http://www.pnas.org/cgi/content/long/106/49/20561> [Accessed 04 November 2015].
- Scherer, A.-C. (2013): 'Organic food market in the United States: market access opportunities for Latin American and Caribbean producers'. Santiago, Chile. Available from: http://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/5066/LCL3696_en.pdf?sequence=1 [Accessed 04 November 2015].
- Searchinger, T., Heimlich, R., Houghton, R.A., Dong, F., Elobeid, A., Fabiosa, J., Tokgoz, S., Hayes, D. & Yu, T.-H. (2008): 'Use of U.S. Croplands for Biofuels Increases Greenhouse Gases Through Emissions from Land-Use Change'. *Science*. 319 (5867). pp. 1238–1240. Available from: <http://www.sciencemag.org/cgi/doi/10.1126/science.1151861> [Accessed 04 November 2015].
- Seba, T. (2014): 'Clean Disruption of Energy and Transportation: How Silicon Valley Will Make Oil, Nuclear, Natural Gas, Coal, Electric Utilities and Conventional Cars Obsolete by 2030'. Tony Seba. Available from: <http://tonyseba.com/portfolio-item/clean-disruption-of-energy-transportation/> [Accessed 04 November 2015].
- da Silva Dias, M.A.F. (2008): 'Forest and Rainfall Interactions in the Amazon Basin'. Available from: https://www.ige.unicamp.br/terrae/V3/PDF-N3/T_A5_2.pdf [Accessed 04 November 2015].
- Smith, P., Martino, D., Cai, Z., Gwary, D., Janzen, H., Kumar, P., McCarl, B., Ogle, S., O'Mara, F., Rice, C., Scholes, B., Sirotenko, O., Howden, M., McAllister, T., Pan, G., Romanenkov, V., Schneider, U., Towprayoon, S., Wattenbach, M. & Smith, J. (2008): 'Greenhouse gas mitigation in agriculture'. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. 363 (1492). pp. 789–813. Available from: <http://rstb.royalsocietypublishing.org/content/363/1492/789> [Accessed 04 November 2015].
- Soto-Pinto, L., Anzueto, M., Mendoza, J., Ferrer, G.J. & de Jong, B. (2010): 'Carbon sequestration through agroforestry in indigenous communities of Chiapas, Mexico'. *Agroforestry Systems*. 78 (1). pp. 39–51.
- Sparks, D. (2015): 'Tesla Motors Inc.'s Model 3 Ambitions May Be More Realistic Than You Think'. Available from: <http://www.fool.com/investing/general/2015/06/28/tesla-motors-incs-model-3-ambitions-more-realistic.aspx> [Accessed 04 November 2015].
- Stern, N. (2006): 'Stern Review on the Economics of Climate Change'. Cambridge University Press. Available from: <http://www.amazon.co.uk/The-Economics-Climate-Change-Review/dp/0521700809> [Accessed 04 November 2015].
- Summers, D.M., Bryan, B.A., Nolan, M. & Hobbs, T.J. (2015): 'The costs of reforestation: a spatial model of the costs of establishing environmental and carbon plantings'. *Land Use Policy*. 44. pp. 110–121. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0264837714002737> [Accessed 04 November 2015].
- Svarrer, K. & Olsen, C.S. (2005): 'The Economic Value of Non-Timber Forest Products: A Case Study from Malaysia'. *Journal of Sustainable Forestry*. 20 (1). pp. 17–41. Available from: http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1300/J091V20N01_02 [Accessed 04 November 2015].
- Teske, S., Sawyer, S. & Schäfer, O. (2015): 'Energy [R] evolution: A Sustainable World Energy Outlook 2015'. Available from: <http://www.greenpeace.org/international/en/publications/Campaign-reports/Cli->

