



REFLEXIONES DEL CAMBIO CLIMÁTICO DESDE LA ACADEMIA

Coordinadora: Fabiola S. Sosa-Rodriguez



SERIE ESTUDIOS
BIBLIOTECA DE
CIENCIAS SOCIALES
Y HUMANIDADES

Universidad
Autónoma
Metropolitana
Casa abierta al tiempo



Reflexiones del Cambio Climático desde la Academia

Coordinadora: Fabiola S. Sosa-Rodríguez

Universidad Autónoma Metropolitana

Rector General

Dr. Eduardo Abel Peñalosa Castro

Secretario General

Dr. José Antonio De Los Reyes Heredia

Unidad Azcapotzalco

Rector

Dr. Roberto Javier Gutiérrez López

Secretaria

Mtra. Verónica Arroyo Pedroza

División de Ciencias Sociales y Humanidades

Secretario Académico

Lic. Miguel Pérez López

Encargado del Departamento de Economía

Mtro. Fernando J. Chávez Gutiérrez

Coordinador de Difusión y Publicaciones

Dr. Saúl Jerónimo Romero

Primera edición, 2018

© Universidad Autónoma Metropolitana

Unidad Azcapotzalco

División de Ciencias Sociales y Humanidades

Coordinación de Difusión y Publicaciones

Av. San Pablo 180, Edif. E, Salón 004, Col. Reynosa Tamaulipas,

Del. Azcapotzalco, C.P. 02200,

Ciudad de México, Tel. 53189109

www.publicacionesdcsch.azc.uam.mx

Diseño de portada: Rodrigo de la Vega

ISBN de la obra: 978-607-28-1314-4

Se prohíbe la reproducción por cualquier medio sin el consentimiento del titular de los derechos patrimoniales de la obra.

Índice

Agradecimientos	9
Introducción	10
Sección I	18
Retos ante el Cambio Climático	
CAPÍTULO 1	19
Estrategias de Mitigación y Adaptación para enfrentar el Cambio Climático en la Ciudad de México	
Fabiola S. Sosa-Rodríguez	
Jorge G. Vázquez-Arenas	
CAPÍTULO 2	49
La dimensión institucional de los gobiernos locales en la adaptación al cambio climático	
Angélica Rosas-Huerta	
CAPÍTULO 3	79
El costo económico de los desastres de origen climatológico en América Latina y el Caribe (1970-2008)	
Sergio O. Saldaña-Zorrilla	
Sección II	120
Estrategias de Mitigación para el combate del Cambio Climático	
CAPÍTULO 4	121
El mercado de bonos de carbono en México: Realidad y perspectivas de desarrollo	
Samuel Rosas-Reyes	
Fabiola S. Sosa-Rodríguez	

CAPÍTULO 5	167
Perspectivas en la construcción de capacidades tecnológicas para el sector eólico en México Raúl Arturo Alvarado López	
CAPÍTULO 6	217
Combustión catalítica: una alternativa en la mitigación de gases de efecto invernadero, una perspectiva desde México Ana Lilia De Jesús Lázaro Jorge Morales Hernández	
CAPÍTULO 7	253
Quema de la caña de azúcar, carbono negro y cambio climático Naxieli Santiago de la Rosa Violeta Mugica Álvarez	
Sección III	282
Compromisos Ambientales actuales	
CAPÍTULO 8	283
La gestión del agua en la Ciudad de México ante el cambio climático Fabiola S. Sosa-Rodríguez Jorge G. Vázquez-Arenas	
CAPÍTULO 9	314
Impactos del cambio climático en lagunas costeras mexicanas: evidencias, vulnerabilidad, adaptación y mitigación Ofelia Castañeda López Alfonso Vázquez Botello Raquel Segura Aguilar	

CAPÍTULO 10	342
Políticas públicas, manglares y protección costera frente al cambio climático. El caso de La Encrucijada, Chiapas Ludger Brenner	
CAPÍTULO 11	372
Los residuos plásticos y el cambio climático Alethia Vázquez Morillas Margarita Beltrán Villavicencio Rosa Ma. Espinosa Valdemar Jéssica Paola Hermoso López Araiza Elodia Villagrán Cano	
Conclusiones finales	400

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo financiero otorgado por medio del Proyecto de Ciencia Básica SEP-CONACYT (CB-2013-01), proyecto número 221460, así como a la Coordinación General de Vinculación y Desarrollo Institucional de la Rectoría, de la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM).

INTRODUCCIÓN

El cambio climático se ha convertido en uno de los grandes retos para la humanidad, que exige pronta respuesta para establecer las condiciones que favorezcan la mitigación y adaptación dadas las amenazas que representa para el hombre y los ecosistemas. Este fenómeno está relacionado con el calentamiento del planeta, resultado de la elevada concentración atmosférica de Gases de Efecto Invernadero (GEI) entre los que se encuentran el dióxido y óxido de carbono (CO_2 y CO), el metano (CH_4) y el óxido nitroso (NO), explicado por la quema de combustibles fósiles, cambios en el uso de suelo y por la deforestación.

Se estima que la temperatura media de la Tierra se ha incrementado en 0.85°C desde el periodo preindustrial hasta nuestros días, y se proyecta que continuará aumentando a lo largo del siglo XXI con base en los escenarios que representan las Trayectorias de Concentración Representativas (RCP, por sus siglas en inglés). Si no se estabiliza la generación de GEI que se emiten a la atmósfera, la temperatura media podría aumentar en hasta 5.4°C para el 2100; situación que provocará severos impactos que pondrán en riesgo diversos sectores, grupos poblacionales y ecosistemas en diferentes escalas temporales y espaciales. Sin embargo, aunque las economías del mundo logren implementar modelos bajos en carbono y se reduzca la emisión de GEI, la temperatura podría incrementarse entre 0.9 y 2.3°C ; lo cual pone en evidencia la necesidad de fortalecer las capacidades de adaptación, promoviendo las sinergias con los esfuerzos de mitigación que están en curso para hacer frente al cambio climático. Entre los impactos identificados como muy probables, están la ocurrencia con mayor frecuencia y con una duración más prolongada de olas de calor, eventos más intensos y frecuentes de precipitación extrema, el calentamiento y acidificación del océano, así como un incremento en el nivel medio global del mar.

Con base en el Quinto Reporte (AR5) del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC), el calentamiento del planeta ha

afectado en particular a los océanos, dado que aproximadamente 30% de las emisiones de CO₂ antropogénico a lo largo del siglo XX, han sido absorbidas por los océanos. Como resultado de ello, se estima que los 75 m superiores se han calentado entre 0.09 a 0.13°C por decenio, favoreciendo un incremento en la acidez, en un 26%, y cambios en la salinidad en diversas zonas en este mismo periodo. Por otro lado, los mantos de hielo de los polos han ido perdiendo masa, registrándose este fenómeno con mayor rapidez a partir del 2002. Aunado a ello, la superficie media anual del hielo marino del Ártico ha disminuido entre 1979 y el 2012 en un rango que va de 3.5 a 4.1% por decenio; mientras que en la Antártida ha aumentado entre 1.2 y 1.8% en el mismo periodo. Esto ha favorecido a que el nivel medio global del mar se haya elevado en el último siglo en aproximadamente 0.19 m.

Desafortunadamente, a pesar de las estrategias de mitigación al cambio climático que se han implementado en gran parte de los países del mundo, las emisiones antropogénicas totales de GEI ha aumentado en términos absolutos desde el año 2000, alcanzando, en el 2010, aproximadamente 49 ± 4.5 GtCO₂eq/año, siendo el crecimiento económico y demográfico las principales causas de dichos aumentos.

Cabe mencionar, que de acuerdo a los 4 nuevos escenarios de emisión o RCP, que plantean un forzamiento radiativo total para el año 2100 que oscilan entre 2.6 y 8.5 W/m², las proyecciones indican que la extensión del suelo marino en el Ártico disminuirá todo el año, siendo probable que a mediados de siglo XXI el océano Ártico haya reducido severamente su masa de hielo (con base en el RCP8.5). En el caso de la extensión del permafrost, se proyecta que reducirá su extensión entre un 37% (RCP2.6) y un 81% (RCP8.5). Los incrementos proyectados en la temperatura media terrestre para mediados del siglo XXI podrían afectar la seguridad alimentaria, además de favorecer la redistribución global de las especies marinas y la reducción de la biodiversidad marina. Las proyecciones también consideran que los recursos hídricos se reducirán, incluyendo las aguas superficiales y subterráneas, en las

regiones secas subtropicales, lo que intensificará la competencia por el agua entre los diferentes usuarios. La escasez de alimentos, aunado a la mayor competencia por el agua, incrementará el número de personas desplazadas, en particular, aquellas personas que se encuentren en condiciones de marginación, además de favorecer la ocurrencia e intensificación de conflictos socioambientales por garantizar el acceso a los recursos naturales. Aunque se sabe que la pérdida de la masa de hielo es irreversible, no se cuenta con información para determinar cuantitativamente el aumento que podría presentarse del nivel mar.

Ante escenarios poco alentadores para el 2100, los países que participaron en la Conferencia de las Partes (COP) celebrada en París en el 2015, acordaron llevar a cabo diversas medidas para limitar que la temperatura media del planeta supere los 2.0°C por encima de los niveles preindustriales, reconociendo que es deseable evitar un incremento mayor a los 1.5°C. Si se limita el calentamiento del planeta en 2°C, y se llevan a cabo las medidas de adaptación necesarias, los niveles de riesgo que enfrentaría el planeta podrían reducirse a un nivel medio o bajo con respecto a la extinción de especies, la escasez de agua, la reducción de la productividad agrícola, y las pérdidas económicas y humanas por eventos extremos. Desafortunadamente, los riesgos asociados a la acidez del océano, la desaparición de varias de las islas en el Pacífico, la pérdida de biodiversidad marina y los daños a la salud por exposición a olas de calor seguirán siendo altos, aunque la temperatura promedio aumente en 2°C. Por otro lado, si la temperatura media terrestre llegará a incrementarse en 4°C, los riesgos humanos asociados a la emergencia de conflictos por garantizar el acceso a recursos naturales y alimentos serían muy altos, al igual que los impactos resultado de la mayor ocurrencia e intensidad de los eventos hidrometeorológicos extremos. La población que ya enfrenta altos niveles de vulnerabilidad, en particular en los países en desarrollo, serán quienes enfrenten mayores riesgos por el cambio climático. Lo anterior, nos lleva a reflexionar qué medidas de adaptación se requieren implementar, cómo se

puede seguir contribuyendo a la mitigación para reducir los impactos potenciales y de dónde provendrá el financiamiento que requieren los países menos desarrollados.

México se unió a la Convención Marco sobre el Cambio Climático (CMNUCC) en 1992, comprometiéndose a trabajar junto con otros países para estabilizar los GEI. Sin embargo, fue hasta principios del siglo XXI, cuando se definió como un objetivo determinante para el desarrollo la reducción de emisiones de GEI en 50.7 MtCO₂e para el año 2050, así como la creación y fortalecimiento de las capacidades de adaptación. Aunque se proyecta que el cambio climático afectará a todas las regiones del país, se ha identificado a la Ciudad de México como la entidad más vulnerable, debido a su mayor concentración demográfica y urbana, así como por sus problemas ambientales y urbanos.

Hasta el momento, las medidas encaminadas a favorecer la mitigación, han recibido una mayor atención gubernamental en comparación con aquellas orientadas a la adaptación. Las estrategias de mitigación que hasta el momento se han llevado a cabo en México se han enfocado en fomentar el uso de energías renovables, promover la eficiencia energética, reducir las emisiones de GEI en los procesos productivos, conservar los bosques y áreas verdes del país, y regular la gestión sustentable del suelo. En el caso de las estrategias de adaptación, éstas están orientadas a evaluar la vulnerabilidad de los sectores económicos al cambio climático, a fin de fortalecer sus capacidades de adaptación.

El libro *Reflexiones del Cambio Climático desde la Academia*, pretende contribuir a la discusión sobre el cambio climático, sus impactos y soluciones desde el punto de vista de la academia. Con este fin, el presente libro se organiza en tres apartados. La Primera Sección llamada los **Retos ante el Cambio Climático** contiene tres capítulos. El Capítulo 1, titulado *Estrategias de mitigación y adaptación para enfrentar el cambio climático en la Ciudad de México*, hace hincapié en los retos que representa este fenómeno para la Ciudad de México y

cómo el gobierno da respuesta a esta problemática. Asimismo, en este capítulo se analizan los retos y aprendizajes que el gobierno local ha enfrentado, y las acciones que ha puesto en marcha para promover la mitigación y adaptación en la Ciudad de México. En el Capítulo 2, *La dimensión institucional de los gobiernos locales en la adaptación al cambio climático*, se identifican diez dimensiones que evidencian los nexos entre el entorno técnico-burocrático del estado y los sectores socioeconómicos. Adicionalmente, este capítulo analiza y da cuenta del valor de la sociedad en el éxito de cualquier política, en particular aquellas orientadas al combate del cambio climático. El tercer capítulo de esta primera sección, *El costo económico de los desastres de origen climatológico en América Latina y el Caribe (1970–2008)*, advierte como lo indica su título, el costo económico que han enfrentado los países de la zona ante eventos climatológicos. Como resultado del análisis de este capítulo, se revela que es el sector agrícola el que será el más perjudicado por los desastres climáticos, en particular los países más pequeños; al final se aportan algunas ideas de cómo reducir tanto los costos como la vulnerabilidad en este sector a los eventos hidrometeorológicos extremos.

En la Segunda Sección se abordan las **Estrategias de Mitigación para el combate del Cambio Climático**, y se integra por cuatro capítulos. El Capítulo 4, *El mercado de bonos de carbono en México: realidad y perspectivas de desarrollo*, aborda el mecanismo de acción de uno de los instrumentos económicos que permiten a los países desarrollados cumplir o abonar al cumplimiento de los objetivos de reducción de las emisiones GEI. Técnicamente un bono de carbono equivale a una tonelada de CO₂ que se ha dejado de liberar al ambiente. En el capítulo se explica que aun cuando no ha sido tan eficiente la implementación de estos instrumentos económicos, el gobierno de México ha hecho un esfuerzo por ejecutarlos. Además, se describe el uso de este y otros instrumentos de mitigación ante la creciente emisión de GEI al ambiente. El Capítulo 5, titulado *Perspectivas en la construcción de capaci-*

dades tecnológicas para el sector eólico en México, analiza la importancia que tiene tanto el conocimiento tecnológico para el aprovechamiento de este tipo de energía alternativa como la construcción de las capacidades tecnológicas en el sector eólico en México como un área de oportunidad que es prioritario explorar. Asimismo, enfatiza la trascendencia de lograr la cooperación entre los diferentes entes participantes, el sector productivo, el sector educativo y el sector científico, de manera que se logre el desarrollo y consolidación de la energía eólica en México.

Por otro lado, el Capítulo 6, *Combustión Catalítica: una alternativa en la mitigación de gases de efecto invernadero, una perspectiva desde México*, proporciona una visión de una tecnología ya conocida, como lo es la combustión catalítica, pero con mejoras que favorecen el uso y optimización de los catalizadores con paladio y platino. Estas mejoras representan un área de oportunidad para la industria en México orientado a promover la eficiencia energética. En este sentido, este capítulo es una propuesta para aprovechar tecnologías ya conocidas, haciéndolas más eficientes para reducir la contaminación y apoyar la mitigación de GEI.

El último capítulo en esta segunda sección, Capítulo 7, se titula *Quema de la caña de azúcar, carbono negro y cambio climático*, y en él se aborda la problemática que sufre la industria azucarera en nuestro país, al contribuir a la generación de GEI. México es el sexto productor de caña de azúcar en el mundo y esta actividad representa un importante ingreso económico que equivale a 0.4% del PIB. Sin embargo, su procesamiento incluye una fuerte emisión de gases y partículas que suman al efecto invernadero, incluyendo fuertes daños a la salud. Este capítulo refiere la investigación realizada en la región Soconusco del Estado de Chiapas, en donde se llevó a cabo un estudio de evaluación de la calidad del aire de la zona por los residuos procedentes de la quema de la caña de azúcar; asimismo reflexiona sobre el área de oportunidad que tiene esta problemática ambiental para ser analizada con el fin de proponer medidas de solución.

Finalmente, la Tercera Sección se denomina **Compromisos Ambientales Actuales** y reúne cuatro capítulos. El Capítulo 8, sobre *La gestión del Agua en la Ciudad de México ante el Cambio Climático*, forma parte de una investigación en curso que analiza como las variaciones climáticas afectan la calidad y cantidad de agua que se le suministra a la población de la Ciudad de México, así como los impactos futuros que enfrentará este sector como resultado del cambio climático, identificando las medidas de adaptación se han llevado a cabo y que podrían contribuir a hacerle frente de manera más eficaz. El Capítulo 9 titulado *Impactos del cambio climático en lagunas costeras mexicanas: evidencias, vulnerabilidad, adaptación y mitigación*, hace una revisión de cómo el cambio climático ha afectado las zonas costeras en México y promueve el uso del concepto “manejo-ecosistémico costero”, visto como una “estrategia integral de manejo de suelo, agua y recursos naturales”, que puede impulsar el uso sostenible de los recursos naturales para el bien común. El Capítulo 10, *Políticas públicas, manglares y protección costera frente al cambio climático: el caso de La Encrucijada/Chiapas*, habla de la situación de deterioro que sufren los manglares en México, en particular el de la Encrucijada, en Chiapas; región donde la pérdida de manglares es alarmante y en donde la biodiversidad en cuanto a plantas y animales endémicos se ha visto llevada al extremo, lo que representa un reto para que la zona proporcione servicios ambientales que ayuden a los manglares a recuperar su capacidad reguladora. En este sentido, este capítulo hace un análisis amplio de los recursos e instrumentos necesarios para dimensionar la problemática de los manglares en México. Finalmente, el Capítulo 11 titulado *Los residuos plásticos y el cambio climático*, analiza los potenciales efectos que el uso de materiales plásticos degradables pueden generar en el incremento de GEI en dos virtuales ambientes: en rellenos sanitarios y en el composteo. El resultado de la investigación sugiere que el uso de material plástico degradable no garantiza su total reincorporación al medio ambiente, por lo que es importante

analizar la viabilidad de implementar cualquier medida que pretenda ser una alternativa de mitigación.

Bajo este contexto, este libro recoge importantes reflexiones de vanguardia orientadas a mejorar la comprensión actual de los retos que representan el cambio climático en México, fortalecer la adaptación a partir del estudio de las estrategias que se han llevado a cabo y aquellas que se requieren realizar en sectores estratégicos como el sector agua, la agricultura y energía, así como para apoyar la mitigación por medio del desarrollo de tecnologías limpias y de mejoras en los procesos productivos para reducir la generación de GEI y aumentar la eficiencia energética.

SECCIÓN I

RETOS ANTE
EL CAMBIO CLIMÁTICO

CAPÍTULO 1

Estrategias de Mitigación y Adaptación para enfrentar el Cambio Climático en la Ciudad de México

Fabiola S. Sosa-Rodríguez¹

Jorge G. Vázquez-Arenas²

Introducción

En la actualidad, uno de los principales desafíos que enfrenta la Ciudad de México es el cambio climático. El cambio climático está relacionado con el calentamiento del planeta por la elevada concentración atmosférica de dióxido y óxido de carbono (CO_2 y CO), metano (CH_4) y óxido nitroso (NO), gases también conocidos como de efecto invernadero (GEI), que resultan de la quema de combustibles fósiles para la realización de actividades humanas, cambios en el uso de suelo y por la deforestación.

El calentamiento antropogénico ha modificado el clima, lo cual se constata en los aumentos observados en las temperaturas oceánica y terrestre así como en las variaciones en la precipitación, así como el incremento en la ocurrencia e intensidad de fenómenos hidrometeorológicos extremos (e.g., sequías, lluvias torrenciales y huracanes). Por ejemplo, el incremento total de temperatura en el periodo de 2003-2012 fue de 0.85°C (GIECC, 2013).

¹ Profesora-Investigadora del Área de Crecimiento y Medio Ambiente, Departamento de Economía, Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco. Correo de contacto fssosa@gmail.com

² Profesor-Investigador del Centro Mexicano para la Producción más Limpia (CMPL), Instituto Politécnico Nacional (IPN).

Se proyecta que la temperatura media global podría aumentar en un rango de 1.1 a 6.4°C para el año 2050 si la concentración de emisiones de GEI en la atmósfera no se estabiliza (IPCC, 2007a). Incrementos en la temperatura de esta magnitud, junto con variaciones en otros parámetros climáticos asociados, sin duda tendrán serios impactos en los sistemas humanos y naturales, que serán irreversibles y catastróficos. De acuerdo con la Organización Meteorológica Mundial (OMM), el 2016 ha sido el año más cálido del que se tenga registro, estimándose que la temperatura media global ha aumentado en 1.1 °C, desde el periodo preindustrial³ (OMM, 2015).

Sin embargo, aunque la concentración de GEI se estabilice, se proyecta que la temperatura global seguirá aumentando en hasta 0.9°C para el año 2100 (IPCC, 2007b). Por consiguiente, algunos de los efectos del cambio climático serán inevitables a pesar de los avances en materia de mitigación, siendo la creación y el fortalecimiento de las capacidades de adaptación una estrategia crucial para hacer frente a las consecuencias negativas de este fenómeno. En este sentido, la efectividad de las políticas para mitigar y adaptarse al cambio climático depende de la integración de estrategias para el combate al cambio climático junto con los esfuerzos sectoriales encaminados a la reducción de la vulnerabilidad, los cuales pueden contribuir a este fin requiriéndose menos recursos.

México se unió a la Convención Marco sobre el Cambio Climático (CMNUCC) en 1992, comprometiéndose a trabajar junto con otros países para estabilizar los GEI en la atmósfera. A pesar de ello, durante la década de 1990, la mitigación y adaptación al cambio climático no fue una prioridad en la agenda de gobierno ni en la agenda de la sociedad.

Fue hasta principios del siglo XXI, cuando el Gobierno Federal definió como uno de sus objetivos más importantes la reducción de emi-

3 El periodo preindustrial se refiere al lapso de tiempo que va de 1850 a 1899, o de 1880 a 1899, donde para ambos el valor de 1.1°C.

siones de GEI en 50.7 MtCO₂e para el año 2050. Para cumplir con este objetivo, se definió por primera vez como prioridad para el desarrollo nacional en el Plan Nacional de Desarrollo (PND, 2007-2012) hacer frente al cambio climático. El PND establece los objetivos, estrategias y prioridades nacionales que deben cumplir las secretarías (e.g., transporte, salud, energía y medio ambiente, entre otras) a través de sus programas sectoriales.

Este plan apoyó la creación del Programa Especial de Cambio Climático (PECC, 2009-2012), cuyo objetivo es guiar la mitigación y la adaptación tanto a nivel sectorial como regional. La integración del PECC con otras estrategias y programas implementados a nivel regional y local, puede garantizar el éxito de la política de cambio climático en México. Aunque se proyecta que este fenómeno afectará a todas las regiones del país, el PECC ha identificado a la Ciudad de México como la entidad que enfrentará los mayores impactos por las variaciones proyectadas en la temperatura y precipitación, debido a su mayor concentración demográfica y urbana, así como por sus problemas ambientales y urbanos preexistentes (Sosa-Rodríguez, 2013b). Cabe mencionar, que la ciudad ha estado expuesta a los riesgos climáticos desde su fundación en la época precolombina, siendo destruida varias veces por inundaciones catastróficas o largas sequías (Sosa-Rodríguez, 2010a).