REFERENCIAS

- mate-Reports/Energy-Revolution-2015/ [Accessed 04 November 2015].
- Tollefson, J. (2015): 'Stopping deforestation: battle for the Amazon'. *Nature*. 520 (7545). pp. 20–23. Available from: <http://www.nature.com/doi/10.1038/520020a> [Accessed 04 November 2015].
- Tsuchiya, A. & Hiraoka, M. (1999): 'Forest biomass and wood consumption in the lower course of the Amazon: a case study of the Urubuera Island'. Available from: http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0044-59671999000100079&script=sci_abstract [Accessed 04 November 2015].
- UCS (2009): 'Clean Energy, Green Jobs'. Cambridge MA. Available from: http://www.ucsusa.org/clean_energy/smart-energy-solutions/increase-renewables/clean-energy-green-jobs.html#.VgjuKMuqBc [Accessed 04 November 2015].
- UNCTAD (2012): 'Maritime Transport and the Climate Change Challenge'. Available from: <http://unctad.org/en/pages/newsdetails.aspx?OriginalVersionID=132> [Accessed 04 November 2015].
- USA (2012): 'United States Transportation by the Numbers'. Available from: http://www.rita.dot.gov/bts/sites/rita.dot.gov/bts/files/united_states.pdf [Accessed 04 November 2015].
- Valdes, A. & Mistiaen, J.A. (2003): 'Rural Poverty Alleviation in Brazil: Toward an Integrated Strategy'. *World Bank Country Study*. ERIC.
- Vergara, W., Deeb, A., Cramton, P., Toba, N., Leino, I. & Benoit, P. (2010): 'Wind energy in Colombia: a framework for market entry'. World Bank Publications. Available from: <http://www.cramton.umd.edu/papers2010-2014/vergara-deep-toba-cramton-leino-wind-energy-in-colombia.pdf> [Accessed 04 November 2015].
- Vergara, W. & Scholz, S.M. (2011): 'Assessment of the risk of Amazon dieback'. Washington D.C. Available from: <http://documents.worldbank.org/curated/en/2010/01/13155273/assessment-risk-amazon-dieback> [Accessed 04 November 2015].
- Vergara, W., Alatorre, C. & Alves, L. (2013a): 'Rethinking Our Energy Future: A White Paper on Renewable Energy for the 3GFLAC Regional Forum'. Available from: <https://www.imf.org/external/np/seminars/eng/2013/caribbean/pdf/rethinking.pdf>.
- Vergara, W., Rios, A.R., Galindo, L.M., Gutman, P., Isbell, P., Suding, P.H. & Samaniego, J. (2013b): 'The Climate and Development Challenge for Latin America and the Caribbean. Options for climate-resilient, low-carbon development'. Available from: <http://idbdocs.iadb.org/wsdocs/getdocument.aspx?docnum=37720722> [Accessed 04 November 2015].
- Vergara, W., Rios, A.R., Trapido, P., Malarin, H. & Malarín, H. (2014): 'Agriculture and future climate in Latin America and the Caribbean: systemic impacts and potential responses'. Available from: <http://idbdocs.iadb.org/wsdocs/getdocument.aspx?docnum=38585010> [Accessed 04 November 2015].
- World Bank (1998): 'El Salvador: Rural Development Study'. Washington D.C.
- World Bank (2002): 'Improving Air Quality in Metropolitan Mexico City: An Economic Valuation'. Available from: <http://hdl.handle.net/10986/15696> [Accessed 04 November 2015].
- World Bank (2014a): 'The Little Green Data Book'. Washington, D.C. Available from: http://data.worldbank.org/sites/default/files/wb-ldb_green_2014-crpd.pdf [Accessed 04 November 2015].
- World Bank (2014b): 'World Development Indicators 2014'. Washington D.C. Available from: <http://data.worldbank.org/sites/default/files/wdi-2014-book.pdf> [Accessed 04 November 2015].
- World Bank (2015): 'World Development Indicators 2015'. Washington, DC. Available from: <http://data.worldbank.org/> [Accessed 04 November 2015].
- Yáñez-Ruiz, D.R., Losa, R., Núñez, C., Tessier, N., Media, B., Shearer, A., Campanere, S. de, Morgavi, D., Fievez, F. & Newbold, C.J. (2013): 'Smethane, a technological platform to develop nutritional additives to reduce methane emissions from ruminants: putting together efforts from industry and academia'. In: *XV Jornadas sobre Producción Animal, Zaragoza 14 y 15 de mayo de 2013*. 2013, Asociación Interprofesional para el Desarrollo Agrario, pp. 288–290. Available from: <http://www.cabdirect.org/globalproxy.cvt.dk/abstracts/20133263958.html;jsessionid=8DEC2EF0BDF000C400CFAE3D-CD4ABD18#> [Accessed 04 November 2015].
- Yquise, A., Pocomucha, V. & Rios, J. (2009): 'Carbono Almacenado en Diferentes Sistemas de Uso de la Tierra del Distrito de José Crespo y Castillo'. Huánuco, Perú.

ANEXOS

ANEXO I

DESCRIPCIÓN DE LOS ESCENARIOS ELB (GEA-ELB) Y GEA-MIX DE IIASA

Este informe se basa en gran medida en los escenarios proyectados por el IIASA bajo su modelo de Evaluación Energética Global (GEA). Se utilizan dos escenarios diferentes (GEA-Mix y GEA-ELB o escenario de contraste) para proyectar el desarrollo de las emisiones por sector a fin de identificar prioridades de mitigación y verificar la ruta de carbono cero en ALC para 2050.

La base de datos del escenario de IIASA (2012)⁴⁰ ofrece tres grupos de rutas principales de transformación de Evaluación Energética Global (GEA, por sus siglas en inglés) (GEA-Eficiencia, GEA-Suministro y GEA-Mix). Estos escenarios están divididos en tres puntos de bifurcación y, por lo tanto, difieren considerablemente entre sí, dependiendo de las decisiones adoptadas acerca de tecnologías, infraestructuras, comportamientos y estilos de vida, así como sobre las futuras prioridades con respecto a la cartera de políticas de suministro y demanda (Riahi et al., 2012). El primer punto de ramificación conduce a tres grupos de ruta donde la ruta GEA-Eficiencia supone la reducción más significativa y la ruta GEA-Suministro registra solo mejoras marginales con respecto a la tasa histórica hacia el futuro. Mientras tanto, la ruta GEA-Mix muestra un nivel intermedio de eficiencia energética y una disminución de la intensidad energética. Los puntos de ramificación segundo y tercero de estos tres escenarios que originan vías adicionales se basan en⁴¹:

- El tipo de sistema de transporte (es decir, infraestructura de transporte tradicional y convencional a base de energía de “líquidos” versus una infraestructura de transporte avanzada basada en la electrificación y, en algunos casos, en el uso de hidrógeno) que se asume dominará la economía en el futuro.
- Las fuentes —o tecnologías— energéticas, que se asumen para su inclusión o exclusión de la mezcla de energía y tecnología a lo largo de cualquier ruta en particular.

Además, todas las rutas GEA comparten ciertas características comunes, la más importante de las cuales es la mitigación significativa de las emisiones de GEI en el futuro. En cada una de las 41 vías GEA evaluadas por IIASA, este organismo considera que esta reducción de emisiones es lo suficientemente significativa como para representar una contribución adecuada regionalmente a la defensa mundial creíble del límite de concentración atmosférica de 450 partes por millón (ppm) y la barrera de 2 °C para 2050 (Riahi et al., 2011).

Este estudio utiliza la ruta de Transporte Convencional GEA-Mix como el más intermedio de los tres grupos de rutas ya mencionados, el cual hace énfasis en una mezcla de suministro de energía más diversa para mejorar la resiliencia del sistema contra fallas en la innovación o golpes tecnológicos. Sin embargo, esto no implica que la ruta GEA-Mix sea intermedia entre las otras dos rutas en términos de otras características del escenario (por ejemplo, cartera de políticas necesarias, costos, opciones de combustible, o implementación de tecnologías individuales) (Riahi et al., 2012). El Transporte Convencional se refiere a la continuación de un sistema de transporte basado predominantemente en energía derivada de combustibles líquidos fósiles, mientras que en el Capítulo 3 se discuten a detalle los cambios fundamentales en las infraestructuras (en el caso de un alto grado de penetración de vehículos eléctricos).