Hasta el momento, la política del cambio climático en la Ciudad de México, sus avances, limitaciones y retos no han sido analizados. Por este motivo, esta investigación representa un esfuerzo para estudiar la compleja interacción que existe entre las respuestas gubernamentales para combatir el cambio climático y su efectividad para fortalecer las capacidades de mitigación y adaptación en el país. Este capítulo, en un primer momento, examina los impactos potenciales del cambio climático en los diferentes sectores y regiones de la Ciudad de México, teniendo en cuenta las características que la hacen vulnerable a las variaciones del clima.

En un segundo momento, analiza las medidas implementadas por el gobierno federal y las autoridades de la ciudad para reducir las emisiones de GEI y promover la adaptación. En un tercer momento, se evalúan los avances y contradicciones de estas acciones, reflexionando sobre los obstáculos y retos que enfrenta la política de cambio climático de la ciudad para crear y fortalecer sus capacidades de mitigación y adaptación. Finalmente, se identifican los desafíos y las principales lecciones aprendidas, las cuales pueden guiar la política de cambio climático en otras ciudades del mundo.

En la actualidad, la Ciudad de México es una de las ciudades más importantes de América Latina, que se ha visto afectada por diversos riesgos climáticos (Sosa-Rodríguez, 2010a). Sin embargo, la magnitud y la intensidad de estos eventos pueden amplificarse debido al proceso de urbanización no planificado, su acelerado crecimiento demográfico, el uso irregular del suelo y su gran desigualdad social. Los mismos problemas urbanos y sociales están presentes en muchas otras ciudades del mundo, por ende, esta investigación proporcionaría un ejemplo útil.

LOS IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CIUDAD DE MÉXICO

México es considerado uno de los países más vulnerables a los impactos del cambio climático, ya que 15% de su territorio nacional, 68.2% de su población y 71% de su Producto Interno Bruto (PIB), son propensos a sufrir las consecuencias negativas de este fenómeno ambiental (Sosa-Rodríguez, 2013a).

Con base en el Modelo de Circulación General (MCG) GFDL-R30 (elaborado por el Geophysical Fluid Dynamics Laboratory en Estados Unidos de América) para el escenario climático A2 (asociado a una economía intensiva en el consumo de combustibles fósiles) y

ajustado a la escala regional (*downscaling*), se proyecta que la temperatura media anual en el país aumentará entre 0.5 y 4.8°C en el período 2020-2100. La precipitación podría reducirse en hasta un 15% durante el invierno y en un 5% en el verano, además la temporada de lluvias podría retrasarse hasta el otoño (Sosa-Rodríguez, 2013b).

Se proyecta que los eventos hidrometeorológicos extremos podrían aumentar la ocurrencia de inundaciones y, por ende, los riesgos a la salud por daños a los sistemas de distribución de agua y drenaje, así como por el repunte de enfermedades de origen hídrico (Vorosmarty, 2000; Bates *et al.*, 2008). Estos eventos también podrían afectar la infraestructura para el transporte, la generación de electricidad y la extracción y procesamiento del petróleo. En especial, la infraestructura ubicada en las zonas costeras podría ser dañada por un incremento proyectado en el nivel del mar estimado en hasta 5 metros (Weiss y Overpeck, 2012).

Los ecosistemas naturales pueden estar en peligro por el cambio climático y algunas especies podrían extinguirse si las temperaturas regionales y locales aumentan a un ritmo que supere su capacidad de adaptación. Asimismo, los bosques estarán más expuestos a incendios forestales. Este problema, agravado por la urbanización y el crecimiento de los asentamientos irregulares, traerá consigo una pérdida acelerada de los servicios ambientales proporcionados por estos ecosistemas, incluido el secuestro de carbono.

Otro sector que será severamente afectado es el agrícola, ya que se proyecta que el cambio climático podría destruir grandes áreas de cultivo, primordialmente aquellas que son de temporal; situación que podría poner en riesgo la seguridad alimentaria del país. Se habla que para la década de 2050 se reducirá la productividad del maíz, que se ve evidenciado actualmente con la pérdida de fertilidad en suelos en un 25% de las unidades de producción (Gobierno de la República, 2014).

Debido a sus diferentes climas, recursos naturales, infraestructura instalada, desarrollo económico y concentración demográfica en el te-

territorio nacional, se espera que los impactos del cambio climático se distribuyan de manera desigual. La región central será particularmente afectada por las variaciones climáticas, identificando el PECC a la Ciudad de México como una de las áreas que será más sensible a los cambios en la temperatura y precipitación, debido a su vulnerabilidad preexistente asociada a las demandas no satisfechas de agua, energía y alimentos; a la elevada concentración demográfica y de actividades económicas; a la deforestación, y a la mayor dependencia de fuentes de agua cada vez más distantes (Delgado, 2012; Sosa-Rodríguez, 2010b).

Se espera que esta región sea particularmente afectada por la ocurrencia de sequías más frecuentes, como resultado de un incremento en la temperatura y reducción de la precipitación. Dichas variaciones climáticas podrían reducir la disponibilidad natural de agua en la región; situación que afectará principalmente a la Ciudad de México por su elevada dependencia a fuentes externas, la actual sobreexplotación del acuífero Valle de México, y el elevado estrés hídrico en que se encuentra.

Adicionalmente a esta situación de riesgo, aunque se prevé que la precipitación total en la Ciudad de México se reducirá, las lluvias podrían presentarse con una mayor intensidad, favoreciendo la ocurrencia de inundaciones tanto de aguas pluviales como residuales. Lo anterior, debido a que el sistema de drenaje de la ciudad no cuenta con la capacidad para extraer este exceso de agua. Las inundaciones no sólo afectarán a las zonas urbanas, sino también a las zonas rurales, a las vialidades (primarias, secundarias y terciarias) y, por ende, a la movilidad, repercutiendo en importantes costos económicos y sociales asociados al transporte de bienes y personas. Adicionalmente, precipitaciones menos frecuentes, pero más intensas incrementan el riesgo de deslizamientos de tierra y erosión del suelo por una mayor escorrentía.

La disminución en la precipitación puede reducir la generación de energía hidroeléctrica debido a cambios en los niveles de los ríos y presas; esta situación, junto con temperaturas más altas, puede afec-

tar la operación e integridad de esta infraestructura. Se espera que la demanda de energía aumente por un uso más intensivo de aparatos eléctricos, así como por una mayor concentración de las actividades económicas en la capital del país.

Las lluvias más intensas pueden provocar apagones que podrían durar varias horas, causando importantes pérdidas económicas. Este tipo de eventos extremos también podrían causar un aumento en las infecciones intestinales y enfermedades transmitidas por vectores, asociados a la reducción en la calidad del agua. El incremento en la temperatura favorecerá un aumento en el número de personas afectadas por la deshidratación e insolación; los ancianos, niños menores de 5 años de edad y los grupos más pobres serán los más afectados, ya que constituyen los grupos más vulnerables.

Se proyecta que la temperatura media anual en la Ciudad de México podría aumentar en hasta 2.8°C, mientras que la precipitación anual disminuir en 10.4% en la década de 2020 y 2070. Cabe destacar, que la precipitación en la ciudad podría disminuir en hasta un 50% de acuerdo con las proyecciones de los modelos IPSLCM4-SR-A1B y A2 (Sosa-Rodríguez, 2013b). Aunque una disminución de esta magnitud en la precipitación es muy poco probable, si llegara a ocurrir, la seguridad hídrica de la ciudad se vería amenazada.

Los cambios esperados en las variaciones climáticas pueden aumentar la escasez de agua y provocar situaciones de emergencia como la que enfrentó la capital del país en 2009. Durante este evento, el Sistema Cutzamala que proporciona el 28.7% del total del suministro de agua a la ciudad vio reducida la capacidad de sus represas a menos de 38.9% debido a un evento de sequía.

Situaciones de escasez del recurso agua, provocadas por variaciones climáticas se espera que afecten primordialmente a los habitantes que residen al sur y este de la ciudad; estos grupos han enfrentado de manera crónica problemas de escasez o mala calidad a lo largo de varias décadas. Cabe destacar, que algunos de los residentes de estas áreas

llegan a consumir menos de 20 litros/día, teniendo que encontrar formas alternativas de acceso al agua que no necesariamente cumplen con los estándares de calidad para garantizar un consumo seguro y que además suelen ser más costosas (Sosa-Rodríguez, 2010b; Sosa-Rodríguez, 2012). En este sentido, más largas e intensas sequías pueden intensificar o generar más conflictos entre los usuarios de este recurso por garantizar su uso.

El aumento de temperatura y la reducción de la precipitación también pueden afectar a la calidad del aire de la ciudad, mediante la reducción de la dispersión de contaminantes en la atmósfera por cambios en la velocidad del viento y aumentos en la radiación solar. La disminución de la calidad del aire puede ser mayor a lo esperado, ya que la Ciudad de México tiene la particularidad de estar rodeada por una barrera natural que consiste en un sistema de montañas localizados al suroeste que alcanzan alturas superiores a 5,400 msnm. Este sistema obstaculiza la libre circulación del viento y la dispersión de los contaminantes.

Por otra parte, el aumento de las temperaturas máximas puede afectar a toda la población, debido a que la mayoría de los hogares no están equipados con sistemas de aire acondicionado. Las zonas pobres serán las más afectadas ya que las viviendas en estas áreas suelen estar construidas con materiales que no soportan condiciones climáticas extremas.

Adicionalmente, las áreas verdes existentes (que sirven como sumideros de carbono), enfrentan grandes presiones por la urbanización irregular y las prácticas agrícolas extensivas, en las pocas áreas rurales que quedan en la ciudad y en las áreas naturales protegidas (e.g., Corredor Biológico Chichinautzin, los bosques de la Cañada de Contreras, Sierra de Santa Catarina, el Bosque de Tláhuac). La rápida pérdida y degradación de las zonas verdes de la ciudad es un grave problema que promoverá cambios climáticos más radicales, así como los efectos negativos sobre la biodiversidad.

Además, existe una relación directa entre el número de incendios forestales y la temperatura de la ciudad: en los años más cálidos, se

registró el mayor número de incendios forestales (Sosa-Rodríguez, 2013b). Como resultado de los programas implementados para mejorar la conservación de los bosques a nivel federal y en la Ciudad de México, la zona dañada por los incendios forestales se ha reducido, pero la degradación forestal y la deforestación siguen reduciendo los servicios ambientales prestados por estos ecosistemas.

Dadas las evidencias que la temperatura y la precipitación en la Ciudad de México están cambiando, el gobierno federal, y posteriormente, el de la ciudad han puesto en marcha diversas acciones en materia de **mitigación y adaptación** (M&A) desde finales de los años noventa. Las respuestas implementadas en la capital del país para hacer frente a este fenómeno se analizarán en la siguiente sección.

RESPUESTAS GUBERNAMENTALES EN LA CIUDAD ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO

Las autoridades de la Ciudad de México han implementado diversas acciones para responder al cambio climático, las cuales han estado orientadas principalmente a la mitigación. Algunas de estas respuestas coinciden con las acciones en materia de Mitigación y Adaptación (M&A) implementadas a nivel federal, mientras que otras son exclusivas de la ciudad.

Un esfuerzo inicial fue la aprobación de la Estrategia Local de Acción Climática (ELAC) en 2004, que establece las directrices a cumplir para reducir los efectos de la M&A. Coincidiendo con las prioridades a nivel federal, las respuestas en la ciudad se centran en promover un transporte limpio y eficiente, el uso eficiente de energía, la sustitución de combustibles fósiles y la conservación de las áreas verdes. Cabe destacar, que la Ciudad de México fue el primer gobierno local en América Latina que puso en práctica un Programa de Acción Climática Local (PACL) en 2008, compuesto por 26 estrategias de mitigación para reducir las emisiones en 7 MtCO₂e entre 2008 y 2012, así como

12 estrategias de adaptación cuyo objetivo es identificar los peligros hidrometeorológicos y el desarrollo de mecanismos de respuesta. Este programa también integra las estrategias del Programa General de Desarrollo (2006-2012) y del Plan Verde (2006-2012) que pueden apoyar la M&A en la ciudad.

A diferencia del Programa Especial de Cambio Climático (PECC) (implementado a nivel federal), cuyas estrategias se dividen por sector, las acciones del PACL comprenden cinco áreas prioritarias con objetivos cuantitativos específicos para la reducción de las emisiones. Estas áreas comprenden: energía, agua, transporte, residuos y comunicación/educación. Ejemplos de las estrategias de mitigación ejecutadas en la Ciudad de México incluyen: los programas de eficiencia energética, el desarrollo de tecnologías limpias, la gestión forestal y reforestación, el monitoreo de la calidad del aire y el transporte verde. En general, estas acciones tienen como objetivo reducir las emisiones en 4.4 MtCO₂e/año; cifra que representa un 12% del total de las emisiones anuales generadas en la ciudad, estimadas en 36.66 MtCO₂e (SMA, 2008a): el sector del transporte concentrará 43.1% del total emisiones a reducir, el sector de residuos 35.4%, el sector agua 11.7%, y el sector energía 9.7%.

Una gestión más sustentable de los residuos a través de la captación y utilización de biogás en vertederos y rellenos sanitarios contribuirá a reducir un 31.6% de los 4.4 MtCO₂e/año y un sistema de transporte más eficiente por medio de la sustitución de las unidades más obsoletas y de menor capacidad por vehículos nuevos y de mayor capacidad un 19.9% del total (Sosa-Rodríguez, 2013a).

Cabe destacar, que las estrategias de eficiencia energética y energías renovables tendrán efectos modestos en la reducción de emisiones en la ciudad, estimados en 0.45 y 9.26% del total, respectivamente. Esta situación pone de relieve la necesidad de promover la transferencia de conocimiento y tecnología en este sector con el fin de apoyar las mejoras en materia de mitigación en los procesos de producción por medio de los Mecanismos de Desarrollo Limpio (MDL).

Las autoridades de la ciudad también han favorecido la publicación del Inventario de Emisiones de GEI para el Área Metropolitana de la Ciudad de México (AMCM) en 2006 y 2010. Cabe mencionar, que la Ciudad de México tiene una larga historia en el combate de la contaminación del aire. El primer programa de calidad del aire, el Programa Integral contra la Contaminación Atmosférica (PICCA, 1990-1995), se implementó por primera vez en 1990 cuando la contaminación del aire en la ciudad alcanzó niveles críticos. Este programa sirvió de base para el diseño de otros programas dirigidos a mejorar la calidad del aire en las grandes ciudades del país. La mayoría de las medidas implementadas en el PICCA, junto con el Programa Hoy No Circula (creado en 1989), fueron retomadas en el Programa para Mejorar la Calidad del Aire en el Valle de México (probado en 1995) (PROAIRE I, 1995-2000), en el PROAIRE II (2002-2010) y en el PROAIRE III (2011-2020) (SEMARNAT 2011; SMA 2002). Estos programas han estado enfocados principalmente a la reducción de emisiones de los contaminantes criterio (CO , NO_x , SO_2 , O_3 , PM_{10}) y al monitoreo de su evolución para la mejora de la calidad del aire en el país. Desafortunadamente, el PECC y el PACL no proponen otras estrategias para hacer frente al problema de la calidad del aire y reducir los impactos del cambio climático, lo cual podría apoyar la mitigación de este fenómeno.

En el caso de las medidas de adaptación, éstas se centran en el fortalecimiento de los sistemas de alerta temprana y mecanismos de respuesta, así como la evaluación de la vulnerabilidad de los diferentes sectores al cambio climático para fortalecer sus capacidades de adaptación. Por ejemplo, los esfuerzos de adaptación a corto plazo para mejorar los sistemas de alerta temprana incluyen la vigilancia de incendios forestales, de los eventos hidrometeorológicos, de los brotes epidemiológicos y para la predicción del clima.

Otras iniciativas consisten en promover la conservación del suelo, el agua y los bosques, la construcción de techos verdes, la captación y

reuso del agua pluvial, la rotación de cultivos y los programas destinados a ayudar a las personas vulnerables durante eventos climáticos extremos (olas de calor y frío).

En el caso de las medidas de adaptación a largo plazo, éstas están principalmente orientadas a desarrollar las capacidades de las zonas rurales más marginadas por medio de la agricultura ecológica, el desarrollo rural y la conservación de los recursos naturales. El PACL también fomenta la comunicación para el cambio climático y la educación como una de sus acciones más importantes con el fin de influir en el comportamiento, los hábitos y actitudes de los habitantes para promover la M&A.

Un avance importante en esta materia fue la aprobación, en 2010, de la Ley de Mitigación y Adaptación al Cambio Climático (LMACC). Esta ley autoriza al gobierno de la ciudad a regular las acciones requeridas para enfrentar el cambio climático, promover instrumentos financieros mediante el establecimiento del Fondo Ambiental de Cambio Climático (FACC), elaborar inventarios de emisiones de GEI y crear un Sistema de Comercio de Emisiones de Carbono.

De acuerdo con los artículos 8 y 9 de la Ley General de Cambio Climático, todas las entidades estatales y municipales están obligadas a diseñar e implementar un programa para fortalecer las capacidades de adaptación de sus regiones para hacer frente a este fenómeno, además de reducir sus emisiones de GEI (DOF, 2012). La Tabla 1 sintetiza las respuestas de mitigación y adaptación implementadas en la Ciudad de México, aquellas que están en curso y las que faltan de realizar con base en las acciones promovidas por los programas federales.

Tabla 1. Respuestas gubernamentales para la M&A en la Ciudad de México

Sector	Estrategias implementadas	Estrategias en progreso
Agua	• Construir infraestructura para la prevención de deslizamientos • Ajustar los precios del agua para promover un consumo racional • Instalar dispositivos ahorradores de agua para un uso eficiente • Construir infraestructura para reducir el consumo de energía durante el bombeo, transporte y distribución del agua • Recuperar ríos y canales de agua • Mejorar la predicción de eventos hidrometeorológicos, así como los sistemas de alerta temprana • Modificar los códigos de construcción para incrementar la captura del agua de lluvia y su reutilización en tanques de aguas grises • Implementar programas de prevención y respuesta ante emergencias • Reducir las emisiones de los sistemas sépticos y plantas de tratamiento de aguas residuales	• Garantizar el balance entre las tasas de extracción y recarga del acuífero • Conservar el suelo en zonas de recarga del acuífero para incrementar la infiltración del agua de lluvia en hasta 2.5 m³/segundo • Medir el consumo de agua en toda la ciudad con la instalación de medidores • Ampliar las redes de pozos y la rehabilitación de 892 km de tuberías para reducir las pérdidas de agua • Aumentar la reutilización de las aguas residuales y su tratamiento en hasta 7.2 m³/segundos con la construcción de una planta de tratamiento que tratará 60% del total de las aguas residuales generadas • Tratar 125 litros/segundo de aguas residuales para la recarga del acuífero • Construir el Sistema de Drenaje Emisor Oriente y los colectores Río Magdalena y Eslava • Elaborar un Atlas de Riesgos Hidrometeorológicos y Climáticos

Sector	Estrategias implementadas	Estrategias en progreso
Bosque	• Prevenir y tratar las enfermedades del clima con campañas de vacunación, distribución de suero oral y monitoreo de epidemias • Vigilar las condiciones sanitarias en la producción de alimentos • Proporcionar asistencia social a grupos vulnerables con el establecimiento de albergues en eventos de frío y calor extremos	Implementar sistemas de alerta temprana para evitar la diseminación de enfermedades relacionadas con el clima Mejorar el seguimiento de la información climática y su integración en la toma de decisiones Mejorar la calidad del agua y su monitoreo
Biodiversidad	• Implementar programas para la conservación de la biodiversidad • Integrar estrategias de conservación con programas agrícolas • Conservar las barrancas urbanas, reforestando y evitando los asentamientos humanos irregulares • Evaluar los servicios ambientales de los ecosistemas de la ciudad	Restaurar los ecosistemas de las ANP Crear corredores biológicos

Sector	Estrategias implementadas	Estrategias en progreso
Agricultura	• Preservar los bosques y mejorar las condiciones de vida de los agricultores con el Programa de Fondos Comunitarios para el Desarrollo Rural Equitativo y Sustentable (FOCOMDES) • Reforestar con especies nativas y rotar cultivos • Recuperar las plantas nativas, particularmente el maíz nativo • Mejorar el desarrollo rural, así como la conservación del suelo y del agua en las tierras de cultivo • Promover la recuperación de los suelos en las zonas rurales	• Diversificar las actividades rurales con el Programa Integral de Empleo y Producción Sustentable (PIEPS) • Implementar tecnología de riego para el ahorro de energía y agua (e.g., infraestructura de riego por goteo) • Apoyar la cosecha de cultivos destinados a los biocombustibles • Reducir la ganadería extensiva • Colectar el agua de lluvia para su reutilización en el riego • Promover la agricultura orgánica para reducir el uso de fertilizantes
Bosque	• Reforestar las áreas verdes urbanas • Implementar programas para un manejo forestal sustentable que eviten la tala ilegal y los incendios forestales • Implementar el FACC para financiar proyectos forestales • Evaluar los servicios ambientales que prestan los bosques • Evitar asentamientos irregulares en las barrancas urbanas • Monitorear los incendios forestales en tiempo real con teledetección	Reforestar con 2 millones de árboles/año Promover la silvicultura Recuperar las zonas lacustres, construir parques urbanos y conservar el germoplasma del maíz nativo Recuperar las zonas de alto valor ambiental, desalojando a las personas que viven en asentamientos irregulares Implementar un mercado de bonos de carbono

Sector	Estrategias implementadas	Estrategias en progreso
Transporte	• Reducir el número de vehículos mediante la ampliación del programa Hoy No Circula los días sábado • Promover la movilidad no motorizada con la construcción de infraestructura para bicicletas • Reemplazar 5,000 unidades antiguas de transporte público por unidades menos contaminantes y con mayor capacidad • Reemplazar 75,000 vehículos de combustión interna que funcionan como taxis por vehículos eléctricos y de mayor capacidad • Ampliar el Sistema de Monitoreo Atmosférico • Implementar Programas de Transporte Escolar (PTE) para reducir el tráfico y las emisiones en zonas cercanas a las escuelas • Construir 10 corredores de Metrobus para transportar 500 mil usuarios al día. Las obras se estiman en 620 millones de pesos.	• Ampliar la infraestructura ciclista en 20 km² para servir a 78,000 usuarios • Capacitar a los ejecutivos para utilizar las bicicletas como medio de transporte • Construir el Ecobus (transporte público) para transportar 150,000 personas al día • Construir nuevas líneas de Metrobus y una nueva línea del Metro para transportar 437,000 pasajeros al día • Establecer paradas de autobuses exclusivas en 10 de los corredores más importantes de la ciudad • Mejorar las carreteras para evitar el tráfico en las zonas en conflicto • Evaluar las emisiones de vehículos por medio de la teledetección • Ampliar el PTE a todas las escuelas primarias de la ciudad • Promover la investigación en materia de eficiencia energética
Energía	• Reducir las emisiones de GEI en 5.7 millones de toneladas entre 2008-2011 • Mejorar los pronósticos hidrometeorológicos • Reemplazar 6,000 luminarias por lámparas ahorradoras de energía • Reducir en 11% la electricidad consumida por el Metro • Aumentar el número de techos verdes	• Construir un sistema que promueva la captura, extracción y quema del biogás generado en el Bordo Poniente • Promover el calentamiento de agua con energía solar en hospitales y edificios gubernamentales • Registrar las emisiones de GEI en la ciudad y publicar informes, ya que actualmente los inventarios disponibles son para la ZMCM • Desarrollar fuentes alternativas de energía

Fuente: SMA, 2008a, 2008b, 2008c, 2009a, 2009b y 2012.