Si las rutas GEA se presentan como los únicos escenarios de intervención energética, llevarían a la región de América Latina y el Caribe a un punto entre 3.4 tpc y 4.3 tpc para 2050 y, por consiguiente, tendría que complementarse con medidas de políticas ASOUT para seguir la ruta de intervención más agresiva mix-I+ (Plus) (combinada) hacia el objetivo de AIC de 2 tpc anuales para 2050. En otras palabras, las intervenciones de energía llevan las emisiones per cápita de ALC de 9,3 en el escenario ELB a menos de 4 tpc; deben reducirse otras 2 tpc adicionales a través de intervenciones ABOUT para alcanzar el objetivo global de 2 tpc para el año 2050.

El segundo escenario incluido en este estudio es el GEA-ELB (MESSAGE) (o escenario de línea base), que es una línea base hipotética sin políticas que describe la evolución de los sistemas energéticos en ausencia de polí-

⁴⁰ Ver <http://www.iiasa.ac.at/web-apps/ene/geadb/dsd?Action=html-page&page=about>

⁴¹ Para consultar una descripción completa y detallada de las rutas GEA, ver (Riahi et al., 2012).

ticas modificatorias para la demanda o suministro del sistema energético (Riahi et al., 2012). MESSAGE (siglas en inglés del Modelo para las Estrategias Alternativas de Suministro de Energía y su Impacto Ambiental General) es un modelo de optimización de ingeniería de sistemas utilizado para la planeación del sistema energético, el análisis de políticas de energía y el desarrollo de escenarios a mediano y largo plazo (Messner & Struebegger, 1995; Riahi et al., 2007). El escenario considera todas las interdependencias del sistema energético, desde la extracción de recursos, importaciones y exportaciones, transformación, transporte y distribución, hasta la prestación de servicios en el uso final de la energía, como la iluminación, calefacción y refrigeración, procesos industriales de producción y transporte. MESSAGE cubre todos los sectores emisores de GEI, incluyendo la agricultura, la silvicultura, la energía y las fuentes industriales, así como los principales GEI y otros gases: CO₂, metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), óxidos de nitrógeno (NO_x), compuestos orgánicos volátiles (COV), monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre, carbón negro y carbono orgánico, tetrafluorometano, hexafluoroetano, diversos hidrofluorocarburos (HFC-125, HFC-134a, HFC-143a, HFC-227ea, HFC-245ca) y hexafluoruro de azufre. El modelo MESSAGE ELB supone una transición de muchos sectores hacia los hidrocarburos, pero es incapaz de abordar con éxito los problemas de acceso y seguridad (Riahi et al., 2012). Las rutas GEA se generan en función de los escenarios ELB combinados con un conjunto de premisas armonizadas.

ANEXO II

CENTRALES HIDROELÉCTRICAS EN AMÉRICA LATINA

América Latina cuenta con una importante dotación de recursos hidrológicos. Actualmente ya representa más del 20% de la energía hidroeléctrica del mundo y tiene la mayor participación de energía hidroeléctrica para generación en el mundo. Excluyendo a China, la energía hidroeléctrica de América Latina ha mostrado la tasa de crecimiento más vigorosa en el mundo durante los últimos treinta años (Rubio Varas y Tafunell, 2014).

Sin embargo, la perspectiva para un mayor desarrollo de este potencial se ve atenuada por limitaciones ambientales y sociales. Aun así, la capacidad instalada, en particular sus grandes embalses multianuales, constituye un recurso importante para el almacenamiento de energía. Este recurso puede desempeñar un papel importante en la modulación del suministro junto con el desarrollo de la generación de capacidad intermitente. En la Tabla 0.1 se incluye una lista de las grandes centrales hidroeléctricas en la región.

Tabla 0.1 - Lista de plantas hidroeléctricas en América Latina y el Caribe con una capacidad >1 000 MW/1GW.

Nombre	País	Capacidad [MW]
Itaipu	BRA/PAR	14000
Guri	VEN	10200
Ilha Solteira	BRA	3444
Xingo	BRA/PAR	3162
Yacireta	R6/PAR	3100
Paulo Alfonso	BRA/PAR	2400
Caruachi	VEN	2160
Itumbiara	BRA	2080
Aqua Vermelha	BRA	1400
Alberto Heros	COL	1150
Alicurá	ARG	1000
Bento Munhóz	BRA	1700
Chico	MEX	2430
Chivor	COL	1000
El Chocon	ARG	1200
Embarcacao	BRA	1200
Souza Diaz	BRA	1550
Furnas	BRA	1240
Itá	BRA	1450
Itumbiara	BRA	2100
Jirau	BRA	3750
Luiz Barreto	BRA	1100
Luiz Gonzaga	BRA	1140
Macagua II	VEN	1600
Malpaso	MEX	1080
Marimondo	BRA	1480
Ney Braga	BRA	1280
Piedra del Aguila	ARG	1400
Porto Primavera	BRA	1540
Jose Richan	BRA	1240
Salto Grande	BRA	1890
Salto Osorio	BRA	1100
Salto Santiago	BRA	1420
Santo Antonio	BRA	3580
Sao Simao	BRA	1700
Serra da Mesa	BRA	1275
Sobradinho	BRA	1050
Tucuruí	BRA	8370
	Total	93961
		94

ANEXO III

DESCRIPCIÓN DEL MODELO GACMO

GACMO es un modelo en hoja de cálculo de Excel (se puede contactar al autor via e-mail jqfe@dtu.dk; móvil: +45 4020 2789), que está disponible públicamente en <http://www.cdmpipeline.org/>. Esta versión disponible públicamente fue modificada para este informe a fin de que su alcance se centrara en la región de América Latina y el Caribe.

GACMO puede aplicarse a diversas escalas geográficas y frecuentemente se le utiliza para desarrollar una estrategia de desarrollo con bajas emisiones de carbono o una Contribución Prevista Determinada a Nivel Nacional.

El análisis que utiliza el modelo GACMO consta de los siguientes pasos:

1. Recopilación de datos para establecer un balance de energía y un inventario de GEI, así como un perfil socioeconómico del país/región en cuestión en el año de inicio (2012).
2. Proyección de los datos recabados para los años objetivo, en este caso, 2025, 2050 y 2075.
3. Análisis de todas las opciones de mitigación de GEI disponibles en el modelo relativas a las reducciones de las emisiones, las inversiones, los costos anuales, etc.
4. Los resultados del análisis para todas las opciones de mitigación de GEI están disponibles en las hojas de resumen del modelo para los años objetivo ingresados en el paso 2. Aquí, el impacto total de las acciones se suma para obtener la reducción total de las emisiones de GEI, la inversión y el costo anual total. Estos resultados pueden utilizarse para identificar las opciones más adecuadas en lo que respecta a los costos y beneficios, y también para entender las prioridades para la implementación.

En este informe se utilizó el modelo GACMO para calcular los costos nivelados para comparar la competitividad relativa para la generación de energía mediante fuentes renovables, proyectar curvas de aprendizaje para la generación de energía a partir de fuentes renovables en ALC, y explorar curvas de aprendizaje para el transporte eléctrico en comparación con las opciones del escenario de línea base.

ANEXO IV

CONSIDERACIONES PARA ESTIMAR LOS COSTOS DEL TRANSPORTE

Las estimaciones de los costos de transporte por km para vehículos eléctricos se basaron en las siguientes consideraciones, tomadas de fuentes propias de la industria descritas en el texto principal. Sin embargo, las proyecciones futuras que se adoptan en este estudio son más conservadoras de lo que algunos analistas (por ejemplo, Seba, 2014) han indicado, como en el caso de los costos proyectados del almacenamiento en baterías para una autonomía de unas 200 millas. El precio base se determinó considerando los costos actuales.

Para los automóviles eléctricos se utilizaron las siguientes cifras (la inversión total incluye el costo de almacenamiento de electricidad):

(2012) Inversión en el vehículo: 25 000 dólares; Inversión total: 39 000 dólares

(2025) Inversión en el vehículo: 14 000 dólares; Inversión total: 20 000 dólares

(2050) Inversión en el vehículo: 12 500; Inversión total: 16 500 dólares

(2075) Inversión en el vehículo: 6 250 dólares; Inversión total: 9 250 dólares

Las proyecciones usadas para otros vehículos se incluyen en la tabla siguiente.

Tabla 0.2 - Costos Proyectados por clase de vehículos.