Algunas de las estrategias de adaptación promovidas por el PECC para su ejecución a nivel nacional todavía no son parte de las medidas de adaptación en la ciudad, aunque se espera que pronto lo sean. Entre estas acciones se destacan:

1. Incorporar información sobre el clima en la gestión del agua, la agricultura, la biodiversidad y las decisiones de planeación y operación del sector energético;
2. Promover el uso de seguros para cosechas y contra eventos hidrometeorológicos extremos e inundaciones;
3. Analizar especies invasoras y plagas en el ecosistema de la ciudad;
4. Establecer multas y/o sanciones para los contaminadores de las aguas superficiales y subterráneas;
5. Recuperar cuerpos de agua contaminados; la modificación de los códigos de construcción para evitar que los desarrollos inmobiliarios y los asentamientos irregulares no sean permitidos ni regularizados si se encuentran en Áreas Naturales Protegidas (ANP);
6. Mejorar los sistemas de alerta temprana para el diagnóstico de la sequía;
7. Favorecer el uso de cultivos resistentes al cambio climático;
8. Gestionar las fronteras agrícolas y urbanas para evitar la deforestación y la degradación forestal;
9. Estudiar los impactos del cambio climático en la salud de las personas y en la biodiversidad;
10. Promover la conservación del germoplasma de las especies amenazadas;
11. Reducir la movilidad de vehículos y personas en la ciudad; y
12. Modificar los hábitos de consumo de energía de las personas.

AVANCES Y RETOS EN LA M&A AL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CIUDAD DE MÉXICO

En 2008, la Ciudad de México produjo 29.77 MtCO₂e, lo que representa 4.18% del total de las emisiones nacionales que ascienden a 711.6 MtCO₂e (Sosa-Rodríguez, 2013c). La baja contribución de la ciudad al total de las emisiones nacionales se atribuye a la ausencia de la industria petroquímica en su territorio (uno de los principales generadores de emisiones en todo el país), además de la descentralización de la industria y la concentración de los servicios.

La mayoría de las emisiones en la ciudad fueron generadas por el sector transporte (47.08% del total), seguido de la industria (27.21%), los residuos (14.28%), la vivienda (6.37%), el comercio (3.44%), el gobierno (1.01%), el cambio de uso de suelo y la silvicultura (0.51%) y la agricultura (0.10%). La M&A en la ciudad ha tenido resultados positivos, con una reducción de las emisiones totales de GEI entre 2000 y 2008 de 3.76 MtCO₂e. Esto se explica por un consumo más eficiente de la energía en todos los sectores, el uso de fuentes de energía menos contaminantes como el gas natural y la energía solar (e.g., calentadores solares de agua y alumbrado público), y la introducción de sistemas de transporte más limpios y de alta capacidad (e.g., el Metro, Metrobús y Ecobús).

Otros avances incluyen la sustitución de viejos vehículos de transporte público con nuevos modelos que son menos contaminantes y de mayor capacidad, la mejora de los sistemas de bombeo para el suministro de agua, la rehabilitación de la red de agua de la ciudad para reducir las pérdidas de agua, la instalación de dispositivos ahorradores de agua y energía en las viviendas y edificios, y la reducción de la movilidad no motorizada por medio de la construcción de ciclovías.

Se espera que la infraestructura en curso para mejorar la captura de biogás, el sistema de transporte público, la producción de composta y el tratamiento de aguas residuales reduzca las emisiones de GEI en al menos 7 MtCO₂e, cumpliéndose con los objetivos planteados en el PACL.

Las medidas de mitigación, junto con el Programa de Mejora de la Calidad del Aire (PROAIRE II), han favorecido la reducción de emisiones en todos los sectores, a excepción del sector de los residuos y la industria, cuyas emisiones totales y relativas aumentaron en el periodo 2000-2008 (SMA, 2011). El incremento de las emisiones en el sector residuos se explica por el crecimiento demográfico y el mayor consumo de bienes y servicios. Para la industria, este problema se relaciona con las mejoras en la contabilidad de las emisiones más que con un aumento real de la generación de emisiones. Esto se puede verificar en la reducción del consumo de energía de este sector (Sosa-Rodríguez, 2013a). La mayoría de estas emisiones fueron generadas por la industria química (38%), la industria de alimentos y bebidas (21%) y la industria de maquinaria y transporte (17%); el 23% restante correspondió a la industria del metal, papel, la textil y la maderera.

En el caso del sector del transporte, debido a que la flota total de vehículos aumentó de 861,000 a 2.91 millones de unidades, las mejoras en materia de eficiencia energética, los combustibles más limpios y la introducción de vehículos híbridos en el mercado mexicano, no se han traducido en una reducción de emisiones más significativas (Sosa-Rodríguez, 2013a).

Para los sectores residenciales y comerciales, el uso de equipos ahorradores de energía ha disminuido las emisiones totales y relativas de estos sectores; en particular, el sector de la vivienda ha reducido su consumo de energía por el uso más intensivo del gas natural en sustitución del gas LP y el uso de tecnología ahorradora de energía en los electrodomésticos (SENER, 2003, 2004). En general, las mejoras en materia de eficiencia energética han reducido con éxito el consumo de este recurso de 342.54 a 328.72 PJ en el período de 2000 a 2008 (Sosa-Rodríguez, 2013a).

Todos los sectores redujeron su consumo de energía, a excepción del sector del transporte en el que se registró un aumento de 7.35%, como consecuencia del crecimiento en el número de vehículos en un

237.98% en el mismo período. El ahorro de energía del sector comercial (una reducción de 46.27%) y la industria (en 26.23%) proporcionan evidencia que la transferencia de tecnología a través de los Mecanismos de Desarrollo Limpio (MDL) han promovido la mitigación de la ciudad.

La Tabla 2 muestra la evolución de las emisiones de GEI y el consumo de energía por sector entre 2000 a 2008.

Tabla 2. Emisiones totales de GEI y consumo de energía en la Ciudad de México, 2000-2008

Sector	2000				2008				Crecimiento del Consumo de energía 2000-2008	Crecimiento de las emisiones 2000-2008
	Consumo de energía (PJ)	%	Emisiones GEI (MtCO ₂ e)	%	Consumo de energía (PJ)	%	Emisiones GEI (MtCO ₂ e)	%		
Transporte*	209.2	61.1	15.1	45.2	224.5	68.3	14.0	47.1	7.4	-7.5
Industria	62.8	18.3	7.3	21.8	46.3	14.1	8.1	27.2	-26.2	11.1
Vivienda	47.4	13.8	4.5	13.4	43.7	13.3	1.9	6.4	-7.8	-57.6
Comercio/ Servicios	18.1	5.3	2.0	5.9	9.5	2.9	1.0	3.4	-47.2	-48.5
Agricultura	0.5	0.2	0.0	0.1	0.4	0.1	0.0	0.1	-19.6	4.0
Residuos	NA	0.0	3.6	10.7	NA	NA	4.3	14.3	NA	18.5
Público	4.6	1.3	0.8	2.5	4.2	1.3	0.3	1.0	-8.9	-64.0
Cambio de uso de suelo, silvicultura	NA	0.0	0.2	0.5	NA	NA	0.2	0.5	NA	-10.2
Total	342.5	100.0	33.5	100.0	328.7	100.0	29.8	100.0		

* Incluye el metro y los sistemas de transporte de electricidad

* ND: No disponible

Fuente: SMA 2008a, 2008b, 2008c, 2009a, 2009b y 2012.

Desafortunadamente, las emisiones de la industria afectan principalmente a los grupos más desfavorecidos que están situados cerca de las plantas de producción, debido a las bajas rentas y precios de la tierra. Un patrón similar de distribución se identifica en la ubicación de las instalaciones de residuos. Para el sector transporte, las emisiones están relacionadas con la movilidad de la población y las actividades económicas, por lo tanto, si las personas deben conducir largas distancias para trabajar, estudiar y disfrutar de las amenidades, será difícil reducir significativamente las emisiones de este sector y mejorar la calidad del aire. En consecuencia, las autoridades de la ciudad tienen que descentralizar las actividades económicas, escuelas, hospitales y otras infraestructuras, además de promover un mayor uso del transporte público por medio de su mejora en términos de calidad y eficiencia.

Debido a la falta de accesibilidad y confort del transporte público, los habitantes de la ciudad dependen en gran medida de los vehículos particulares: aproximadamente 29.50% de la flota total de vehículos en la ciudad son modelos anteriores a 1990 y no cuentan con sistemas de control de emisiones (SMA, 2008b). Se espera que los esfuerzos por reemplazar la flota de vehículos por modelos nuevos y de mayor capacidad, tenga un impacto positivo en la reducción de las emisiones.

Por lo pronto, el programa PROAIRE II, ha sido uno de los programas más importantes de la última década, ya que sus acciones han reducido la concentración de contaminantes criterios, algunos de los cuales también son GEI. Por ejemplo, entre 1990 y 2008, las emisiones de CO y NO_x se redujeron en un 79.38% (de 3.78 a 0.78 millones de toneladas/año) y 44.63% (de 184.48 a 102.140 toneladas/año), respectivamente (SMA, 2008b). Estas reducciones se atribuyen principalmente a la mejora del combustible, y al uso de tecnología menos contaminante en la industria y el transporte. Adicionalmente, las industrias más contaminantes fueron trasladadas fuera de la ciudad (e.g., la Refinería 18 de Marzo localizada en la Delegación Azcapotzalco) y los combustibles altamente contaminantes fueron prohibidos.

A pesar de los esfuerzos de las autoridades para publicar inventarios de emisiones de GEI, la información proporcionada en estos documentos no está completa y se encuentra estructurada de una manera compleja. Al igual que en los inventarios nacionales, se subestiman las emisiones provenientes del cambio de uso de la tierra y silvicultura, debido a la falta de inventarios fiables de áreas verdes y bosques, a los problemas de escala en la información cartográfica que no tienen en cuenta la degradación de estos ecosistemas y a la escasa relevancia atribuida por las autoridades para preservar los bosques y áreas verdes de la ciudad. Con base en estos inventarios, los cambios en el uso del suelo y la silvicultura han tenido un impacto mínimo en las emisiones totales de la ciudad.

Sin embargo, las áreas de conservación de la ciudad representan una extensión de más de la mitad de su territorio (59% del total), por lo que podrían proporcionar importantes beneficios para mejorar la adaptación al cambio climático. Por desgracia, los bosques de la ciudad y las zonas verdes, al igual que sus equivalentes nacionales, son emisores netos. La degradación de estos ecosistemas es causada principalmente por el crecimiento de los asentamientos urbanos formales e informales. Por consiguiente, aunque los bosques y áreas de conservación se encuentran regulados, la explotación ilegal y los asentamientos humanos irregulares se siguen permitiendo en vez de sancionarse. Esto pone de relieve la necesidad de reforzar la aplicación de las leyes de zonificación y uso de la tierra.

Los avances en materia de adaptación incluyen la creación del Programa de Contingencia Climatológica para ayudar a los agricultores en situaciones de eventos climáticos extremos; el Programa de Protección del Maíz Nativo; el Programa de Recuperación de Suelos Rurales, y el Programa de Prevención de Incendios Forestales, todos ellos implementados en 2008. En el mismo año, otras acciones para apoyar la preservación de los servicios ambientales en áreas agrícolas marginales incluyen la construcción de terrazas, presas, barreras verdes, abonos verdes y zanjas de infiltración.

Las autoridades de la ciudad también están regulando las semillas transgénicas, la recuperación de los cultivos de hierbas nativas, y la promoción de la agricultura orgánica y urbana, además de la organización de brigadas durante la estación fría y lluviosa para ayudar a los grupos más vulnerables, proporcionándoles atención médica, alimentos y refugio (SMA, 2009a, 2009b y 2012). Ya que los grupos marginados se ven obligados a ubicarse en zonas de alto riesgo que a menudo carecen de acceso a los servicios básicos que los hacen más vulnerables a los riesgos climáticos, una estrategia esencial para hacer frente al cambio climático es la reducción de la pobreza. Lamentablemente, los aumentos de temperatura, inundaciones, sequías y brotes de enfermedades afectarán principalmente a estos grupos.

Cabe destacar que entre los principales obstáculos que han limitado el éxito de la M&A en la Ciudad de México destacan:

- 1) La falta de participación y concientización de la sociedad sobre el cambio climático;
- 2) El desconocimiento sobre las causas y consecuencias de este fenómeno, así como de las medidas que pueden reducir sus impactos y la generación de GEI;
- 3) Los malentendidos acerca de los objetivos, procesos y resultados de estas acciones entre las agencias gubernamentales; y
- 4) La falta de coordinación y colaboración entre diversos sectores (e.g., gubernamentales, económicos, sociales y académicos).

Varios de estos problemas han dado lugar a una mala coordinación y colaboración entre los diferentes sectores para hacer frente a los impactos del cambio climático. De hecho, diversos niveles de gobierno se han negado a asignar recursos para reducir la vulnerabilidad sectorial y local ante el cambio climático. Finalmente, la ilegalidad y corrupción se interponen para realizar una M&A eficaz.

CONCLUSIONES

El cambio climático es uno de los mayores desafíos que enfrenta la Ciudad de México. Sin embargo, también representa una oportunidad para promover un desarrollo más sustentable si se amplía y/o fortalecen sus capacidades de M&A. Existen evidencias que la temperatura y precipitación en la ciudad está cambiando, incrementándose los riesgos a que ésta sea afectada por inundaciones, sequías, olas de calor, falta de agua y brotes por enfermedades de origen hídrico, entre otros. Por ello, se requiere más investigación para mejorar la comprensión actual de los impactos del cambio climático en la ciudad.

Hasta el momento, existen importantes avances en materia de M&A entre los que destacan las acciones emprendidas para promover la construcción de sistemas limpios de transporte, el desarrollo de energías alternativas y las mejoras de los sistemas de alerta temprana. Otras acciones que complementan estos esfuerzos son las reducciones en el consumo de energía, la mejora en la gestión de los residuos y la reforestación. En este sentido, la mitigación es una prioridad para todos los niveles de gobierno, pero dada la falta de recursos financieros y humanos para el desarrollo de tecnologías que reduzcan las emisiones de GEI y debido a la irreversibilidad de algunos de los impactos del cambio climático, la adaptación está recibiendo una mayor atención.

Desafortunadamente, los impactos del cambio climático afectarán principalmente a los grupos más marginados, siendo fundamental que se ajuste la política para apoyar no sólo la M&A sino también el desarrollo, teniendo en cuenta las diferencias en las capacidades, los niveles de exposición y la vulnerabilidad de los diversos grupos y sectores para que esta sea exitosa.

Sin embargo, un requisito para que la M&A sea exitosa es la regulación eficaz del uso del suelo de la ciudad para evitar un crecimiento demográfico y urbano acelerado, que supere la capacidad de carga del medio ambiente. Por consiguiente, si el desarrollo urbano en la ciudad

y su zona conurbada sigue permitiendo el crecimiento de los asentamientos irregulares en áreas naturales protegidas o de alto valor ambiental, la política del cambio climático será insuficiente para desarrollar las capacidades de M&A. Adicionalmente, no se aprovecharán los servicios ambientales proporcionados por los bosques de la ciudad, los cuales seguirán siendo emisores netos de carbono en vez de sumideros.

Dada la limitación de los recursos humanos, financieros y tecnológicos, la integración de las estrategias y programas existentes que contribuyan a hacer frente al cambio climático podrían favorecer a reducir los costos y aumentar la eficacia de las respuestas gubernamentales.

La participación activa e informada de la sociedad debe ser promovida para crear y fortalecer las capacidades de M&A en la ciudad, teniendo en cuenta el lenguaje, la forma y los medios más eficaces para informar tanto a los tomadores de decisiones como a la sociedad sobre los impactos del cambio climático, sus niveles de vulnerabilidad y las acciones que se pueden implementar para hacer frente a este fenómeno. Hasta el momento, el cambio climático sigue siendo un problema restringido a las élites políticas, económicas e intelectuales en el país, sin incorporar al resto de la sociedad de manera efectiva.

El éxito de las estrategias de mitigación de la Ciudad de México se explica principalmente por las acciones emprendidas en el sector del transporte para promover sistemas de transporte no contaminantes y el transporte no motorizado.

Otras acciones que complementan este esfuerzo son la reducción del consumo de energía y la mejora en la eficiencia energética. Los modestos impactos que las energías renovables y las estrategias para incrementar la eficiencia energética tienen sobre la reducción de emisiones ponen de relieve la necesidad de promover un mayor conocimiento y transferencia de tecnología a través de proyectos de MDL.

Finalmente (1) se necesitan desarrollar capacidades técnicas para el desarrollo de escenarios climáticos regionales y locales; (2) mejorar y actualizar los equipos utilizados para la medición de las varia-

bles climáticas; (3) promover el diseño y construcción de tecnología mexicana para la teledetección; y (4) producir información estadística y cartográfica confiable sobre variables ambientales y climáticas que apoyen la investigación de los impactos del cambio climático en diversos sectores. También es fundamental desarrollar mecanismos claros de evaluación que permitan conocer los avances de la política de cambio climático tanto en la Ciudad de México como en el país. Evidentemente, el combate contra este fenómeno no es una tarea fácil, por lo que se requiere la participación y colaboración de todos los sectores.

BIBLIOGRAFÍA

- Bates B.C., Kundzewicz Z.W., Wu S., Palutikof, J.P. (2008). *Climate Change and Water*. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Ginebra, Suiza: IPCC, Cambridge University Press.
- Delgado M. (2012). Water, Energy and Food Security in Mexico City. En K. Otto-Zimmermann (Ed.). *Resilient Cities 2. Local Sustainability. Part III Toward the Resilient City* (pp. 105-111). Cities and Adaptation to Climate Change—Proceedings of the Global Forum 2011. Volume 2. Netherlands: Springer.
- DOF (Diario Oficial de la Federación) (2012). *Ley General de Cambio Climático*. México: Congreso General de los Estados Unidos Mexicanos (CGEUM).
- GIECC (2013). *Cambio climático 2013, Bases físicas*. Grupo de trabajo I del IPCC. nd: OMM-PNUMA.
- Gobierno de la República (2014). *Programa Especial de Cambio Climático 2014-2018 (PECC)*. México: PND.
- IPCC (2007a). Summary for Policymakers. En S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor & H.L. Miller (Eds.), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis* (pp. 1-7). Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press.
- IPCC (2007b). Summary for Policymakers. En M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden, & C.E. Hanson (Eds.). *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability* (pp. 7-22). Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- OMM (2015). *OMM confirma que 2016 es el año mas caluroso*. OMM.

- Disponible en línea en: <https://public.wmo.int/es/media/comunicados-de-prensa/la-organizaci%C3%B3n-meteorol%C3%B3gica-mundial-confirma-que-2016-es-el-a%C3%B1o-m%C3%A1s>
- SEMARNAT (2011). *Programa para Mejorar la Calidad del Aire en el Valle de México, PROAIRE III, 2011—2020*. México: GDF/SEMARNAT/SS/GEM.
- SENER (2004). *Prospectiva del mercado de gas licuado de petróleo 2004-2013*. México: SENER.
- (2003). *Prospectiva del sector eléctrico 2003-2012*. México: Secretaría de Energía.
- SMA (2012). *Informe de Avances 2011. Programa de Acción Climática de la Ciudad de México 2008-2012*. México: SMA-GDF.
- (2011). *Programa para Mejorar la Calidad del Aire en el Valle de México, PROAIRE III, 2011-2020*. México: SMA.
- (2009a). *Avances reportados con respecto a las acciones del Programa de Acción Climática*. México: SMA-GDF.
- (2009b). *Avances en el Plan Verde de la Ciudad de México*. México: SMA-GDF.
- (2008a). *Programa de Acción Climática de la Ciudad de México, 2008-2012*. México: SMA-GDF.
- (2008b). *Inventario de emisiones de contaminantes criterio de la ZMVM, 2008*. México: SMA-GDF.
- (2008c). *Inventario de emisiones de gases de efecto invernadero de la ZMVM, 2008*. México: SMA-GDF.
- SMA (2002). *Programa para la Calidad del Aire en el Área Metropolitana de la Ciudad de México, 2002-2010*. México: SMA.
- Sosa-Rodríguez F.S. (2013a). El futuro de la disponibilidad del agua en México y las medidas de adaptación utilizadas en el contexto internacional. *Revista Internacional de Ciencias Sociales y Humanidades. SocioTam* (pp. 165-188). XXII. N.2 (Jul-Dic 2012).

- Sosa-Rodríguez F.S. (2013b). From Federal to City Mitigation and Adaptation: Climate Change Policy in Mexico City. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change Journal* (pp. 969-996). Springer Netherlands. Vol 19.
- Sosa-Rodríguez F.S. (2013c). La política del cambio climático en México: avances, obstáculos y retos. *Revista Internacional de Estadística y Geografía* (pp. 4-23). Vol. 6, Núm. 2, mayo-agosto de 2015.
- Sosa-Rodríguez F.S. (2012). Assessing water quality in the developing world: an index for Mexico City. En K. Voudouris & D. Voutsas (Comp.). *Water Quality Monitoring and Assessment* (pp. 495-508). Croacia: InTech.
- Sosa-Rodríguez F.S. (2010a). Impacts of Water-management Decisions on the Survival of a City: From Ancient Tenochtitlan to Modern Mexico City. *Water Resources Development* (pp. 675-687), 26 (2010).
- Sosa-Rodríguez F.S. (2010b). Exploring the risks of ineffective water supply and sewage disposal: A case study of Mexico City. *Environmental Hazards* (pp. 135-146), 9 (2010).
- Vorosmarty C.J. (2000). Global Water Resources: Vulnerability from Climate Change and Population Growth. *Science* (pp. 284-288), 289 (2000).
- Weiss J., Overpeck J. (2012). *Maps of areas susceptible to sea level rise. Arizona*. USA: Environmental Studies Laboratory, Department of Geosciences, University of Arizona.

CAPÍTULO 2

La dimensión institucional de los gobiernos locales en la adaptación al cambio climático

Angélica, Rosas-Huerta⁴

INTRODUCCIÓN

Las ciudades son sistemas dinámicos que contribuyen substancialmente con el cambio climático y que enfrentan, responden y se adaptan a impactos climáticos particulares. También son parte importante de la solución, ya que tienen responsabilidades sobre sectores urbanos como el ordenamiento territorial, el transporte y la gestión de residuos, de los recursos naturales y de los recursos hídricos. Su actuación, en particular, en los procesos de adaptación se puede ver limitada por su propia capacidad institucional. Los objetivos, las acciones y los resultados dependen, entre otros aspectos, de las organizaciones gubernamentales, de sus atribuciones y funciones, de sus relaciones intergubernamentales, de la comunicación, cooperación, colaboración y coordinación que se establezca entre las organizaciones, de los recursos económicos, del personal, entre otros.