	2012	2025	2050	2075
Automóviles eléctricos	25 000	30%	50%	75%
Camiones eléctricos	97 500	30%	50%	75%
Autobús de 12 m	295 000	10%	25%	40%
Autobús de 18 m	600 000	10%	25%	40%
Camiones pesados	235 000	10%	25%	40%

COSTO PROYECTADO DE LA ENERGÍA PARA PROPÓSITOS DE ESTIMACIÓN DE LOS COSTOS DE OPERACIÓN DE LOS VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

Además del costo de los vehículos (incluyendo el costo del almacenamiento en baterías), el análisis utiliza una reducción proyectada en el costo de la energía a medida que el suministro futuro cambia hacia fuentes renovables. El CNE proyectado utilizado para fines de estimar los costos futuros de operación de los vehículos eléctricos es:

COSTO EVITADO DE LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE

El costo evitado de la contaminación del aire se estimó con base en el análisis de la OCDE, 2014, y de Moore & Newey, 2012 para el caso de México.

México

Costo de la contaminación total del aire:
39 000 millones de dólares -> 50% del transporte

Costo de la contaminación del aire debida al transporte:
19 500 millones de dólares

Tabla 0.3 - Costos de electricidad proyectados con fines de estimar los costos de operación de vehículos eléctricos.5

Electricidad	De ahora al 2025	2050	2075
Dólares/kWh	0,10	0,06	0,05

“En cuanto a su contribución a la contaminación del aire, aparte de su contribución al cambio climático, los vehículos diésel son, por mucho, los más perjudiciales. Por ejemplo, de las emisiones de escape de todos los vehículos en Londres en 2009, el 91% de las PM_{2,5} y el 95% del NO₂ fueron atribuibles a los vehículos diésel” (Moore & Newey, 2012).

90% debido al diésel: 17 550 millones de dólares
10% debido a la gasolina: 1 950 millones de dólares

Diésel: 540 PJ => $17,55/540 = 32,5$ millones de dólares /PJ

Gasolina: 1490 PJ => $1,95/1490 = US\$1,309$ millones/ PJ

Diésel: 43,48 MtCO₂ => $17,55/43,48 = 403,63$ millones de dólares /MtCO₂

Gasolina: 103,44 MtCO₂ => $1,95/103,44 = 18,851$ millones de dólares/MtCO₂

Tabla 0.4 – Estimativo de los costos evitados de contaminación del aire a través de la operación de vehículos eléctricos desplazando vehículos con motores de combustión interna

Combustible	Costo [dólares/km] sin crédito	Crédito	Costo [dólares/km]
Gasolina	0,23	0	0,23
Electricidad	0,39	0,004	0,336
Diésel	0,7	0	0,7
Electricidad	1,57	0,27	1,3
Diésel	0,6	0	0,6
Electricidad	1,16	0,27	0,89
Diésel	0,78	0	0,78
Electricidad	1,94	0,41	1,53

Consideraciones aplicadas en el análisis de costos de la energía

Consideraciones y ajustes por país	
País	América Latina
Año de inicio (inventario más reciente)	2012
Moneda	Dólares de EE. UU.
Tasa de cambio utilizada	1 dólar = 1 dólar
Tasa de descuento	7,0%

Precios de la energía utilizados para todo el período	
Petróleo crudo	60 dólares/barril
Petróleo crudo	0,38 dólares/litro
GNL	10 dólares/MBTU
Gas natural	6,63 dólares/Nm ³
Carbón	70 dólares/ton

1 Millón de BTU = 1,055 GJ
1 galón americano = 3,7854 litros
1 barril = 159 litros

Precios de los combustibles

Precios en 2020	Gas LP	Gasolina	Bio-etanol	Turbosina	Aceite diésel	Bio-diésel	Combustóleo pesado	Keroseno	Carbón	Lignita	Gas natural	GNL
Destillate price/crude oil price (litre/litre)	0,90	1,40		1,40	1,20		0,80	1,40				
US\$/liter	0,34	0,53	0,83	0,53	0,45	1,20	0,30	0,53				
US\$/GJ	13,3	15,7		14,8	12,4		7,7	14,8	2,8		9,5	9,5
t/m ³	0,54	0,75	0,76	0,80	0,84	0,88	0,98	0,80			(MJ/Nm ³) 39	(MJ/Nm ³) 39
GJ/t	47,3	44,8	26,80	44,6	43,33	36,01	40,19	44,8	24,96	18,3		

ANEXO V

Tabla 0.5 – Estimación del abatimiento de emisiones de N₂O y CH₄ provenientes de la agricultura mediante la gestión de nutrientes.

Esquema	Magnitud del esfuerzo (Mha para 2050)	Tasas potenciales de almacenamiento de carbono (tC/ha-año)	Carbono total almacenado al 2050 (tCO ₂ e)	Comentarios
Reemplazo de fertilizantes químicos por abono u otros compuesto sin urea	64	0,4	0,09	Actualmente el área estimada en que se utilizan fertilizantes sin urea en la región es de alrededor de 6,4 Mha (Garibay & Ugas, 2009). Las emisiones evitadas de N ₂ O cuando se utilizan fertilizantes no nitrogenados (sin urea) se basan en las emisiones de NO ₂ por ha de cultivo en ALC, las que se han estimado en 0,4 tCO ₂ e/ha/año (Moran et al., 2011). Los autores utilizan una proyección de diez veces la superficie bajo aplicación de no nitrogenados para el 2050.
Fertilizantes de liberación controlada (urea recubierta)	71	0,3	0,07	El área estimada en donde actualmente se utilizan FLC es del 1% del área total de cultivo, equivalente a alrededor de 7,1 Mha. Los autores utilizan una proyección de un incremento de unas diez veces el área bajo FLC para 2050. La tasa de abatimiento se tomó de Moran et al. (2011).
Eliminación de la labranza	21	0,15	0,01	Se considera que toda la tierra agrícola se cultiva sin labranza para el 2050, a partir de un 70% en el 2010. ^a La tasa de abatimiento se tomó de Moran et al. (2011).
Total			0,17	

^a El carbono se puede acumular en los suelos, pero después de 20 años el nivel se estabiliza. Cualquier perturbación, por ejemplo, el arado, acelerará la liberación de C del suelo.

ANEXO VI

ANÁLISIS DE RUTA PARA LA INDUSTRIA

El GOV.UK (2015) propone trayectorias potenciales para que los ocho sectores industriales de mayor intensidad energética reduzcan sus emisiones de GEI y mejoren la eficiencia energética. Se utilizaron esos informes para establecer el potencial de reducción de emisiones y los costos asociados para la trayectoria Max Tech.⁴² Este potencial de reducción y sus costos se aplicaron a los sectores industriales pertinentes en ALC⁴³ para calcular el potencial total de reducciones y los costos totales asociados (Tabla 5.1).

Las opciones consideradas se describen en los informes para cada subsector industrial (GOV.UK, 2015). En algunos sectores (hierro y acero, industria química y refinación de petróleo) se aplica la captura y almacenamiento de carbono a partir del año 2040 bajo la suposición de que esta ha llegado a ser técnica y económicamente viable. La captura y almacenamiento de carbono puede no ser una opción factible, ya que aún no se ha asegurado su aplicación comercial y está también asociada a un alto uso de energía. Por lo tanto, es dudosa su aplicación durante el período que comprende el análisis.

El potencial de reducción y sus costos se calcularon con base en datos de la industria del Reino Unido, la que puede considerarse como más avanzada que la industria de ALC. El potencial de mejora en la industria de ALC puede ser significativamente más alto, en tanto que los costos pueden ser más bajos (Tabla 5.2).

⁴² La trayectoria de Max Tech considera un amplio espectro de tecnologías que generalmente están, al menos, a nivel piloto de desarrollo y sujetas a restricciones razonables. Está diseñada para investigar lo que puede ser técnicamente posible cuando otras barreras se fijan en otra parte (GOV.UK, 2015).

⁴³ Esto se vio restringido por la disponibilidad de datos de emisiones para los sectores.

ANEXO VII

La siguiente tabla muestra los dos escenarios IIASA que se utilizaron como puntos de referencia, así como la trayectoria de cero carbono calculada. Es notable que las proyecciones para la mayor parte de los sectores (energía, industria y transporte) coinciden entre sí. Las proyecciones del cambio de uso de la tierra son las que marcan las mayores diferencias.