Este trabajo busca reflexionar en torno a la importancia que tiene la capacidad institucional de los gobiernos locales en el diseño e implementación de mecanismos de respuesta ante los efectos del cambio climático, así como identificar las dimensiones que sirven de base la construcción o desarrollo de dicha capacidad.

⁴ Profesora-investigadora del Departamento de Política y Cultura, UAM-Xochimilco..

LAS CIUDADES Y EL CAMBIO CLIMÁTICO

Las ciudades contribuyen substancialmente con la alteración del sistema climático, estos centros urbanos consumen aproximadamente entre el 60% y 80% de la energía producida globalmente y son responsables de un porcentaje similar de las emisiones de CO₂ del mundo (Kamal-Chaoui, 2009). A nivel mundial, se estima que estas ciudades generan cerca del 67% de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) provenientes del consumo energético (Sánchez, 2013). A nivel nacional, varía según el país, por ejemplo, en los Ángeles se emiten 234 millones de toneladas de CO₂ al año mientras que la Ciudad de México contribuye con 64.8 millones de toneladas por año. Si analizamos las emisiones *per cápita* se tiene que cada ciudadano de Los Ángeles emite un promedio de 15.6 toneladas de CO₂ al año en comparación con los de la Ciudad de México que emiten 3.6 toneladas (Collins, 2006 y SMA, 2004).

De acuerdo con el Consejo Internacional para las Iniciativas Ambientales Locales (ICLEI) en una ciudad mediana, el gobierno es responsable hasta por el 10% de las emisiones totales, lo que significa que es el mayor emisor individual (ICLEI, 2004). Eso se debe a que estos centros urbanos se caracterizan, además de lo expuesto anteriormente, por sus altos niveles de concentración demográfica, industrias e infraestructura; por ejemplo, más de la mitad de la población mundial vive en áreas urbanas (54%) y se espera que la población urbana mundial crezca aproximadamente un 1.84% por año entre 2015 y 2020, 1.63% por año entre 2020 y 2025 y el 1.44% por año entre 2025 y 2030 (WHO, 2017).

También, las ciudades se enfrentan a impactos actuales y futuros provocados por el cambio del clima y el aumento de su variabilidad que ponen en riesgo el bienestar de sus poblaciones. Actualmente las ciudades de América Latina han sufrido temperaturas extremadamente altas, posiblemente a consecuencia del cambio de la cobertura

de la tierra por la expansión agrícola regional, que ha alterado el equilibrio energético entre la tierra y la atmósfera. También se encuentran los desastres hidrometeorológicos que ponen en riesgo el desarrollo y la calidad de vida en las ciudades (World Wildlife Fund, 2017). En el caso del oeste de América Latina, el fenómeno climático de El Niño provoca un déficit de precipitaciones y una mayor frecuencia de incendios, mientras que bajo los efectos de La Niña se incrementan las lluvias, las inundaciones y los deslizamientos de tierra. En cambio, en el sudoeste del continente el aumento de la frecuencia e intensidad de las precipitaciones asociadas con las “sudestadas” provoca inundaciones desastrosas (Sánchez, 2013).

ALGUNOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN MÉXICO

En el caso de México, existen estudios que afirman que nuestro país es especialmente vulnerable a eventos climáticos extremos, en particular a huracanes, inundaciones y sequías (SEMARNAT, 2012, UACH-UNAM, 2014). De acuerdo con científicos de la Universidad Nacional Autónoma de México, los únicos estados de la República Mexicana que han mantenido estables sus temperaturas son Nayarit, Colima, Michoacán y Jalisco; mientras que el resto del territorio mexicano, particularmente el área del lado del océano Atlántico y el norte del país, se ha calentado más rápidamente (*La Jornada*, 2009), provocando sequías atípicas que han representado un riesgo para la seguridad alimentaria, dado que en esta zona se concentran las principales zonas productoras agrícolas y ganaderas. También se han registrado cambios en la frecuencia de ocurrencia de huracanes y que representan grandes pérdidas económicas y humanas, es el caso de los fenómenos Emily, Stan y Wilma en 2005.

Entre 1970 y 2009 se ha registrado un incremento especial de huracanes de categorías 3, 4 y 5 en el Golfo de México y el Mar Caribe.

Otros eventos hidrometeorológicos, como inundaciones graves, han ido en aumento; un ejemplo de ello es la registrada en el estado de Tabasco en el año 2007.⁵ Con respecto a la Ciudad de México se han registrado incrementos de temperatura, de acuerdo a la estación meteorológica de Tacubaya la temperatura anual media ha pasado de 14°C a 18°C en cien años. También se ha presentado un aumento significativo en los años recientes de la precipitación pluvial anual acumulada y del número de eventos extremos de precipitaciones mayores a 30 milímetros por día (Nájera M., 2014). De acuerdo a ciertos estudios, en el 2050 se proyectan cambios en las precipitaciones promedio entre -15% y +15% y se esperan mayores aumentos en los desastres vinculados a inundaciones, sequías y otras amenazas hidrometeorológicas (Krellenberg, 2013).

LA DIMENSIÓN INSTITUCIONAL

Si bien las ciudades son parte de la problemática que supone el cambio climático, también son parte importante de la solución (UN-Habitat, 2011). Las ciudades son las que responden a los impactos del cambio climático y se adaptan a él; son las que pueden desarrollar una gestión y prevención del riesgo de desastres. Esta respuesta se puede ver permeada por múltiples factores, es el caso de la urbanización, el crecimiento de los asentamientos informales, niveles de pobreza, tipo de infraestructura. También por el papel de las autoridades locales, ya que “se ocupan de la creación, el funcionamiento y el mantenimiento de la infraestructura económica, social y ecológica, supervisan los procesos de planificación, establecen las políticas y reglamentaciones ecológicas locales y contribuyen a la ejecución de las políticas ambientales en los planos nacional y subnacional” (Naciones Unidas, 1992a). Ade-

⁵ Las inundaciones de Tabasco representan el desastre histórico más costoso del país, después del sismo de 1985. *Ibid.*:39.

más, porque tienen responsabilidades sobre sectores urbanos como el ordenamiento territorial, el transporte y la gestión de residuos, de los recursos naturales y de los recursos hídricos.

Los centros urbanos pueden elaborar estrategias orientadas a enfrentar el cambio climático de acuerdo a sus condiciones geográficas, climáticas, económicas y culturales. También son capaces de desarrollar soluciones políticas innovadoras que pueden ser ampliadas en los programas regionales o nacionales (Kamal-Chaoui *et al.*, 2009).

Frente a ello, es importante dar prioridad al apoyo y el fortalecimiento de las capacidades institucionales de los gobiernos locales, haciendo hincapié en las acciones orientadas a prevenir y disminuir el riesgo de regiones, grupos sociales o sectores económicos ante anomalías climáticas.⁶

Los objetivos, las acciones y los resultados dependen, entre otros aspectos, de organizaciones gubernamentales que cuenten con adecuadas capacidades humanas, técnicas y de gestión de las diferentes tareas relacionadas con la mitigación y adaptación climáticas. Hay que recordar que la mayoría de las ciudades de América Latina enfrentan escasez de recursos humanos, técnicos y económicos para controlar y eventualmente solucionar una multiplicidad de problemas. En particular, existe una escasez o ausencia de recursos financieros por parte del gobierno o del sector privado para atender asuntos relacionados con el ambiente (Yafee *et al.*, 1996 citado en Chávez, 2004).

Existen estudios referidos a la adaptación que dan evidencia de la importancia que tiene la dimensión institucional en la planeación e

6 Capacidad institucional entendida como la habilidad de las instancias gubernamentales de mejorar el desempeño de las funciones, de resolver problemas y especificar y lograr objetivos; así como de movilizar y/o adaptar sus instituciones para dar respuesta a nuevos problemas públicos, como es el caso del cambio climático. Estas instancias se encuentran inmersas en un entorno institucional con varios niveles, actores sociales y políticos con influencias, y con importantes interdependencias entre ellos (Rosas, 2015).

implementación de políticas y programas orientados a la adaptación al cambio climático (ver Mimura *et al.*, 2014). Gran parte de ellos se han centrado en identificar factores, obstáculos o barreras institucionales de los gobiernos nacionales, subnacionales y locales que pueden incidir en la definición inicial del problema (diagnóstico), la incorporación del problema en la agenda de gobierno, la planificación, toma de decisión, implementación, monitoreo y evaluación de acciones orientadas a la adaptación. Es el caso de los recursos humanos, el liderazgo que pueda tener algún actor clave, la cooperación y coordinación institucional multinivel entre los distintos niveles políticos y administrativos, la participación entre las agencias gubernamentales y administrativas y actores sociales y privados (Moser y Ekstrom, 2010; Measham *et al.*, 2011; Mimura *et al.*, 2014; Romero *et al.*, 2013 a y b; Sánchez, 2013; y Peach *et al.*, 2010). Precisamente este trabajo busca abonar a dicho análisis, se busca reflexionar en torno a las dimensiones institucionales que permiten el desarrollo de las relaciones de los factores institucionales que están presentes en el quehacer de aquellos gobiernos locales que buscan una adaptación al cambio climático. Factores que están presentes en el interior del gobierno (el individuo y la organización); así como de aquellos que se establecen con la vinculación con su entorno (contexto institucional),

En el nivel del individuo se destaca el número, variedad y cargos de funcionarios; reclutamiento, promoción, ascenso, salarios y escalafón; formación/capacitación de los recursos humanos; sistema de premios y castigos; capacidad individual de los actores responsables de tareas, en términos de información, motivación, conocimiento/compreensión y destrezas requeridas para la realización de tareas; entre otros (Evans, 1996; Alonso, 2001; Tobelem, 1992; Adger *et al.*, 2005).

En cuanto a la organización se hace referencia a la disponibilidad de recursos financieros necesarios para la realización de tareas previstas; responsabilidades, propósitos y funciones de la organización; forma de organización; autoridad jurídica para hacer que otras ins-

tituciones acaten sus programas; sistemas de gestión para mejorar el desempeño de tareas y funciones específicas; relación, coordinación y colaboración intergubernamental; tipo y características de las políticas y programas que diseñan e implementan; leyes, normas y, en general, “reglas del juego” que gobiernan las relaciones entre los actores involucrados, entre otros (Measham *et al.*, 2011, Oszlak, 1995; Willems y Baumert, 2003; Willems, 2004).

En el contexto institucional se ubican aquellos factores que se desarrollan a partir de la relación de actores políticos entre sí, pero también con aquellos individuos y grupos que luchan por involucrarse activamente en determinados campos de la esfera pública (Repetto, 2003; Coppedge, 2001; Adger *et al.*, 2005). La participación, negociación, voluntad política, lucha de poder, transparencia en la información, estabilidad y adaptabilidad de las instituciones públicas, control de la corrupción, son ejemplo de ellos.

Para el caso del problema público que nos ocupa, existen factores que son considerados como tradicionales, es decir, que están presentes en la habilidad que desarrollan los gobiernos locales para atender cualquier problema público. Es el caso de los recursos humanos y económicos, capacitación, responsabilidades a las autoridades, cooperación, coordinación, base institucional específica. Por otro lado, existen factores considerados como nuevos, aquellos que son desarrollados exclusivamente para la política de cambio climático, es el caso de: diseñar políticas coherentes, integradas y de largo plazo, posición gubernamental en torno al problema en las negociaciones internacionales y participación en dichas negociaciones, generación e intercambio de información pública, participación de los sectores involucrados en el diseño de políticas, reconocimiento del cambio climático como un problema público por parte de la sociedad (Willems, 2004 y Willems y Baumert, 2003).

Independientemente de cómo se clasifiquen, son factores que con frecuencia son los mismos para la capacidad de adaptación y mitigación (Yohe y Tol, 2002). Por ejemplo, el personal que un gobierno

de una ciudad puede dedicar a las acciones para combatir el cambio climático (una fuente de la capacidad de respuesta) está determinado, en gran parte, por el grado en que esas acciones pueden beneficiar tanto a las políticas de transporte, vivienda y ordenamiento territorial existentes, como a la posición económica y estratégica de la ciudad de que se trate (Romero, 2013 a y b).

Algunos de estos factores son más complejos que otros, y cada uno de ellos requieren de un análisis exhaustivo. Así queda reflejado en la diversidad de estudios que analizan la capacidad institucional del gobierno para enfrentar diversos problemas públicos (ver Rosas, 2013). Factores que se relacionan y determinan mutuamente. Cada uno de ellos posee por sí mismo un grado específico de injerencia en la habilidad desarrollada por los gobiernos, pero que ubicados en un plano integral se relacionan y se determinan mutuamente, dando origen a cierta capacidad institucional.

Desde el punto de vista sistémico, los factores se caracterizan, entre otros aspectos, por la existencia de múltiples interacciones e interdependencias entre ellos. Las conexiones que se exponen a continuación son ejemplo de ello:

- 1) La participación de la sociedad y el nivel de información que cuenta la sociedad. Por ejemplo, la participación de la sociedad en los asuntos del cambio climático se puede deber a lo informada que esté y al reconocimiento de su participación para atender el problema.
- 2) La participación de la sociedad y la actitud frente al problema. La participación de la sociedad en los asuntos del cambio climático está en relación con la actitud en cuanto al problema y al nivel no sólo de propuestas sino además de participación.
- 3) El diseño de acciones y el conocimiento, la investigación y la tecnología. Por ejemplo, las acciones integrales dependen del conocimiento de la realidad, así como del avance en la investigación y la tecnología que se posea.

- 4) Los recursos humanos y los recursos económicos: el número de personas dedicadas a la gestión y coordinación de las acciones enfocadas a la atención del cambio climático están en relación con los recursos económicos con los que cuenta dicha organización para contratar personal, o bien las oportunidades de formación (capacitación) para mejorar el talento intelectual del personal están en relación con los recursos económicos con los que se cuente o de la cooperación que reciba de otras instancias nacionales o internacionales.
- 5) La autoridad, los recursos económicos, humanos y al reconocimiento público: la ausencia de una organización gubernamental encargada de gestionar y coordinar las acciones del cambio climático se puede atribuir a los escasos recursos económicos o bien a la importancia que le da un gobierno al cambio climático. De igual forma, para que la organización ejerza su autoridad y asuma sus responsabilidades necesita de recursos tanto humanos como económicos. También la falta de un marco legal orientado al cambio climático o la limitada autoridad que puede tener una organización gubernamental se puede atribuir la importancia que un gobierno le otorgue al problema.
- 6) La cooperación, coordinación, autoridad y recursos humanos: el tipo de coordinación que se establece desde el nivel superior, el ejecutivo, hasta los niveles operativos de las organizaciones gubernamentales está en relación con la asignación de responsabilidades de las organizaciones gubernamentales. Del mismo modo, la coordinación intergubernamental e intersectorial se desarrolla a partir de la asignación de tareas y éstas a su vez dependen de las responsabilidades de cada organización; así como de la capacidad y liderazgo del personal.
- 7) La cooperación y la participación social: para que un gobierno enfrente efectivamente el problema del cambio climático

necesita el apoyo de la sociedad y las organizaciones no gubernamentales. La interacción entre diferentes organizaciones permite generar resultados que no pueden alcanzarse mediante el trabajo aislado.

- 8) La participación social y los recursos económicos: la participación de la sociedad en los asuntos del cambio climático se puede deber al monto de los recursos públicos asignados para la atención del cambio climático o bien a las limitadas acciones.

Se cuentan con múltiples interacciones entre los factores institucionales, sin embargo, existen dimensiones institucionales que sirven de base para la construcción o desarrollo de esas relaciones. Pero ¿cuáles son esas dimensiones? ¿cómo se definen? ¿qué características tienen? A partir de esas dimensiones ¿qué factores se relacionan?

Para identificar las dimensiones se realizó una revisión de algunos estudios que han analizado la dimensión institucional de aquellos gobiernos nacionales que atienden el cambio climático, así como de la literatura referida a la capacidad institucional y conceptos afines, así como aquella que tienen como objeto de estudio alguno de los factores institucionales seleccionados como los más importantes. Esta revisión permitió identificar, de manera preliminar, algunas relaciones entre factores institucionales, las cuales se validaron, modificaron y complementaron tomando en cuenta la opinión de 30 expertos en el tema. La recuperación de dicha opinión se dio a partir de la aplicación de un cuestionario a través de un ejercicio Delphi con dos circulaciones.⁷

⁷ En la primera circulación del cuestionario se les preguntó si están de acuerdo con las relaciones entre factores institucionales identificadas a través de la revisión de la literatura relevante, asimismo se les dio la oportunidad, en esa misma circulación de proponer otras relaciones. En una segunda circulación del cuestionario, los expertos volvieron a valorar aquellas relaciones que fueron identificadas a partir de la revisión bibliográfica, así como aquellas que algunos expertos propusieron en la primera circulación del cuestionario.

La información recuperada fue examinada a través del análisis de componentes principales. Esta herramienta matemática permitió identificar las principales construcciones fundamentales o dimensiones que se supone sirven de base para desarrollar las interrelaciones (correlaciones) entre los factores institucionales que inciden en la construcción y/o desarrollo de la capacidad institucional de gobiernos locales que atiende el problema del cambio climático.⁸

ARQUITECTURA INSTITUCIONAL

La primera dimensión institucional que se deriva de la primera matriz de correlación se decide denominarla como *prioridad gubernamental*, es decir, cuando una autoridad pública reconoce el problema del cambio climático como un asunto público, como objeto de su acción y actúa poniendo en marcha toda su maquinaria de información, análisis, concertación, legislación, movilización, operación de sus instrumentos, gestión, etc. Diferente de aquellos problemas que son reconocidos por la autoridad pública, pero ésta, en todo caso, es susceptible de desembocar en la no acción (Meny y Thoening, 1992); ya que como dice Luis Aguilar, no todo asunto es público, ni todo asunto público es prioritario o urgente (Aguilar, 2000).

8 Para identificar las dimensiones relevantes se realizaron dos matrices de correlación, una por cada circulación. De cada matriz se seleccionaron aquellas variables cuyas cargas factoriales fueran próximas a uno, sea ésta positiva o negativa (próximo a 1 o -1). Por otro lado, el número de dimensiones a buscar se definió en función del criterio de porcentaje de la varianza (lo que aporta cada una a la relación). Para este estudio, se utilizaron las primeras cinco dimensiones principales por cada matriz de correlación, ya que en ellas se explica el 71.3%% y 72.8% respectivamente de la varianza. Asimismo, se tomó en cuenta que, añadiendo una más, sólo se ganaba, para la primera matriz, un 8%; y para la segunda un 5%. Para el caso de la primera circulación: la primera variable explica el 20.3%, la segunda el 17.4%, la tercera el 13.6%, la cuarta y la quinta el 10.9% y 9.1%, respectivamente. Para la segunda circulación: la primera variable explica el 30.6%, la segunda el 20.9%, la tercera el 7.7%, la cuarta y quinta el 7.2% y el 6.4%, respectivamente.

Esta dimensión emerge de la relación inversa con dos grupos de variables que cuentan con las mayores cargas relevantes. El primer grupo está compuesto por la relación directa que se establece entre el marco legal y la importancia que el gobierno local le da al cambio climático como problema público; así como la vinculación que se establece entre la falta de un programa operativo anual y la ausencia de un presupuesto público, ambas variables con signo positivo. El segundo grupo lo compone la vinculación directa que se establece entre el número de personas dedicadas a atender el cambio climático y los recursos económicos con los que cuenta la organización para atenderlo, con signo negativo.⁹

Como se observa en esta dimensión resaltan seis aspectos: marco legal, importancia gubernamental, programa operativo anual, presupuesto público, número de personas dedicadas y recursos económicos; los cuales corresponden a tres de los factores institucionales que influyen en el desarrollo y/o construcción de la capacidad institucional: organización, recursos económicos y recursos humanos.

La relación de estos factores se desarrolla a partir de que el gobierno reconoce al cambio climático como un problema público y lo cataloga como un asunto que debe ser tratado seria y activamente, como objeto sobre el que se ha decidido actuar y lo coloca entre los

9 El que exista una relación directa entre variables que cuentan con el mismo signo indica que cuando una aumenta la otra también, o viceversa. Por otro lado, el que se cuenten con variables con signo diferente indica que las variables con signo diferente cambian en sentidos opuestos, es decir, mientras las variables con signo positivo aumentan, la variable con signo negativo disminuye. Por ello, cuando los expertos consultados están de acuerdo con la relación que se establece entre el marco legal y la importancia que el gobierno local le da al cambio climático como problema público; así como la vinculación que se establece entre la falta de un programa operativo anual y la ausencia de un presupuesto público; entonces disminuye la ocurrencia de acuerdo a la relación que se establece entre el número de personas dedicadas a atender el cambio climático y los recursos económicos con los que cuenta la organización para atenderlo.

asuntos prioritarios de su agenda. La prioridad gubernamental no solo propicia el desarrollo de los factores institucionales, por ejemplo, se establecerá un marco legal que regulará la actuación de las organizaciones sobre el problema, se asignarán recursos económicos para llevar a cabo acciones, se asignará personal para gestionar el problema, entre otros; sino también desencadena una diversidad de relaciones entre los distintos factores desarrollados. Es el caso de la relación entre la creación de un marco legal que proporcione las bases sobre las cuales las instituciones construyan y determinen el alcance y naturaleza de la participación política y la importancia que el gobierno asigna al problema. O bien entre la existencia de un programa operativo anual y la asignación de un presupuesto público, o entre el número de personas dedicadas a atender el cambio climático y los recursos económicos con los que cuenta la organización para atender el problema.

Varios estudios a nivel internacional dan evidencia de que la limitada capacidad de adaptación en los países desarrollados y en vías de desarrollo se debe a que los políticos no han reconocido la adaptación al cambio climático como un asunto urgente y por lo tanto no se han colocado en los primeros lugares de las agendas de gobierno (ver O'Brien *et al.*, 2006; Storbjörk, 2007; Glaas *et al.*, 2010; Corfee-Morlot *et al.*, 2011; Measham *et al.*, 2011; Preston *et al.*, 2013). Esto tiene implicaciones para la disponibilidad de los recursos económicos, humanos y tiempo de dedicación (Mimura *et al.*, 2014).

Por lo anterior, se concluye que entre mayor sea la importancia asignada al cambio climático por parte del gobierno mayor será el desarrollo de las relaciones entre los factores institucionales. En cambio, si el gobierno coloca el problema en su agenda, pero no lo ubica entre los primeros lugares en la jerarquía de temas entonces serán mínimas las relaciones que se establezcan y menor posibilidad hay de que se desarrolle una capacidad institucional que permita la adaptación al cambio climático.

La *institucionalización del problema* es la segunda dimensión en importancia que sobresale en el análisis de componentes principales.

Ésta hace referencia a que un gobierno local y sus autoridades formal y legalmente constituidas en el marco de sus competencias reconocen, asumen y actúan para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero y disminuir la vulnerabilidad de la población ante eventos climáticos y adaptarnos a él. Aquí las autoridades públicas en general y en particular se perciben a sí mismas como capaces de prestar atención al problema y de actuar en torno a él.

La institucionalización detona un proceso de responsabilidad por parte de la autoridad gubernamental. La responsabilidad abarca varios aspectos. Uno de ellos, se refiere al entendimiento del problema: ¿qué lo genera?, ¿cómo se genera?, ¿a través de qué?, ¿qué consecuencias provoca?, entre otros. Otro, se refiere a la responsabilidad política: alguien debe hacer algo para lograr la mitigación y adaptación al cambio climático. El proceso a seguir es resolver ¿quién debe encargarse?, ¿quién debe asumir la responsabilidad?, ¿con qué recursos se cuentan para actuar? (Meny y Thoenig, 1992).

En esta dimensión destacan dos grupos de variables que presentan aquellas relaciones que obtuvieron las mayores cargas relevantes. El primer grupo está integrado por dos variables que se relacionan directamente: 1) entre la participación de la sociedad en los asuntos del cambio climático y la importancia que le da el gobierno local al cambio climático; y 2) entre el número de personas dedicadas a la gestión y coordinación de las acciones dirigidas a la atención del asunto del cambio climático y la importancia que el gobierno local le da al cambio climático. Ambas con signo positivo. El segundo grupo lo integra la relación directa entre el monto de recursos económicos destinados al diseño y coordinación de acciones enfocadas al cambio climático y la importancia que el gobierno le da al problema.

En las relaciones que sobresalen para esta segunda dimensión destacan cuatro factores institucionales: participación de la sociedad, importancia que le da un gobierno al problema (reconocimiento público), número de personas dedicadas a atender el

problema (recursos humanos), el monto de recursos económicos destinados (recursos económicos).

Si existe la institucionalización del problema, entonces las autoridades formal y legalmente constituidas en el marco de sus competencias no sólo reconocerán, sino también, asumirán y actuarán para atender el cambio climático. En consecuencia, se tendrá una mayor posibilidad de que el gobierno ponga en marcha toda su maquinaria para atender el problema. En cambio, si no existe una institucionalización, o bien el gobierno local únicamente lo reconoce como objeto de acción, es decir como un problema que tiene que ser atendido por la autoridad gubernamental, pero que sólo queda en declaraciones entonces no se desarrollará o se verá limitada la habilidad que el gobierno local requiere para atender el problema.

Por lo anterior, se concluye que, entre mayor sea la presencia de las dos dimensiones anteriormente señaladas (prioridad gubernamental e institucionalización del problema) en un gobierno local, mayor será el impacto en los factores que determinan la capacidad institucional de dicho gobierno y viceversa, entre menor sea la presencia menor será la incidencia.

La tercera dimensión que se destaca en el análisis se decide nombrarla *interdependencia gubernamental reglamentada*. Con esta dimensión se resalta la incapacidad que tiene una organización estatal en los diferentes poderes de estado (ejecutivo, legislativo o judicial) o niveles de gobierno (federal o local) en atender sola el problema del cambio climático y de implementar acciones de mitigación y adaptación. Con esta dimensión se reconoce la necesidad de un involucramiento de todas aquellas organizaciones gubernamentales vinculadas con el problema. La atención del cambio climático como cualquier otro problema ambiental no se limita a una sola organización gubernamental ni a una autoridad gubernamental, sino que deben estar presente en las agendas de las diversas organizaciones gubernamentales.

En este sentido, el éxito de la política depende de la cooperación y coordinación de las diferentes organizaciones gubernamentales de di-

ferentes sectores de la actividad gubernamental y de distintos órdenes de gobierno; las cuales no deben enmarcarse en el ámbito informal sino tienen que establecerse en un marco legal que proporcione las bases sobre las cuales las organizaciones se deban vincular para lograr atender el cambio climático (Covarrubias, 2006). Por ejemplo, los objetivos y metas de una política climática pueden ser definidos por una autoridad central a nivel nacional, pero su implementación y sus resultados dependen de la cooperación y coordinación entre ámbitos de gobierno distintos.

Esta tercera dimensión se relaciona directamente con dos relaciones, ambas con signo positivo. La primera hace referencia al vínculo entre la coordinación intergubernamental e intersectorial y la asignación de responsabilidades a las organizaciones gubernamentales. La segunda alude a la relación directa entre la coordinación de las organizaciones gubernamentales y la asignación de responsabilidades a dichas organizaciones. En estas relaciones resaltan dos atributos que se ubican en el nivel de la organización: la coordinación y la responsabilidad de la organización gubernamental encargada del asunto del cambio climático.

En la cuarta dimensión se distinguen dos variables con cargas relevantes y que se relacionan en forma inversa. La primera se refiere a la creación de una organización gubernamental encargada de gestionar y coordinar las acciones del cambio climático y la importancia que el gobierno local le dé al cambio climático, con signo positivo. La segunda se enfoca a la autoridad que puede tener una organización y la importancia que el gobierno da al problema. Frente a ello, se denomina a esta cuarta dimensión: *autoridad pública*. Ésta entendida como el organismo que administra un bien colectivo, a condición de que este organismo disponga de un procedimiento específico de opciones, que posea una autoridad propia y que actúe por medio de un aparato organizado (Meny y Thoenig, 1992). Cabe destacar que la organización gubernamental es el actor central de una política pública, pero no es el único jugador

activo, puesto que se mueve en interdependencia con otros actores: organismos encargados de ejecutar sus decisiones, sujetos que reaccionan a las realizaciones así producidas, grupos de interés u otras instituciones que ejercen influencia sobre la acción proyectada o en curso.

La última dimensión que emerge del primer análisis de componentes principales se refiere a la *gestión interna de las políticas públicas*, la cual es entendida como la movilización que hace una autoridad pública de sus recursos propios: personal, presupuesto, organización, entre otros, a fin de producir realizaciones concretas y específicas (Meny y Thoenig; 1992). En este sentido, cuando un gobierno local reconoce al cambio climático como asunto público prioritario pone en marcha toda su maquinaria gubernamental para atender, definir, y tratar el problema a través de acciones, es decir, destina recursos humanos y recursos económicos, impulsa mecanismos de participación, entre otros. En cambio, si el gobierno no coloca al cambio climático entre los primeros lugares de la jerarquía de temas a tratar entonces resulta más complicado que se cuente con un presupuesto público destinado a la contratación de personal encargado de la gestión y coordinación de las acciones enfocadas a la atención del cambio climático; o bien para el diseño de acciones, entre otros.

En esta dimensión destacan dos variables que se relacionan directamente (signo positivo): la primera presenta la vinculación que existe entre la creación de una organización gubernamental y los recursos económicos. La segunda se refiere a la participación de la sociedad y los recursos económicos públicos.

Con esta dimensión se destaca el hecho de que ni la política ni el gobierno operan en el vacío. Se desarrollan dentro de un marco técnico, legal y político, actúan con recursos públicos, por medio de burocracias que tienen sus propias inercias e intereses y en cierta medida sus resultados dependen de la participación de la sociedad.

Hasta aquí se concluye que la principal dimensión que surge del análisis de componentes principales es la prioridad gubernamental. Le

siguen la institucionalización del problema, la interdependencia gubernamental reglamentada, la autoridad pública y la gestión interna de las políticas públicas. En general estas dimensiones representan aspectos de la acción de gobierno que permiten establecer relaciones entre factores institucionales que se ubican, principalmente, a nivel de individuo y de organización, es el caso de los recursos humanos, reconocimiento público, autoridad, cooperación, coordinación y recursos económicos. Son dimensiones que hacen alusión, principalmente, a las relaciones que se desarrollan dentro del ámbito técnico-burocrático del aparato estatal. Pero no son las únicas, así queda evidenciado a partir del análisis de las opiniones de los expertos obtenidas en la segunda circulación.¹⁰

La primera dimensión, en importancia, que sobresale en la segunda matriz de correlación, se decide nombrarla como *responsabilidad compartida*. Ésta entendida como el compromiso u obligación que deben asumir tanto autoridades gubernamentales como miembros de una sociedad, ya sea como individuos o como miembros de algún grupo, para enfrentar el cambio climático. No se atiende el cambio climático únicamente con la actuación gubernamental, sino se requiere la participación y colaboración de la sociedad, llámese ONG's, universidades, centros de investigación, entre otros. Con esta dimensión se destaca que no basta con establecer relaciones que permitan desarrollar las habilidades técnico-burocráticas del aparato estatal requeridas para instrumentar sus objetivos oficiales, sino es fundamental desarrollar aquellas relaciones que permitan establecer una vinculación con el entorno; es decir, una interacción política que, enmarcada en ciertas reglas, normas y costumbres, establezcan los actores del Estado y el régimen político con los sectores socioeconómicos y con aquellos que operan en el contexto internacional.

10 En esta segunda ronda se analizaron las 12 relaciones (variables) valoradas en la primera circulación, más 11 que fueron propuestas por los expertos en la primera vuelta del ejercicio Delphi.

Una vinculación entre los actores políticos, pero también con aquellos individuos y grupos que luchan por involucrarse activamente en determinados campos de la esfera pública, ya sea a través de organizaciones civiles, asociaciones políticas, grupos interesados en la problemática, que no tienen un fin político y que no son grupos de presión o grupos de poder, entre otros.

Esta dimensión emerge, principalmente, de la relación directamente de siete relaciones:

- 1) Entre la actuación gubernamental y los recursos destinados a la investigación y de la cultura de los funcionarios;
- 2) Entre las organizaciones autogestivas y el vínculo de las acciones locales con la de mayor escala,
- 3) Entre la autoridad que puede tener la organización gubernamental y la importancia que el gobierno le da al problema;
- 4) Entre la participación de la sociedad en los asuntos del cambio climático y el monto de recursos económicos públicos asignados para atender el cambio climático;
- 5) Entre la actuación del gobierno local y el apoyo que le brinde las ONG's;
- 6) Entre el marco jurídico-normativo y la operación y evaluación de las acciones y el acceso al financiamiento de los proyectos; y
- 7) Entre la autoridad de la institución responsable y el marco normativo.

La segunda dimensión en importancia se decide nombrarla como *quehacer gubernamental*. En ésta subyacen relaciones que se establecen al interior de los espacios de gobiernos formales y legalmente predefinidos, tanto en su existencia como en sus objetivos para impulsar acciones de mitigación y adaptación al cambio climático. De igual forma, se evidencia que quien está a cargo de atender el asunto del cambio climático son organizaciones con personal que tiene lógicas estructurales, culturales y funcionales propias, donde no todo es un

conjunto de decisiones racionales ni políticas y donde no todo son expedientes y normas. Que para su funcionamiento dependen de factores, entre los que se destacan: la voluntad política, el poder que se le asigne para hacer que otros actúen de acuerdo a lo esperado; el personal preparado y capacitado, los recursos públicos, los procedimientos, las reglas, las formas organizativas, entre otros.

Se decide nombrar a esta dimensión como *quehacer gubernamental* porque en el análisis de componentes principales se presentan dos grupos de variables que cuentan con valores absolutos superiores y que se relacionan inversamente. El primer grupo está conformado por las siguientes variables: 1) entre la coordinación intergubernamental e intersectorial y la responsabilidad que tiene cada organización; 2) entre las buenas decisiones y el nivel de preparación y capacitación del personal encargado de diseñar las acciones; 3) entre la actuación del gobierno y la voluntad política, y 4) entre el número de personas dedicadas a la gestión y coordinación de acciones y los recursos económicos con los que cuenta la organización. El segundo grupo lo compone la vinculación directa que se establece entre los recursos económicos y la importancia que le otorga el gobierno al problema del cambio climático.

Como se puede observar, en estas relaciones están presentes atributos de factores que caracterizan al individuo y la organización. La primera y cuarta relación del primer grupo y la única relación que se sobresale en el segundo grupo ya habían sido destacadas en la primera matriz de correlación. Sin embargo, otras no habían sido consideradas, esto debido a que para este segundo análisis se incorporaron aquellas relaciones que fueron propuestas por los expertos encuestados a través de la técnica Delphi.

La *trascendencia gubernamental y social*, es la tercera dimensión que emerge del análisis de componentes principales. Ésta es entendida como la importancia que se le da al asunto del cambio climático tanto por la autoridad gubernamental como por la propia sociedad. Para

construir y/o desarrollar la habilidad que el gobierno requiere para atender esta problemática se requiere que las autoridades gubernamentales y la sociedad lo reconozcan como un asunto prioritario y urgente. Como se puede observar esta dimensión es muy semejante con la primera dimensión que se destaca en la primera matriz de correlación, prioridad gubernamental. Sin embargo, la trascendencia gubernamental y social se distingue porque no sólo se requiere que la sociedad y el gobierno reconozcan al cambio climático como un asunto prioritario, sino también urgente.

En esta dimensión se distinguen tres relaciones que cuentan con las mayores cargas y se relacionan directamente. La primera hace referencia al vínculo entre el número de personas dedicadas y la importancia que el gobierno le da al problema. La segunda, a la relación entre la creación de un marco legal y la importancia que el gobierno le da al problema. La última se enfoca a la relación que se establece entre los objetivos de la política y la participación ciudadana.

La cuarta dimensión, en importancia, es la *interacción social*. Ésta se decide nombrarla así porque en ella está presente tres relaciones que obtuvieron las mayores cargas y que se relacionan directamente, a saber: 1) entre la participación pública y la importancia que le otorga la sociedad, la cual cambia con el tiempo; 2) entre la falta de un programa operativo y la ausencia de presupuesto público; y 3) entre los recursos económicos y la importancia que el gobierno local le da al cambio climático. Las dos últimas relaciones sobresalieron en la primera matriz de correlación, sin embargo, destaca la primera por ser una relación propuesta por los expertos encuestados y por presentar la mayor carga. En estas relaciones destacan atributos de factores que se ubican en los tres niveles de la capacidad institucional.

En la dimensión interacción social sobresalen las relaciones que permiten evidenciar la importancia que tiene la sociedad para el éxito de la política, ya que ésta no sólo depende de la importancia que le asigne el gobierno local al asunto del cambio climático y de la gestión

interna que desarrolle para atender el problema (movilización que hace una autoridad pública de sus recursos propios: personal, presupuesto, organización, entre otros), a fin de producir realizaciones concretas y específicas, sino también de la aceptación por parte de los ciudadanos, empresarios, y organizaciones no gubernamentales.

La última dimensión destaca una relación con la mayor carga y con signo positivo: 1) entre la creación de una organización gubernamental y los recursos económicos. Esta relación se distingue porque destaca atributos de factores que se encuentran en el nivel de la organización; además porque es una relación que fue destacada en el primer análisis de componentes principales, sin embargo se relacionaba con otras. Tomando en cuenta lo anterior, se decide nombrar esta variable como *responsabilidad gubernamental*. Con esta dimensión, se manifiesta la necesidad de contar con una organización responsable del problema. Esto no significa que dicha organización va a estar a cargo de todo el proceso de una política pública (agenda, formulación, implementación, evaluación) sino que se le debe encomendar a una organización la institucionalización del cambio climático como un problema público. Esta organización se dedicará a explicar, transmitir, argumentar y persuadir a las diversas organizaciones gubernamentales. Así como a construir los argumentos y obtendrá las evidencias que despierten el consenso o derroten la oposición, entre otros. Por ello, debe contar con los recursos económicos necesarios para desempeñar efectivamente sus responsabilidades.

Hasta aquí se observa que las dimensiones que surgen del análisis de componentes principales que se realizó a partir de las opiniones recuperadas a través del segundo cuestionario no sólo destacan las relaciones que se establecen entre los factores que se ubican en los niveles del individuo y la organización, sino también en el nivel del contexto institucional. Las dimensiones hacen referencia a conexiones que se establecen entre la participación de la sociedad y los recursos económicos, la actuación del gobierno y el apoyo que le brinden las ONG's, los

objetivos de la política y la participación ciudadana, y la participación pública y la importancia que le otorga la sociedad. Son dimensiones que afirman que la capacidad institucional se construye y/o fortalece no sólo por la existencia de organizaciones administrativas coherentes y cuadros burocráticos expertos bien motivados, sino también por la constitución y acción de los actores sociopolíticos involucrados en un determinado campo de acción pública. Es decir, se determina también por el tipo de interacción política que, enmarcada en ciertas reglas, normas y costumbres, establezcan los actores del Estado y el régimen político con los sectores socioeconómicos y con aquellos que operan en el contexto internacional.

CONCLUSIONES

Las diez dimensiones identificadas detonan o fomentan relaciones entre factores ubicados en un nivel de la capacidad institucional o en diferentes, son dimensiones que dan evidencia de la vinculación que existe entre el ámbito técnico-burocrático del aparato estatal y la interacción política que establecen los actores del Estado y el régimen político con los sectores socioeconómicos. Son dimensiones que no se presentan lineal ni mecánicamente, tampoco siguiendo un orden, sino que se van evidenciando a partir de la articulación y complejidad de todos los factores.

Estas dimensiones muestran que las relaciones no sólo se presentan al interior de las organizaciones gubernamentales, puertas adentro; sino también se desarrollan con el entorno. Existe una interconexión del ámbito interno de la administración pública con la esfera externa de la acción gubernamental (constitución y acción de los actores sociopolíticos involucrados en el campo de acción pública que se configura a partir de la gestión del problema del cambio climático). Por lo que al fomentar estas dimensiones se estará superando la postura de asumir que el aparato estatal con sus aspectos técnico-administrativos actúa de manera aislada o apartada de los grupos de interés, su entorno y sociedad y con importantes interdependencias entre éstos.

De igual forma, se concluye que la prioridad gubernamental y la responsabilidad compartida destacan como las principales dimensiones que sirven de base para la construcción o desarrollo de las relaciones entre los factores institucionales. Esto permite confirmar que el reconocimiento público es un factor institucional que detona la construcción y/o fortalecimiento tanto de los factores institucionales que determinan la capacidad institucional de un gobierno local, como de sus relaciones. Esta capacidad, así como los factores y sus relaciones que la determinan están en función de aquellos problemas públicos reconocidos como públicos por parte de un gobierno local; así como del tipo

de reconocimiento que éste le otorgue. Asimismo, están en función del compromiso u obligación que debe asumir no sólo la autoridad gubernamental, sino también los miembros de la sociedad. Se reconoce la importancia que tiene la sociedad para el éxito de la política. Parafraseando a Meppen y Gill (1998) se requiere recuperar las percepciones de causa y efecto en el sistema de todos aquellos interesados para diseñar e implementar políticas¹¹ enfocadas a enfrentar el problema del cambio climático, pero esta recuperación no se da en un sólo momento, sino que tiene que estar presente en todo el proceso de la planeación ambiental. La idea es que, a través de un proceso participativo, se potencie la colaboración de las partes interesadas en la solución del problema. Participación que no se limita a la información o consulta¹² sino a la participación en la toma de decisiones y en el control de las acciones de gobierno a través de las diversas formas de organización de la ciudadanía. Lo que por un lado se relaciona con la evaluación y por otro con diversas formas de escrutinio sobre la acción.

Por ello se afirma que entre mayor sea la presencia de estas dimensiones en un gobierno local mayor será el impacto en los factores que determinan la capacidad institucional de dicho gobierno. Pero éstas se deben acompañar de las otras ocho dimensiones que sobresalieron en el análisis.

Las relaciones que determinan la construcción y/o desarrollo de capacidad de las instituciones de un gobierno local también son determinadas por la *definición del problema*. Ésta entendida como el diagnóstico realizado por los tomadores de decisiones gubernamentales, es decir, de la manera como se describen y explican las causas,

11 Meppen y Bourke (1999) llaman aprendizaje a la acumulación de percepciones de causa y efecto en el sistema de todos aquellos interesados en una decisión o cuestión.

12 El nivel de información y consulta representan cierto nivel de “simbolismo” que permite a los excluidos el escuchar y ser escuchados, sin que esto represente una carga significativa de poder que impulse el cambio del *status quo* (Arnstein, 1969).

las consecuencias, ventajas e inconvenientes, los efectos inducidos y los efectos buscados; así como del nivel de entendimiento empírico y conceptual que tenga del cambio climático (Romero Lankao, 2013a). Por ejemplo, si éste se explica a través de los múltiples sistemas ecológicos y humanos y de las variables ambientales, económicas, sociales, políticas, tecnológicas y culturales que se vinculan mutuamente para generar efectos en el clima; entonces el gobierno tendrá que construir o desarrollar una arquitectura institucional que le permita abordarlo de esa manera. Esto implica, entre otros aspectos, desarrollar políticas públicas que al tener en cuenta las múltiples causas que dan origen al cambio climático sean resultado de la participación articulada de instancias pertenecientes no sólo a diferentes sectores de la actividad gubernamental, sino a diferentes órdenes de gobierno. En cambio, una definición limitada a un determinado sistema o a ciertas variables disminuye drásticamente las posibilidades de desarrollo de la capacidad institucional, ya que se estaría sustentando en una actuación organizacional aislada, parcial y focalizada a determinados sistemas o variables, entre otros. Desafortunadamente, en el análisis de componentes principales no sobresalió alguna dimensión que aluda a esto porque no se consideraron relaciones y factores que permitieran abordarla.

Por último, se concluye que, si se establecen lazos entre las anteriores dimensiones, se da lugar a interacciones virtuosas entre los factores y entre los atributos que repercuten en la construcción y/o desarrollo de la capacidad institucional de los gobiernos locales.

BIBLIOGRAFÍA

- Adger W.N., Arnell N.W., Tompkins E.L. (2005). Successful adaptation to climate change across Scales, *Global Environmental Change* (pp.77-86). Elsevier. Vol. 15, Número 2.
- Aguilar L. (2000). *Problemas públicos y agenda de gobierno*. México: Porrúa.
- Alonso G. (2001). *Notas para el análisis de capacidades institucionales en el sector público*. Documentos de Trabajo. Buenos Aires: Universidad Nacional de General San Martín (UNSAM).
- Arnstein S.R. (1969). A ladder of Citizen Participation. *Journal of the American Planning Association* (pp. 216-224), Vol. 34, Issue 4.
- Chávez M.M. (2004). *Planning for sustainability: a transdisciplinary planning approach applied to water resources in México*, PHD Thesis. Liverpool: University of Liverpool Press.
- Collins F. (2006). *City of Fort Collins' Local Action Plan*. Colorado: City of Fort Collins.
- Coppedge M. (2001). Instituciones y gobernabilidad democrática en América Latina, en Antonio Camou (comp.). *Los desafíos de la gobernabilidad*. México: FLACSO-UNAM, Plaza y Valdés.
- Corfee-Morlot J., Cochran I., Hallegatte S., Teasdale P.J. (2011). Multilevel risk governance and urban adaptation policy. *Climatic Change* (pp. 169-197). Vol. 104, Issue 1.
- Covarrubias O.M. (2006). *El problema de la coordinación en el gobierno contemporáneo. Hacia un Estado Federal Coordinado*. Toluca, México: Instituto de Administración Pública del Estado de México.
- Evans M. (1996). El Estado como problema y como solución, en *Desarrollo Económico. Revista de Ciencias Sociales*, Instituto de Desarrollo Económico y Social, enero-marzo, Vol. 35, Núm. 140.
- Glaas E., Jonsson A., Hjerpe M., Andersson-Sköld Y. (2010). Managing climate change vulnerabilities: formal institutions and knowledge use as determinants of adaptive capacity at the local

- level in Sweden. *International Journal of Justice and Sustainability* (pp. 525-539). Vol. 15. Issue 6.
- Gupta S. (2003). *Implementing market-based approaches for greenhouse gas abatement in India: institutions and policies*. In: Willems, S. y K. Baumert. Paris. Institutional Capacity and Climate Actions, COM/ ENV/EPOC/ IEA/SLT, 5, 2003, OECD/IEA.
- ICLEI (2004). *Cambio Climático y Desarrollo Limpio: Oportunidades para Gobiernos Locales*. México: ICLEI.
- Kamal-Chaoui L., Leman E., Rufe Z. (2009). Urban Trends and Policy in China, *Regional Development Working Papers*. Paris: OECD.
- Krellenberg K., Jordán R. (2013). *Adaptación al cambio climático en megaciudades de América Latina*. Santiago de Chile: Red Regional de Aprendizaje del Proyecto Clima Adaptación Santiago (cas), CEPAL.
- La Jornada*. (5 de enero de 2009). Sociedad y Justicia. *La Jornada*.
- Measham T.G., Preston B.L., Smith T.F., Brooke C., Gorddard R., Withycombe G., Morrison C. (2011). Adapting to climate through local municipal planning: barriers and challenges. *Mitig Adap Strateg Glob Change* (889-909). Vol. 16. Issue 8.
- Meny I., Thoening J.C. (1992). *Las políticas públicas*. Barcelona: Ariel.
- Meppen T., Gill R. (1998). Planning for sustainability as a learning concept. *Ecological Economics* (pp. 121-137). Issue 30.
- Mimura N., Pulwarty R.S. (2014). *Adaptation Planning and Implementation*. USA: Inter-American Development Bank.
- Moser S.C., Ekstrom J.A. (2010). A framework to diagnose barriers to climate change adaptation. *Proceeding of the National Academy of Sciences*. Washington: National Academy of Sciences.
- Nájera M. (2014), Crecimiento vertical: cambio climático, un reto. En: *Ciudades 101. Revista Ciudades Análisis de la coyuntura, teoría e historia urbana*. Núm. 101. Red Nacional de Investigación Urbana.
- O'Brien K., Eriksen S., Sygna L., Næss L.O. (2006). Questioning complacency: climate change impacts, vulnerability, and adaptation in Norway. *Ambio* (50-56). Issue 35.