Tabla 0.6 - Comparación de los escenarios ELB, GEA MIX y la ruta de cero carbono.

Categoría	2012 (MtCO ₂ e)	2050 GEA-ELB (GtCO ₂ e)	2050 Ruta de descarbonización (GtCO ₂ e)	GEA MIX 2050 (GtCO ₂ e)
Total	4.623	5.3	-0,1	2
Energía	544	1,1	0	0,03
Industria	494	0,5	0,4	0,4
Transporte	665	1,4	0,2	0,2
Uso de la tierra y agricultura	2,574	1,9	-1,1	1,4
Otros sectores	346	0,4	0,4	n.a.

SOBRE LOS AUTORES



Walter Vergara es un especialista en cambio climático con intereses en varios aspectos de mitigación y adaptación. Actualmente ocupa una posición de “Senior Fellow” en el World Resources Institute, donde coordina la Iniciativa 20x20. Antes de trabajar en el WRI, el Sr.

Vergara fue jefe de la División de Cambio Climático en el BID luego de una larga carrera en el Banco Mundial donde su última posición fue de Líder del Grupo Global de Cambio Climático. El Sr. Vergara organizó el primer grupo dedicado de cambio climático en el Banco Mundial. Durante su carrera el Sr. Vergara ha escrito 15 libros y numerosos artículos técnicos. Él fue editor-revisor del Quinto Informe del IPCC. El Sr. Vergara es Ingeniero Químico con títulos de la Universidad Nacional de Colombia y la Universidad de Cornell.



Joergen Fenhann es un “Senior Scientist” en el UNEP DTU en Copenhague en Dinamarca con una amplia experiencia profesional. Él ha desarrollado el portafolio de CDM/JI/PoA (www.cdmpipeline.org), el portafolio de NAMAs (www.namapipeline.org) y desarrolló el modelo GACMO el portafolio INDC (www.unep.org/climatechange/pledgepipeline).

Ha trabajado en desarrollo de capacidad institucional para LCDS/CDM en muchos países. El Sr. Fenhann fue autor principal del informe del IPCC sobre Escenarios de Emisión y del capítulo sobre suministro de energía del Cuarto informe del IPCC.



Marco Schletz es un “Research Assistant” en el programa de Desarrollo a Bajo Carbono en UNEP DTU. Marco ha hecho investigación sobre riesgos climáticos combinando escenarios de emisiones e información sobre comercio, en cooperación con el Stockholm Environment Institute (SEI). El Sr. Schletz tiene un título de Ciencias Ambientales de la Universidad de Copenhague y la Universidad de Uppsala en Suecia.

El Sr. Schletz tiene un título de Ciencias Ambientales de la Universidad de Copenhague y la Universidad de Uppsala en Suecia.

“Los autores deben ser felicitados por este sobresaliente logro. La estrategia de carbono cero es exhaustiva, creativa y creíble”.

JOHN C. TOPPING, JR., PRESIDENTE Y DIRECTOR GENERAL CORPORATIVO DEL CLIMATE INSTITUTE.

“Este estudio brinda una visión de cómo lograr una descarbonización profunda en la región. Si bien esta labor es inmensa y existen múltiples barreras que deben enfrentarse, los autores han logrado identificar las acciones clave, al igual que los costos y beneficios asociados que harían posible la descarbonización”.

LUIS M. GALINDO, CEPAL

“Este es un análisis pionero que sienta las bases de una estrategia visionaria para lograr emisiones libres de carbono en América Latina y el Caribe”.

LESTER R. BROWN, FUNDADOR DE WORLDWATCH INSTITUTE, FUNDADOR Y PRESIDENTE DEL EARTH POLICY INSTITUTE.

“Este estudio revisa, por primera vez, acciones concretas que pueden llevar a cero la huella de carbono de la economía regional. Constituye una pieza fundamental sobre lo que debe ser un diálogo regional y nacional sobre esta cuestión”.

ADRIÁN FERNANDEZ, DIRECTOR GENERAL CORPORATIVO DE LA INICIATIVA CLIMÁTICA REGIONAL DE AMÉRICA LATINA, EXPRESIDENTE DEL INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGÍA, MÉXICO.