- Organización de las Naciones Unidas (1992). *Agenda 21*. Río de Janeiro: ONU.
- Oszlak O. (1995). Estados capaces: un desafío de la integración. Buenos Aires: *Mimeo*.
- Peach B., Carolyn H. (2010). Institutional adaptive capacity and climate change response in the Congo Basin forest of Cameroon. *Mitig Adapt Strateg Change* (pp. 263-282). Vol. 15. Issue 3.
- Preston B.L., Dow K., Berkhout F. (2013). The climate adaptation frontier. *Sustainability* (pp. 1011-1035). Vol. 5. Issue 3.
- Repetto F. (2003). Capacidad estatal: requisito necesario para una mejor política social en América Latina. Ponencia presentada en el *VII Congreso Internacional del CLAD sobre la Reforma del Estado y de la Administración Pública*. 28-31 de octubre de 2003. Panamá.
- Romero Lankao P. (2013a). Desarrollar capacidad de respuesta urbana a la variabilidad y el cambio climático. En: Sánchez Rodríguez, R. (2013). *Respuestas urbanas al cambio climático en América Latina*. Santiago de Chile: CEPAL, Inter-American Institute for Global Change Research.
- Romero Lankao P., Hughes S., Rosas-Huerta A., Borquez R., Gnatz D.M. (2013b). Institutional capacity for climate change responses: an examination of construction and pathways in Mexico City and Santiago. *Environment and planning: Government and Policy* (785-805). Vol. 31. Issue 5.
- Rosas A. (2015). *La capacidad institucional de gobiernos locales para hacer frente al cambio climático*. México: ITACA, Universidad Autónoma Metropolitana.
- Rosas A. (2011). *La capacidad institucional de los gobiernos locales para atender el cambio climático. El caso del gobierno del Distrito Federal*. Tesis doctoral. México: UAM-Xochimilco.
- Rosas A. (2013). La capacidad institucional de gobiernos locales en la atención del cambio climático. Un modelo de análisis. *Revista Mexicana de Análisis Político y Administración Pública*. Vol. 2, Núm. 2.

- Sánchez R. (2013). El Cambio climático y las áreas urbanas de América Latina: a manera de introducción. *Respuestas urbanas al cambio climático en América Latina*. Santiago de Chile: CEPAL, Inter-American Institute for Global Change Research.
- SMA, Secretaría del Medio Ambiente (2004). Estrategia Local de Acción Climática de la Ciudad de México. México: SMA.
- SEMARNAT (2012). *Adaptación al cambio climático en México: Visión, elementos y criterios para la toma de decisiones*. México: SEMARNAT, INECC.
- Storbjörk S. (2007). Governing climate adaptation in the local arena: challenges of risk management and planning in Sweden. *Local Environment* (pp. 457-469). Vol. 12, Issue 5.
- Tobelem A. (1992). Institutional Capacity Analysis and Development System. Washington: World Bank.
- UN-Habitat, United Nations Human Settlements Programme (2011). *Cities and Climate Change: Global Report on Human Settlements. Global Report on Human Settlements*. Londres-Washington: UN-Habitat.
- UACH-UNAM. 2014. Vulnerabilidad y adaptación a los efectos del cambio climático en México. México: UACH-UNAM.
- Willems S. (2004). Institutional Capacity and Climate Actions: Summary Paper. *Environmental Directorate International Energy Agency*. Paris: OECD.
- Willems S., Baumert K. (2003). Institutional capacity and climate actions. Paris: OECD.
- WHO, World Health Organization (2017). Global Health Observatory data. Washington: WHO.
- World Wildlife Fund (2017). El impacto del cambio climático en Latinoamérica. México: WWF.
- Yohe G., Tol R. S. (2002). Indicators for social and economic coping capacity—moving toward a working definition of adaptive capacity, *Global Environmental Change* (25-40). Vol. 12.

CAPÍTULO 3

El costo económico de los desastres de origen climatológico en América Latina y el Caribe (1970-2008)

Sergio O. Saldaña-Zorrilla¹³

INTRODUCCIÓN

El presente capítulo estima el costo histórico de los desastres de origen climatológico en América Latina y el Caribe. Para ello se consideran los costos estimados por este tipo de desastres obtenidos de las evaluaciones de la CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe) integrados de forma consolidada con estimaciones provenientes del CRED (Centre for Research on the Epidemiology of Disasters). A partir de esos costos estimados se puede advertir que el peso económico de los desastres viene incrementándose tanto en términos absolutos como respecto a su peso en el Producto Interno Bruto (PIB). Asimismo, destaca que para las subregiones del Caribe y Centroamérica dicho peso es mucho mayor que para el resto de la región.

El análisis de datos del presente capítulo señala que los países que han visto aumentados sus costos económicos por desastres climáticos han registrado también un menor crecimiento en su PIB *per cápita* al cabo de las últimas cuatro décadas en la región. Se ratifica así la noción generalizada de una relación inversa entre el peso relativo de los desastres de un país y el grado de desarrollo de su economía.

Conclusiones significativas del análisis señalan que si bien las tendencias de los escenarios climáticos y la recurrencia e intensidad de

¹³ Investigador del International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA). Dirección postal: Schlossplatz 1, A-2361, Laxenburg, Austria.

eventos extremos no permiten una conclusión definitiva sobre una mayor recurrencia, intensidad y costo de los desastres, en cambio la acumulación de otros factores como la presión demográfica, la degradación ambiental, los patrones de asentamientos humanos y las inversiones productivas sin internalización del riesgo, devienen en costos crecientes tanto privados como sociales.

Todo ello justifica ampliamente la necesidad de realizar cambios de políticas, generar instrumentos económicos y realizar cambios tecnológicos importantes para la reducción del riesgo en el contexto de la adaptación a escenarios de cambio climático. Por ello es evidente una convergencia entre las agendas de la reducción del riesgo de desastres y la adaptación al cambio climático. En ambas, el común denominador es la necesidad de incrementar la resiliencia. La falta de resiliencia es mayor en las economías más pequeñas, con menores grados de diversificación y desarrollo, con territorios pequeños y más expuestos —como los países y territorios insulares— y con altas tasas de recurrencia de eventos extremos y desastres. A su vez, al interior de esas economías la falta de resiliencia se concentra en los grupos sociales de menores ingresos. La evidencia empírica demuestra que los desastres llevan al incremento de la pobreza y a la postergación de metas del desarrollo. Por lo tanto, medidas de adaptación y gestión del riesgo deben verse como sinérgicas, como medidas no postergables y como parte de toda estrategia de desarrollo sustentable que tenga como metas la mayor equidad y convergencia tanto entre estratos sociales como entre países.

El capítulo está organizado de la siguiente manera: la Sección I expone los conceptos básicos de desastre natural, vulnerabilidad, riesgo, entre otros, para después analizar la frecuencia y los costos económicos históricos de los desastres climatológicos en la región; la Sección II analiza tendencias y presenta algunos indicadores del costo de estos desastres respecto del PIB *per cápita*. Finalmente, en las conclusiones se realizan sugerencias para mejorar las evaluaciones

existentes de cambio climático y las estrategias de reducción del riesgo de desastres en la región.

I. CONCEPTOS Y TENDENCIAS GENERALES

Para efectos del presente análisis, *fenómenos naturales* son aquellos cambios en la naturaleza debidos a sus procesos físicos y químicos propios, como es el caso de la lluvia, movimientos sísmicos, entre otros; por su parte, *eventos extremos* son aquellos fenómenos naturales que exceden (determinados) umbrales de (determinada) normalidad, como es el caso de las fuertes lluvias, o de sismos de alta intensidad. La *normalidad* es entonces una medida relativa determinada por registros históricos de medición científica de un fenómeno natural, tales como: milímetros de lluvia en el caso de la precipitación, grados Richter en sismos, etc.

Los *desastres naturales* son aquellos eventos extremos que impactan negativamente a la sociedad y/o a la economía, esto es, son eventos que tienen lugar cuando un evento extremo y actividad humana interceptan de una forma dañina para esta segunda.¹⁴ A grandes rasgos, los desastres naturales suelen clasificarse como de origen climatológico (como las tormentas tropicales, huracanes, inundaciones, sequías, fuertes lluvias, etc.) y geológico (como los sismos, tsunamis, erupciones volcánicas, entre otras). El impacto negativo provocado por los desastres naturales depende del nivel de *vulnerabilidad* en que se encuentre una economía y/o una sociedad.

14 Por fines de simplicidad, el presente documento usa el término desastre natural a pesar de reconocer la validez de la controversia que su uso ocasiona. Dicha controversia radica en el cuestionamiento que varios autores realizan acerca de la pertinencia de llamar natural a desastres en los que es la sociedad la que, conscientemente o no, se expone por cuenta propia, interponiéndose en el camino de un sinnúmero de eventos naturales –incluso sin que estos sean eventos extremos–, dando pie a lo que se conoce como la construcción social del riesgo (véase por ejemplo García, 2005).

Vulnerabilidad

La vulnerabilidad no tiene un significado único tanto en las comunidades científicas como tampoco entre organismos. La *Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres de las Naciones Unidas* (EIRD) la define en función de amenazas múltiples; concibe la vulnerabilidad como “las condiciones determinadas por factores o procesos físicos, sociales, económicos y ambientales que aumentan la susceptibilidad y exposición de una comunidad al impacto de amenazas” (EIRD, 2005). Por su parte, el Cuarto reporte de evaluación del IPCC (IPCC; WGII, 2007) la define en función del proceso de cambio climático: “la vulnerabilidad es el grado al que un sistema es susceptible de, o es incapaz de afrontar los efectos adversos del cambio climático, incluyendo la variabilidad climática y los extremos. La vulnerabilidad es función del tipo, magnitud y tasa del cambio climático y de las variaciones a las cuales está expuesto el sistema, a su sensibilidad y a su capacidad adaptativa”. La diferencia sustancial de ambas definiciones es que mientras la primera está abierta a todo tipo de amenazas la segunda se limita a las derivadas del cambio climático.

Por su parte, los conceptos existentes de *vulnerabilidad económica* tienden a dejar de lado la interacción de la economía con la naturaleza física. Todaro (1982), por ejemplo, considera la vulnerabilidad como una situación en la cual los países menos desarrollados (PMD) se encuentran en una relación de dominio y dependencia frente a los países desarrollados. En su visión, los PMD son considerados económicamente vulnerables a las decisiones de las naciones más ricas en áreas tales como el comercio, las inversiones extranjeras directas, la ayuda humanitaria, investigación y desarrollo tecnológico, entre otras. La relevancia de este concepto radica en su reconocimiento de asimetrías, lo que le conecta con otros conceptos relacionados provenientes de la economía del desarrollo, tal es el caso de la *relación centro-periferia* y de los *términos de intercambio* de Raúl Prebisch (1950 y 1973).

Siguiendo a la definición de Todaro (1982), a inicios de la década de los 1990s la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Comercio y Desarrollo (UNCTAD, por sus siglas en inglés) realizó un primer intento para construir un índice de vulnerabilidad económica.¹⁵ Por su parte, en 1994, el Programa de Acción para el Desarrollo Sustentable de Pequeños Estados–Isla en Desarrollo adoptó un índice de vulnerabilidad económica con el fin de reflejar la condición de mayor vulnerabilidad de los Pequeños Estados–Isla en Desarrollo al cambio global comparadas con otros países en vías de desarrollo. De la combinación de componentes de ambos índices, la UNCTAD construyó un índice compuesto de vulnerabilidad económica basado en tres dimensiones fundamentales: 1) magnitud de los choques externos que caen fuera del control doméstico (medido por medio de indicadores de inestabilidad de la producción agrícola y las exportaciones); 2) exposición de la economía a esos choques (estimado por la porción de la producción manufacturera y de servicios modernos dentro del PIB y por un indicador de la concentración de mercancías de exportación), y; 3) limitaciones estructurales (*structural handicaps*) que explican la alta exposición de la economía –tomando en cuenta la pequeñez de la economía, medido por una variable demográfica proxy (UNCTAD, 2001).

Desde la perspectiva de Briguglio (2002), un país puede ser económicamente vulnerable y aun así registrar un relativamente alto PIB *per cápita*. Países como las economías pequeñas con necesidades especiales (como la insularidad o la mediterraneidad, ejemplificadas por las islas del Caribe en la región, o *Small Island Development States, SIDS*), en lo particular, son económicamente vulnerables debido a su limitada habilidad para explotar economías de escala, falta de recursos naturales, economía poco diversificada, dependencia de un reducido rango de exportaciones y alta dependencia de la importación de bienes estra-

15 Cfr. Briguglio, L. (1992).

tégicos, como es el caso de combustibles y alimentos. No obstante, lo que desde esta perspectiva convierte a un país en económicamente vulnerable es su exposición a fuerzas económicas fuera de su control.

Así, la condición de *periferialidad* de una economía comprende tanto su aislamiento geográfico y/o ubicación remota (lo cual le representa altos costos), así como su inhabilidad para influenciar precios internacionales debido a su pequeña cuota en el comercio global. No obstante, la vulnerabilidad de un país no consiste solamente en las consideraciones de sus niveles de pobreza, falta de activos y pequeñez de su economía, sino también de la inequidad y asimetrías socioeconómicas. Países con una población vasta, con una economía grande y con una dinámica de mutua influencia con el comercio mundial pueden esconder su vulnerabilidad a primera vista. Sólo a través de un detallado análisis regional–sectorial puede identificarse su vulnerabilidad diferenciada en virtud de lo dualista de su estructura socioeconómica (Rodríguez, 1980). Países latinoamericanos como México, Brasil, Chile, Argentina y Colombia no deben ser considerados enteramente vulnerables, sino desigualmente vulnerables. Estos poseen sociedades con tanta disparidad que los impactos de los desastres se tornan insignificantes a nivel macroeconómico; la coexistencia de sociedades ricas con pobres, sectores altamente productivos con rezagados, etc., hace necesario el empleo de herramientas de análisis económico sectorial a un nivel geográfico desagregado hasta un nivel –al menos– municipal.

En la definición de vulnerabilidad es entonces crucial considerar planteamientos que analizan factores estructurales. Las implicaciones que la vulnerabilidad tienen para el análisis económico son explícitamente expuestas por Amartya Sen (1981), al examinar el papel que los medios disponibles (*entitlements*) y la *situación original* de una sociedad (dotación original, *endowment*) tienen como condicionantes de la formación de estructuras institucionales, mismas que son capaces de reproducir o incluso amplificar la vulnerabilidad latente de una economía.

Con base en los conceptos anteriormente expuestos, la *vulnerabilidad económica* puede entonces definirse como la susceptibilidad de un agente económico a absorber negativamente choques externos, dada su propiedad de activos, capacidad productiva, nivel de conocimientos e información (capacidad de respuesta) y de sus medidas implementadas para evitar, manejar y suavizar los efectos negativos resultantes de un choque en particular (capacidad de adaptación), dentro del marco del sistema que regula el acceso a los recursos de la sociedad (*entitlements*). La *reducción de la vulnerabilidad* consiste entonces en implementar cambios a lo largo del tiempo tales que minimicen los efectos negativos de potenciales choques exógenos sobre los activos de los agentes económicos, por medio de un reforzamiento de los elementos constituyentes de su vulnerabilidad concreta.

Para muchos autores, el riesgo es definido como la probabilidad de obtener un resultado no deseado como resultado de la ocurrencia potencial de eventos dañinos y de la susceptibilidad latente de los más expuestos (i.e. Dilley and Boudreau, 2001), por lo que en la definición del riesgo la susceptibilidad de la unidad es algo dado, por lo cual la *reducción del riesgo* se enfoca a la prevención, preparación y, en general, a medidas que reduzcan la probabilidad de obtener resultados dañinos, las cuales, por ello, no implican necesariamente cambios substanciales a la unidad expuesta en sí.

La reducción de vulnerabilidad abarca tanto esas medidas como —a diferencia de la reducción del riesgo— también cambios en la unidad expuesta misma, tales como el reforzamiento de su *capacidad* de respuesta y de *adaptación*,¹⁶ mismas que involucran múltiples interacciones socioeconómicas. Esas capacidades incluyen alteraciones a

16 En este contexto, adaptación tiene una connotación más amplia que la de enfrentar los efectos potenciales del cambio climático y se refiere en términos generales a la resiliencia incrementada frente a los riesgos a que está expuesta la sociedad (véase Turner *et al.*, 2003).

los sistemas de *derechos de acceso a los recursos*, de *empoderamiento* y de *distribución del ingreso*, así como también abarca relaciones humano-ambientales cruciales, tales como cambio de uso de suelo y manejo de aguas.

La frecuencia de los desastres de origen climatológico –por simplicidad, desastres climáticos en adelante– en América Latina y el Caribe muestra una tendencia al alza. Lo anterior parece apoyar la noción de que el cambio climático juega un papel crucial en la frecuencia de estos eventos. Esto, combinado con la tendencia creciente de ciclones tropicales y huracanes de categorías mayores en la región, así como con el probable aumento en valores extremos de precipitación y altas temperaturas, analizado en la sección anterior, apoya la noción de que la intensidad de los eventos climáticos va en aumento. Este tipo de eventos tiende a producir una cada vez mayor proporción de las pérdidas por desastres comparado con otro tipo de desastres.

Al contrario que los desastres de origen geológico (como movimientos telúricos y erupciones volcánicas), los desastres causados por eventos meteorológicos tienden a producir más pérdidas indirectas (flujo de ingresos) que directas (stock de capital). El impacto negativo de los desastres climáticos se concentra entonces en sectores productivos altamente dependientes de los recursos naturales y del acontecimiento de ciclos estacionales, como es el caso de la agricultura, ganadería, pesca y turismo. En caso de continuar los crecientes desfases en los patrones estacionales de lluvias y su distribución anual, es previsible el aumento en las pérdidas indirectas por desastres. Incluso en los casos de eventos meteorológicos extremos, como ciclones y tormentas tropicales, las pérdidas indirectas persisten por largos períodos de tiempo.

A continuación, se presenta información estadística de diferentes fuentes indicando que los desastres de origen climatológico están incrementándose en número, costo e impacto (Tabla 1). La sección comienza con un breve resumen de las evaluaciones de desastres de

la CEPAL, en el cual se observa que mientras los costos de los desastres en su amplio espectro se han reducido a lo largo de las últimas cuatro décadas, los costos de los desastres de origen exclusivamente climatológico van en aumento durante el mismo período, con lo que se confirman las afirmaciones del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) (IPCC–WGII, 2007) y del Informe Stern (Stern, 2007).

Posteriormente se analiza la frecuencia de los desastres climatológicos, para pasar a la cuantificación consolidada de los costos de este tipo de desastres. Con las cifras consolidadas se hacen indicadores de impacto económico relativo entre los países de la región. Finalmente, se realizan las proyecciones del costo de los desastres al año 2100.

La experiencia de la CEPAL en la evaluación de desastres es quizás la más documentada dada la acumulación de casos analizados con base en una metodología uniforme (CEPAL, 2003) y la realización de misiones *in-situ* de evaluación.

La evidencia de cuatro décadas de evaluación de desastres de tipo climatológico y geológico por parte de la CEPAL muestra que estos eventos han tenido un elevado costo tanto humano como sobre las condiciones económicas en América Latina y el Caribe. Más de 114 mil muertos y una población afectada cercana a los 43 millones de personas –en general grupos sociales ya previamente en condiciones precarias de vida en términos de vivienda, ingresos, educación y otros servicios– han sido contabilizados dentro de dichas evaluaciones de la CEPAL.

**Tabla 1. Impacto de desastres en América Latina y el Caribe
evaluados por CEPAL**

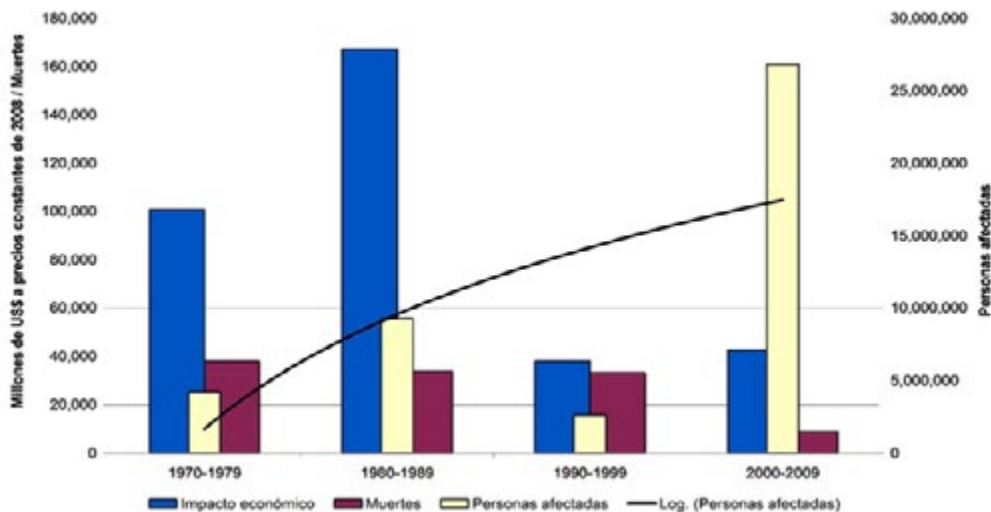
	Número de años	Impacto humano		CUANTIFICACION DEL IMPACTO (millones de dólares constantes 2008)				
		Muertes	Población directamente afectada	TOTAL	DAÑOS	PÉRDIDAS	Efecto externo (variación en importaciones y exportaciones)	
TOTAL	1972-2009	37	114,196	42,942,846	349,188	227,005	120,504	114,617
Promedio anual	1972-2009	37	4,224	1,192,857	9,700	6,306	3,347	3,184
Promedio anual	2000-2009	9	983	2,927,853	4,760	2,922	1,651	602

Fuente: CEPAL, evaluaciones realizadas, 1972-2008.

El impacto económico surge no sólo de la destrucción física del patrimonio, acervo, infraestructura e inventarios, que asciende a 227 mil millones de dólares durante 1972-2009 (a partir de aquí, las cantidades monetarias se expresan en precios constantes de 2008), sino que también comprende las pérdidas y gastos extraordinarios que ocasionan tales daños, los cuales superan los 120 mil millones de dólares durante el mismo período. Ello representa un promedio anual de daños y pérdidas cercanas a los 9.7 mil millones de dólares (Ver Tabla 1 y Figura 1). El impacto humano de estos eventos en términos de víctimas y población afectada es, pues, severo y las implicaciones económicas en términos de ingresos perdidos por vidas perdidas y discapacidades ocasionadas por los desastres —que no son fácilmente cuantificables— son igualmente elevados.

Mientras el costo económico y la pérdida de vidas humanas de todos los desastres evaluados por la CEPAL se han ido reduciendo a lo largo de las últimas cuatro décadas, el número de personas afectadas mantiene una tendencia creciente—representado por la línea de tendencia de la Figura 1. Ello se explica por los altos costos de los eventos de origen geológico de los años 1970's y 1980's en la región, lo cual lleva a observar un menor costo de los desastres en las dos décadas siguientes.

Figura 1. América Latina y el Caribe: Impacto económico, muertes y población afectada por desastres evaluados por la CEPAL



Fuente: Elaboración propia con datos de la Unidad de Evaluación de Desastres de la CEPAL (CEPAL 2011) y de la División de Estadística de la CEPAL (CEPAL 2012).

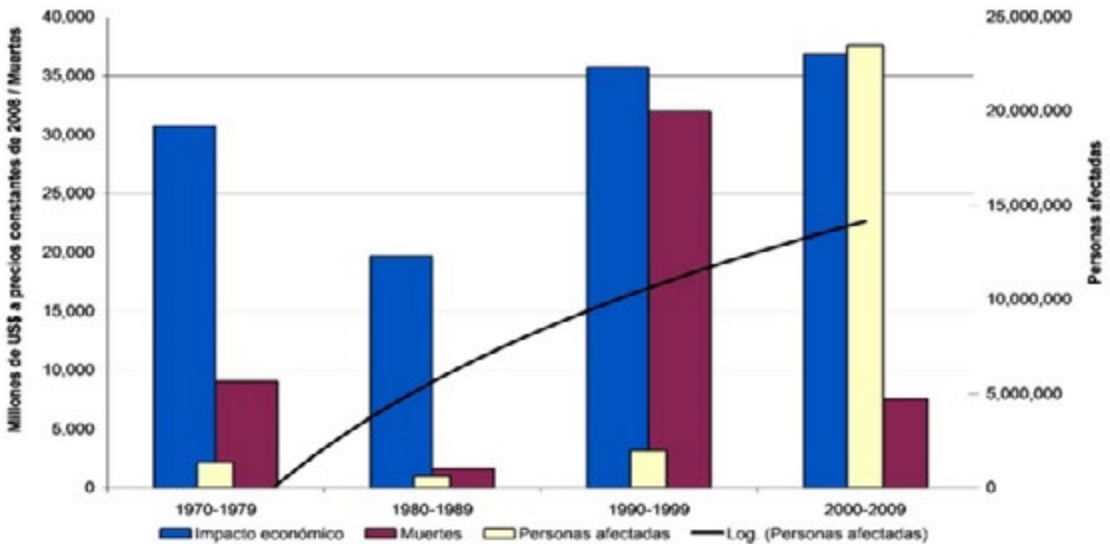
Sin embargo, al analizar solamente los desastres de origen climatológico encontramos que sus costos van en aumento, como puede observarse en la Figura 2, donde también muestra que mientras el número de muertes provocadas por los desastres, evaluados por la CEPAL, se ha vuelto a reducir luego de la anterior década, el número de personas afectadas han ido en aumento.

Ambas relaciones sugieren que:

- 1) La región ha presentado avances en materia de monitoreo, alerta temprana y manejo de emergencias climatológicas, sugerido por la reducción del número de muertes de la presente década;

- 2) Aún existen retos pendientes en términos de mitigación del riesgo económico, demostrado por los crecientes costos económicos de este tipo de desastres;
- 3) Existe una alta vulnerabilidad de la población expuesta a este tipo de desastres, demostrado por el rampante número de personas afectadas observadas en las evaluaciones de la CEPAL.

Figura 2. América Latina y el Caribe: Impacto económico, muertes y población afectada por desastres climatológicos evaluados por la CEPAL



Fuente: Elaboración propia con datos de la Unidad de Evaluación de Desastres de la CEPAL (CEPAL 2011) y de la División de Estadística de la CEPAL (CEPAL 2012).

De las cifras y datos presentados deriva como conclusión que la región no sólo requiere proteger su infraestructura productiva y social, sino que además es necesario asegurar la preservación –e incluso mejora– de los flujos de ingresos en los escenarios post desastre. Como lo han demostrado las numerosas evaluaciones realizadas durante estas cuatro décadas, el acervo y el patrimonio son sólo una fracción del impacto total, dado que la destrucción del mismo tendrá efectos duraderos en cuanto a reducción en la producción, ingresos y bienestar, afectando a la sociedad y a la economía.

Aun cuando los registros de la CEPAL proporcionan una mayor certeza debido al empleo de una metodología sólida y documentalmente verificable por evaluaciones *in-situ*, estos registros son aún muy limitados respecto de los eventos climatológicos extremos observados como para basarse exclusivamente en ellos. Para superar este posible sesgo, la muestra de datos se enriqueció con los proporcionados por los registros del CRED, también conocidos como base EM-DAT. A continuación, se analiza la frecuencia de los desastres climatológicos en ALC consolidando los registros de la CEPAL con los del CRED.

A. Frecuencia

Las bases de datos de la CEPAL y del CRED registran desastres de origen climatológico en la región de una forma sistemática, mostrando registros de décadas. Consolidando ambas se observa un aumento en la frecuencia de los desastres climáticos en América Latina y el Caribe durante las últimas cuatro décadas, como puede apreciarse en la Figura 3.

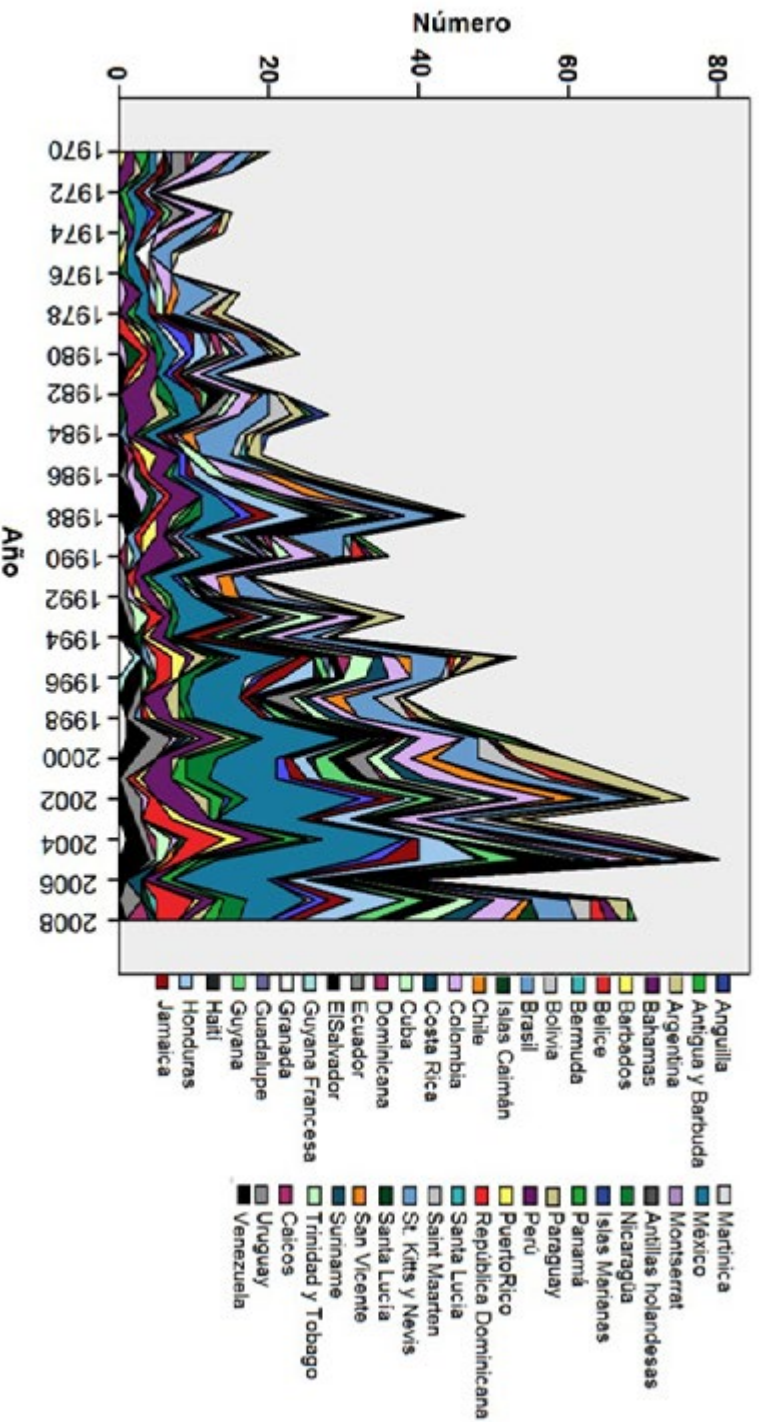
Detrás de este aumento en el tiempo en la frecuencia de desastres también están otros factores que le han acompañado y que muy probablemente contribuyen a pronunciar ese crecimiento, tales como:

- 1) El crecimiento poblacional;
- 2) La expansión territorial y densificación de los asentamientos humanos;
- 3) El aumento en el nivel de actividad económica, así como;
- 4) La creciente cobertura (de medios de comunicación, instituciones académicas, etc.) y registro de los desastres.

En contraparte, en algunas partes de la región existen otros factores que juegan en contra del aumento de los desastres, tales como:

- 1) El desarrollo de capacidades institucionales para la gestión de riesgos y, más concretamente, para la prevención de desastres, monitoreo y funcionamiento de sistemas de alerta temprana;
- 2) Las mejoras de infraestructura urbana y rural;
- 3) Una mayor planeación de asentamientos urbanos, así como;
- 4) Reducciones en los niveles de desigualdad social.

Figura 3. Frecuencia anual de desastres de origen climático en América Latina por país (CEPAL-CRED)



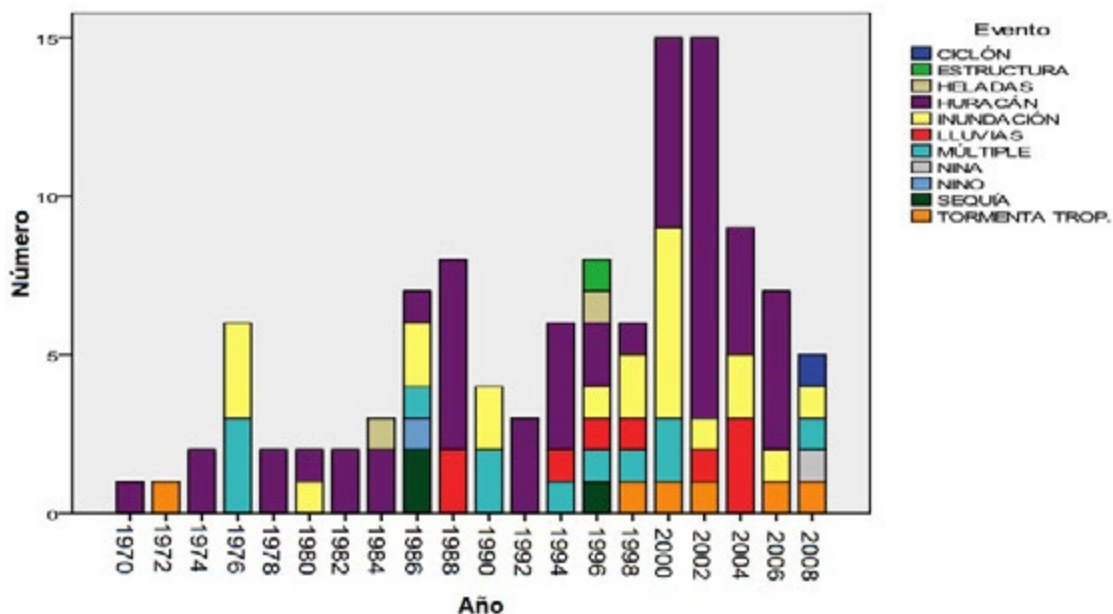
Fuente: Elaboración propia con datos de la Unidad de Evaluación de Desastres de la CEPAL (CEPAL, 2011) y de la División de Estadística de la CEPAL (CEPAL, 2012) y del EM-DAT (CRED, 2011).

El presente estudio analizó también las bases de datos de DesInventar (La Red) sin poder, desafortunadamente, integrar armonizada y coherentemente sus costos económicos con los estimados por la CEPAL y los concentrados por el CRED. A continuación, se describen brevemente las características de los datos de la CEPAL y del CRED.

i. CEPAL

La base de la CEPAL está integrada por exclusivamente desastres evaluados por esta Comisión. Esta base incluye 112 desastres de origen climatológico en 27 países de la región, ocurridos durante el período 1974-2008, con un marcado crecimiento durante la última década (ver Figura 4). Las evaluaciones de desastres realizadas por la CEPAL responden a las peticiones de los gobiernos nacionales, mismos que previamente han realizado una declaración oficial del desastre. Si bien lo anterior nos advierte del sesgo de esta base respecto de las peticiones gubernamentales de evaluación, ello también es indicador de la creciente necesidad de apoyo institucional para evaluar las pérdidas por parte de los gobiernos nacionales, derivada en buena medida del aumento de la frecuencia de eventos climatológicos extremos, corroborado por las fuentes analizadas a continuación.

Figura 4. CEPAL – Frecuencia de desastres de origen climático en América Latina



Fuente: Elaboración propia con datos de la Unidad de Evaluación de Desastres de la CEPAL (CEPAL, 2011) y de la División de Estadística de la CEPAL (CEPAL, 2012).

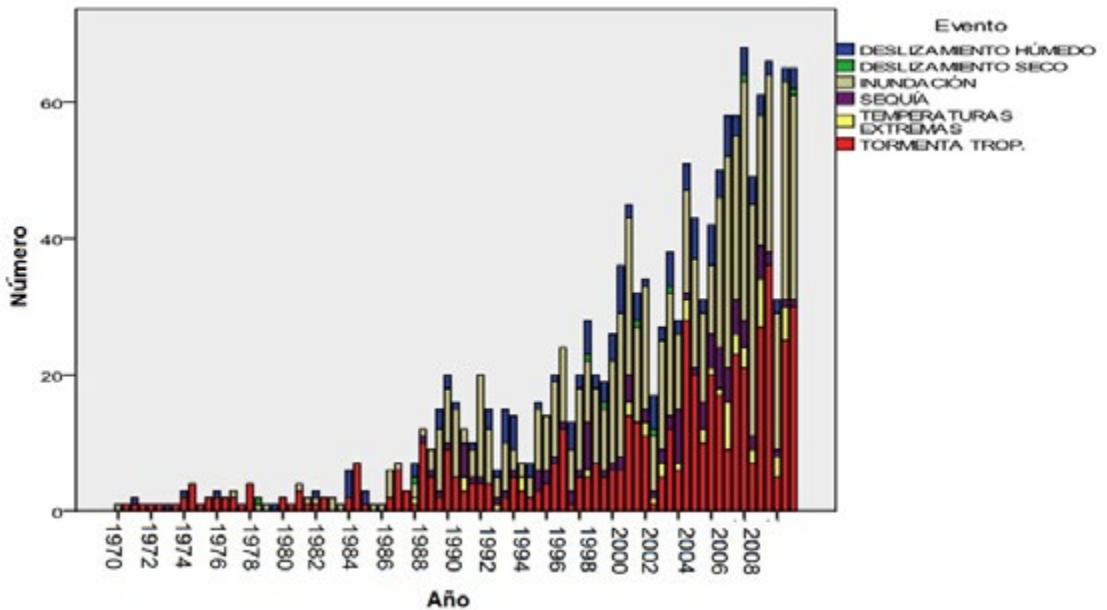
ii. CRED

La Base de Datos internacional de Desastres EM-DAT, administrada por el Centro para la Investigación de la Epidemiología de los Desastres (CRED 2011), está integrada por registros de desastre de diversas fuentes pero con una validación que se basa en los siguientes criterios que tuvieron que presentar los desastres registrados: i) ocasionar un número mayor de 10 muertos; ii) 100 personas afectadas, heridas o sin hogar; iii) ser un desastre significativo (ejemplo: peor desastre de

la década), y/o; iv) ocasionar declaración de estado de emergencia y/o solicitar ayuda internacional.

El período de registro abarcado por esta base es 1900-2008. Consta de 1,467 registros de desastre de origen climatológico en 46 países de la región. Como puede observarse en la Figura 5, la tendencia de los registros de esta base es notablemente ascendente.

Figura 5. CRED - Frecuencia de desastres de origen climático en América Latina

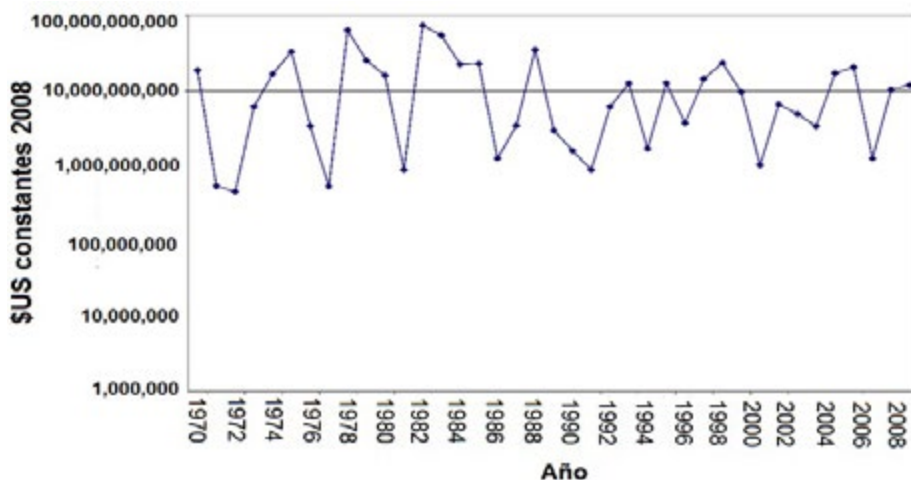


Fuente: Elaboración propia con datos del EM-DAT (CRED, 2011).

B. Costos económicos

Los costos económicos de los desastres climáticos que el presente analiza se construyeron con la contabilidad consolidada de los costos de los registros de la CEPAL y CRED. Para el valor del impacto económico se da preferencia a los registrados por la CEPAL por cuanto se basan en la aplicación sistemática de una misma metodología. La Figura 6, muestra la distribución anual observada de las pérdidas por desastres climáticos en América Latina y el Caribe a precios constantes del 2008. En 1975, 1978, 1982 y 1988 se observan notables incrementos en los costos de este tipo de desastres.

Figura 6. América Latina y el Caribe: Costo económico de desastres climáticos



Fuente: Elaboración propia con datos de la Unidad de Evaluación de Desastres de la CEPAL (CEPAL, 2011) y de la División de Estadística de la CEPAL (CEPAL, 2012) y del EM-DAT (CRED, 2011).

Históricamente, el costo económico estimado de los desastres en América Latina y el Caribe equivale al 0.34% del PIB de la región. Esta cifra corresponde al porcentaje que el promedio 1970-2008 a precios de 2008 de los costos económicos de los desastres climáticos ocupa dentro del PIB 2008 de la región.

Así, el costo promedio anual de los desastres climáticos asciende a 14,549 millones de USD durante los últimos 38 años a precios de 2008 (así como a 8,591 millones de USD durante el período 2000-2008). Debe aclararse que los registros de CEPAL y el CRED se centran en tan sólo los más grandes y costosos desastres de la región, el porcentaje estimado deja fuera los pequeños desastres.

Tabla 2. Costo promedio anual de desastres climáticos

	Costo promedio anual 1970-2008 (const. 2008), millones de USD	% PIB 2008	% costo LAC
Total LAC	14,549	0.34%	100.00%
Sub-total LA	12,906	0.31%	88.70%
Sub-total Caribe	1,511	2.56%	10.39%
Centroamérica	1,398	1.04%	9.61%
Andinos	2,823	0.64%	19.40%
Santa Lucía	213	20.87%	1.46%
Dominica	47	13.08%	0.32%
Brasil	3,917	0.25%	26.92%
México	1,750	0.16%	12.03%
Argentina	1,333	0.40%	9.16%

Fuente: Elaboración propia con datos de la Unidad de Evaluación de Desastres de la CEPAL (CEPAL, 2011) y de la División de Estadística de la CEPAL (CEPAL, 2012) y del EM-DAT (CRED, 2011).

Como se observa en la Tabla 2, existen notables diferencias entre sub-regiones en cuanto al peso relativo del costo de los desastres respecto del PIB. La sub-región comparativamente más afectada es el Caribe, con un costo equivalente al 2.56% de su PIB, seguida de Centroamérica (1.04%). Por su parte, los países Andinos¹⁷ presentan costos equivalentes al 0.64% de su PIB. En América Latina (excluyendo al Caribe) representa un 0.31%. El costo relativo de los desastres es entonces notablemente mayor en las pequeñas economías.

En el caso de Centroamérica, destacan los casos de Nicaragua y Honduras, con costos de desastres que rebasan el 120% y el 60% del PIB anual, respectivamente. En el caso del Caribe, destacan los valores alcanzados por Granada, St Kitts & Nevis, Dominica y Antigua & Barbuda, que presentan años cuyas pérdidas por desastres climáticos rebasan el 180%, 140% y 88% y 86% de sus respectivos PIB.

II. Análisis per-cápita y sectorial

Si bien los costos de estos desastres en las tres economías más grandes de la región, Brasil, México y Argentina, en su conjunto concentran prácticamente la mitad de las pérdidas históricas de la región, estos costos en ninguno de los tres países rebasan el medio punto porcentual de sus respectivos PIB.

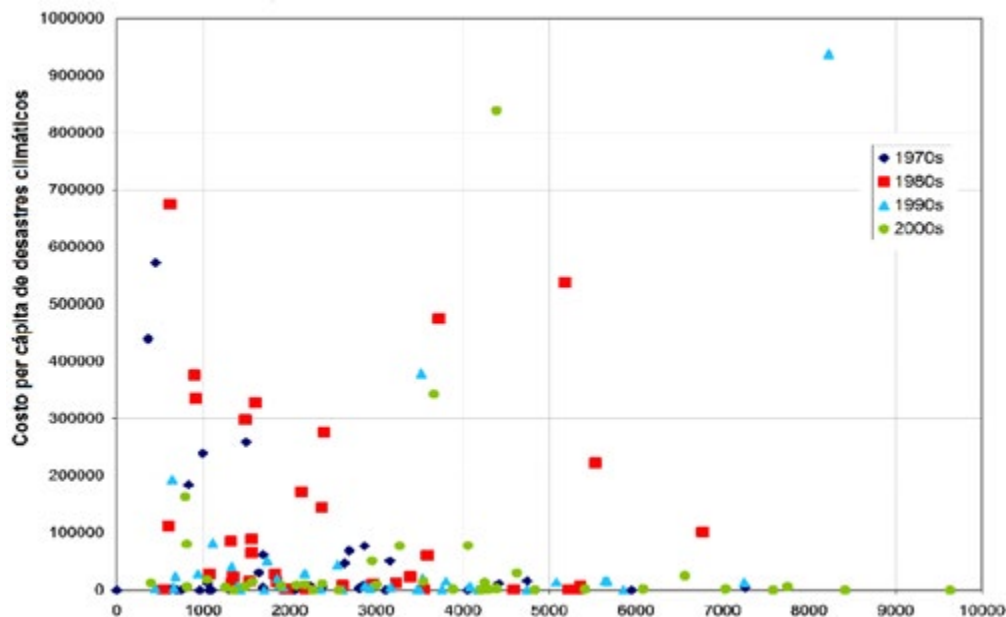
i. Costos per cápita

Los países que han visto aumentados sus costos económicos por desastres climáticos han registrado también un menor crecimiento en su PIB *per cápita* al cabo de las últimas cuatro décadas en la región. De acuerdo a los datos analizados, el costo de los desastres por habitante

17 Bolivia, Colombia, Ecuador y Perú.

decrece en la región a medida que el ingreso *per cápita* ha aumentado. La Figura 7 muestra, en general, una relación negativa entre PIB *per cápita* y el costo *per cápita* de los desastres.

Figura 7. América Latina y el Caribe: PIB y Costo *per cápita* de desastres climáticos (promedio anual, dólares constantes 2000)

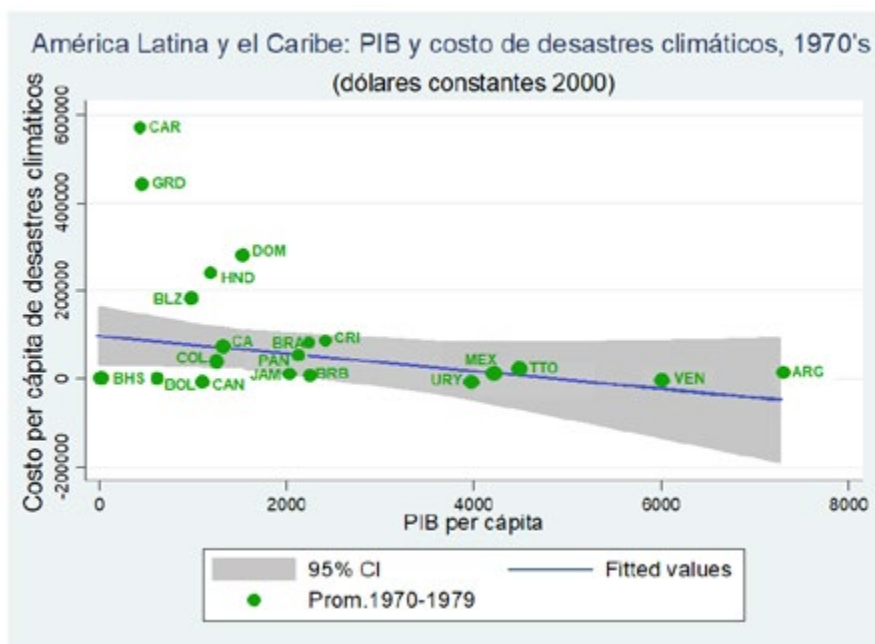


Fuente: Elaboración propia con datos de la Unidad de Evaluación de Desastres de la CEPAL (CEPAL, 2011) y de la División de Estadística de la CEPAL (CEPAL, 2012) y del EM-DAT (CRED, 2011).

El costo económico por habitante de los desastres, relativo al PIB *per cápita*, presentaba una marcada relación negativa durante los 1970s y 1980s, sugiriendo que los países de ingresos bajos y medios registraron los mayores costos por desastres. Lo anterior puede observarse en las siguientes Figuras 8 y 9, de trazo de puntos que representan valores

promedio de cada país de la región durante la década correspondiente, así como el trazo lineal de los valores ajustados de las observaciones. Los trazos lineales de valores ajustados incluyen predicciones lineales con intervalos de confianza del 95%.

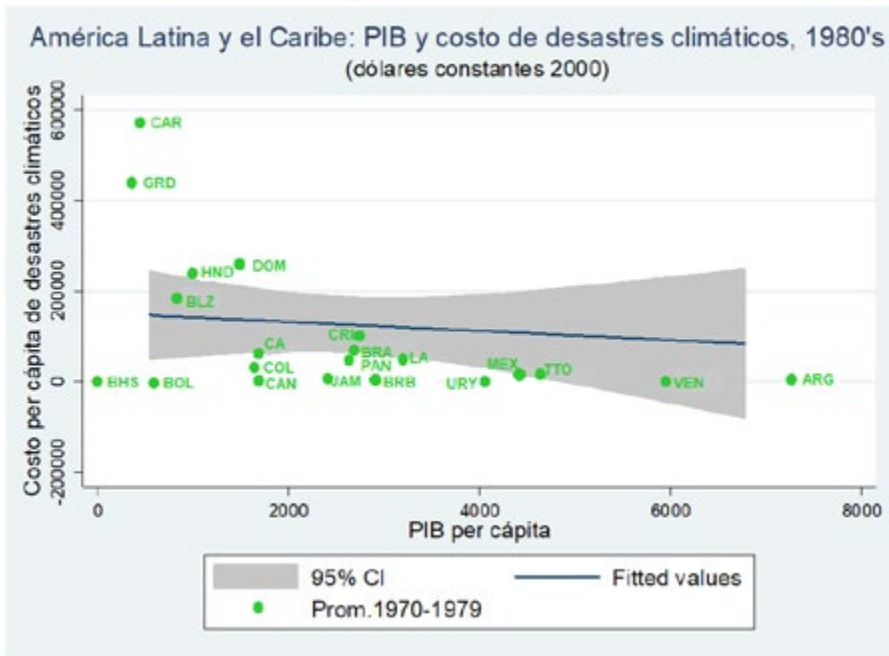
Figura 8. América Latina y el Caribe: PIB y costo de desastres climáticos, 1970's (dólares constantes 2000)



Fuente: Elaboración propia con datos de la Unidad de Evaluación de Desastres de la CEPAL (CEPAL, 2011) y de la División de Estadística de la CEPAL (CEPAL, 2012) y del EM-DAT (CRED, 2011).

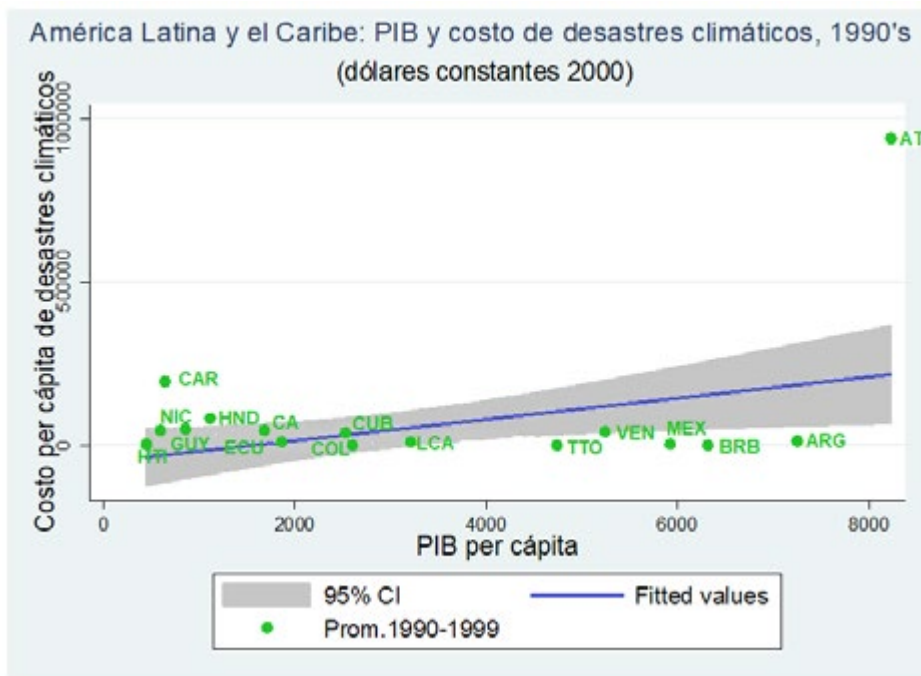
A diferencia de las dos décadas previas, en los 1990s y en la presente década las pérdidas por desastres se distribuyen más horizontalmente. Lo anterior sugiere que al cabo del tiempo los países de ingresos bajos y medios de la región han reducido los altos costos (Figuras 10 y 11).

Figura 9. América Latina y el Caribe: PIB y costo de desastres climáticos, 1980's (dólares constantes 2000)



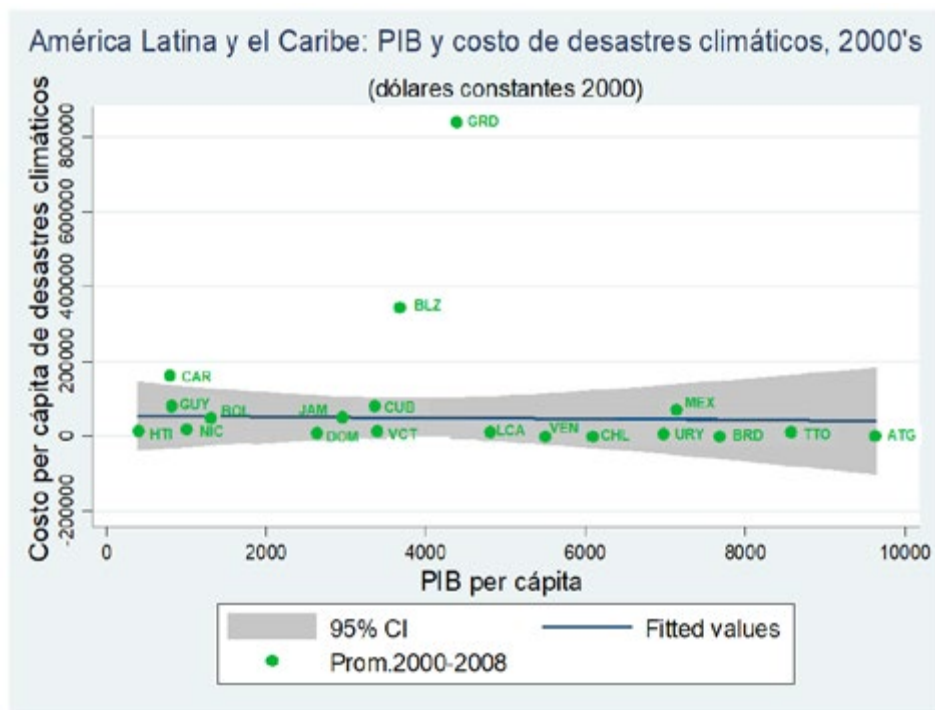
Fuente: Elaboración propia con datos de la Unidad de Evaluación de Desastres de la CEPAL (CEPAL, 2011) y de la División de Estadística de la CEPAL (CEPAL, 2012) y del EM-DAT (CRED, 2011).

Figura 10. América Latina y el Caribe: PIB y costo de desastres climáticos, 1990's (dólares constantes 2000)



Fuente: Elaboración propia con datos de la Unidad de Evaluación de Desastres de la CEPAL (CEPAL, 2011) y de la División de Estadística de la CEPAL (CEPAL, 2012) y del EM-DAT (CRED, 2011).

Figura 11. América Latina y el Caribe: PIB y costo de desastres climáticos, 2000's (dólares constantes 2000)



Fuente: Elaboración propia con datos de la Unidad de Evaluación de Desastres de la CEPAL (CEPAL, 2011) y de la División de Estadística de la CEPAL (CEPAL, 2012) y del EM-DAT (CRED, 2011).

Sin embargo, estos resultados varían notablemente de país a país. La siguiente Tabla 3, presenta una clasificación de los países de la región –de los cuales se cuenta con información homogénea– de acuerdo a: i) el cambio en los costos *per cápita* de los desastres entre los años 1970's y del período 2000-2008–mismo que, por simplicidad, en adelante llamaremos años 2000's, y; ii) su crecimiento del

PIB *per cápita* entre los mismos períodos –se considera país de alto crecimiento a aquel cuyo PIB *per cápita* creció por encima del 30% entre estas dos décadas.

Destacan los casos de países que han aumentado sustancialmente su PIB *per cápita* a la vez que reducido notoriamente los costos asociados a desastres climáticos, tales como Barbados, Brasil, Colombia, Costa Rica, Panamá, República Dominicana, Trinidad y Tobago y la sub-región Caribe (CAR). El caso opuesto lo representan Argentina, Bolivia, Ecuador, El Salvador, Guatemala, Guyana, Haití, Jamaica, Nicaragua, Venezuela, así como las sub-regiones Andina (CAN) y Centroamérica (CAM), países que han tenido bajo crecimiento económico *per cápita* y un creciente costo económico *per cápita* por desastres climáticos.

Los casos intermedios los constituyen el resto de los países de la región: México y la región en su conjunto (ALC) se sitúan en el cuadrante de aumento de costos de desastres climáticos y alto crecimiento del PIB; el cuadrante de reducción de costos con bajo crecimiento se encuentra vacío, sugiriendo que no existe país de bajo crecimiento económico de la región que haya logrado reducir el costo de los desastres de origen climático.

Tabla 3. Cambios *per cápita* en los costos de desastres climáticos y PIB, 2000's respecto de 1970's (dólares constantes de 2000)

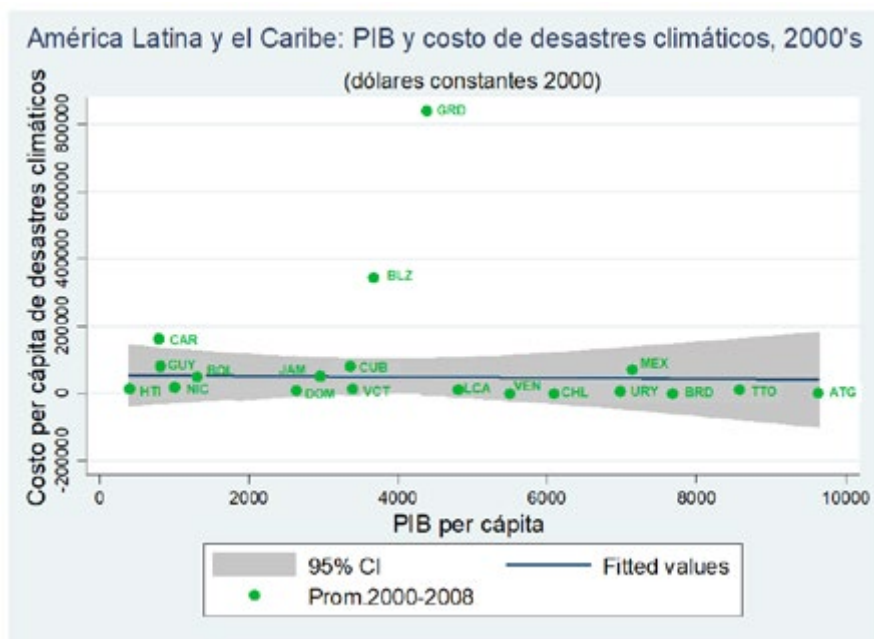
	Reducción costo desastres climáticos	Aumento costo desastres climáticos
Alto crecimiento PIB	Barbados Brasil Chile Colombia Costa Rica Panamá Rep. Dominicana Trinidad y Tobago CAR	Belice Granada México San Vicente y las Granadinas Santa Lucía Surinam Uruguay ALC
Bajo crecimiento PIB		Argentina Bolivia Ecuador El Salvador Guatemala Guyana Haití Honduras Jamaica Nicaragua Venezuela CAN CAM

Fuente: Elaboración propia con datos de la Unidad de Evaluación de Desastres de la CEPAL (CEPAL 2011) y de la División de Estadística de la CEPAL (CEPAL 2012) y del EM-DAT (CRED 2011).

Lo anterior también puede interpretarse en el sentido inverso, esto es, que el aumento en el costo de los desastres climáticos, combinado con otros factores estructurales, impide en su conjunto que el país crezca significativamente. Buena parte de la literatura de modelaje económico de desastres provee resultados que sugieren que ello es particularmente válido en economías pequeñas (Raddatz 2009, Ramcharan, 2007, entre otros).¹⁸ Las relaciones de la Tabla 3 se ilustran con más precisión en las siguientes Figuras 12 y 13 de flechas de pares coordinados, el primero de los cuales presenta la fotografía completa de la región, mientras el segundo hace un acercamiento que permite apreciar mejor la mayoría de los casos una vez dejados fuera los casos extremos.

18 A estos resultados llega Raddatz (2009) con base en un modelo de panel autorregresivo de rezagos distribuidos. En sus resultados, este modelo identifica efectos negativos moderados pero significativos de los desastres en el crecimiento del PIB real de economías en vías de desarrollo. El impacto es marcadamente mayor en el PIB real de las economías pequeñas expuestas a tormentas tropicales y huracanes, así como en el caso de las sequías para todo tamaño de países.

Figura 12. América Latina y el Caribe: PIB y costo de desastres climáticos (dólares constantes 2000)



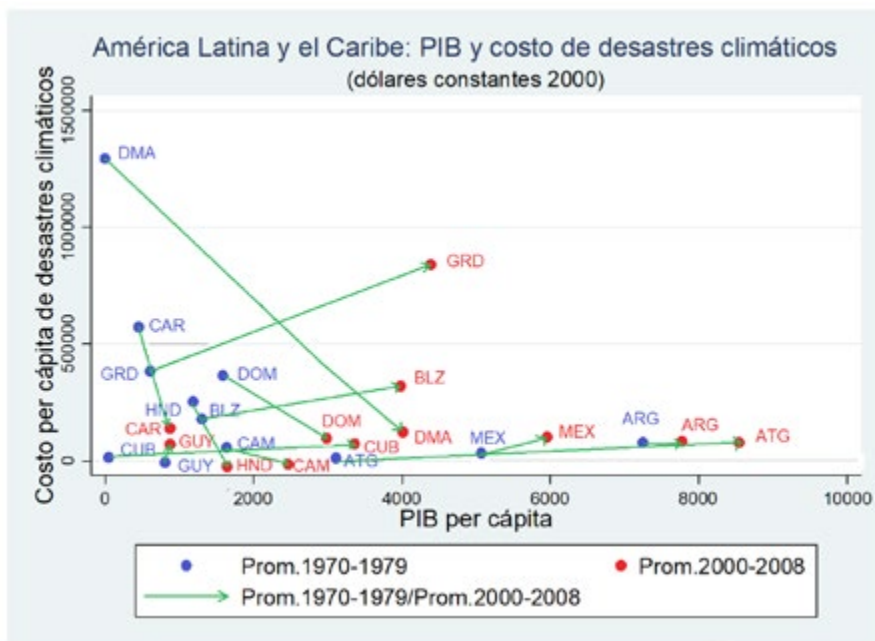
Fuente: Elaboración propia con datos de la Unidad de Evaluación de Desastres de la CEPAL (CEPAL 2011) y de la División de Estadística de la CEPAL (CEPAL 2012) y del EM-DAT (CRED 2011).

Los casos extremos los representan Dominica y Granada; mientras el PIB de la primera creció sustancialmente a la vez de reducir notablemente sus costos de desastres climáticos, la segunda creció, pero también aumentó notablemente los costos de dichos desastres.

Similares cambios se observan también en la Figura 13, en el que destacan los casos de Guyana (GUY) y Jamaica (JAM), que sin, prácticamente, aumentar su PIB *per cápita* al cabo de estas décadas, muestra un drástico aumento en el costo de estos desastres. Algo dis-

tinto sucede con Brasil (BRA), Costa Rica (CRI), Colombia (COL) y Panamá (PAN), que con aumentos moderados de su PIB *per cápita* lograron grandes reducciones de sus costos de desastres climáticos.¹⁹

Figura 13. América Latina y el Caribe: Cambios en PIB y costo de desastres climáticos (dólares constantes 2000)



Fuente: Elaboración propia con datos de la Unidad de Evaluación de Desastres de la CEPAL (CEPAL 2011) y de la División de Estadística de la CEPAL (CEPAL 2012) y del EM-DAT (CRED 2011).

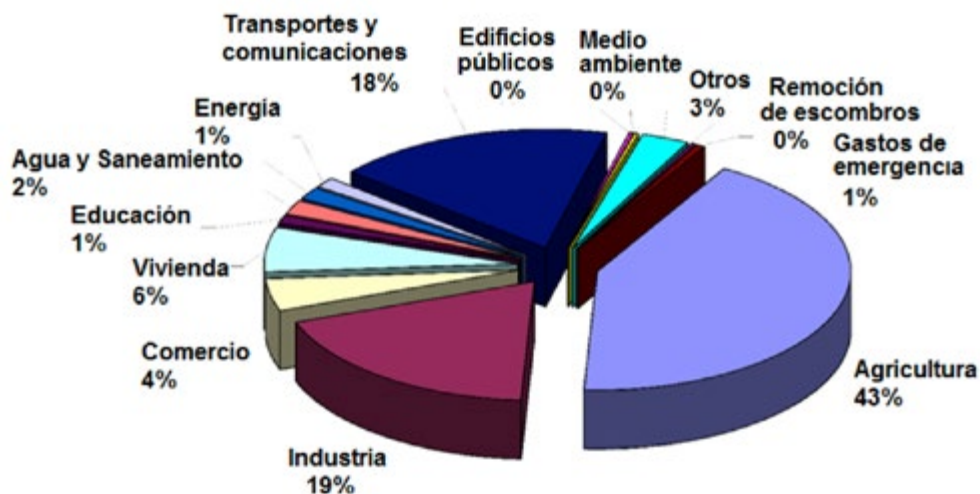
19 El caso de Cuba muestra un gran cambio. Sin embargo, este cambio puede ser aparente debido a la ausencia de datos de línea de base.

Así, a medida que unos países de la región sigan incurriendo en costos crecientes por desastres climáticos y bajo crecimiento económico mientras que otros reduzcan dichos costos a la vez de aumentar su crecimiento económico, se seguirá entonces agrandando la brecha de crecimiento en América Latina y el Caribe. Ello demanda entonces una mayor subsidiariedad entre uno y otro bloque de países en materia de desastres.

ii. Costos sectoriales

La afectación mayor se concentra en el sector productivo primario, como lo refleja la composición del impacto registrado por CEPAL a lo largo de las últimas cuatro décadas, ver Figura 14. Los sectores agrícola, industrial, de transportes y comunicaciones concentran 80% de los costos de los desastres climatológicos en la región.

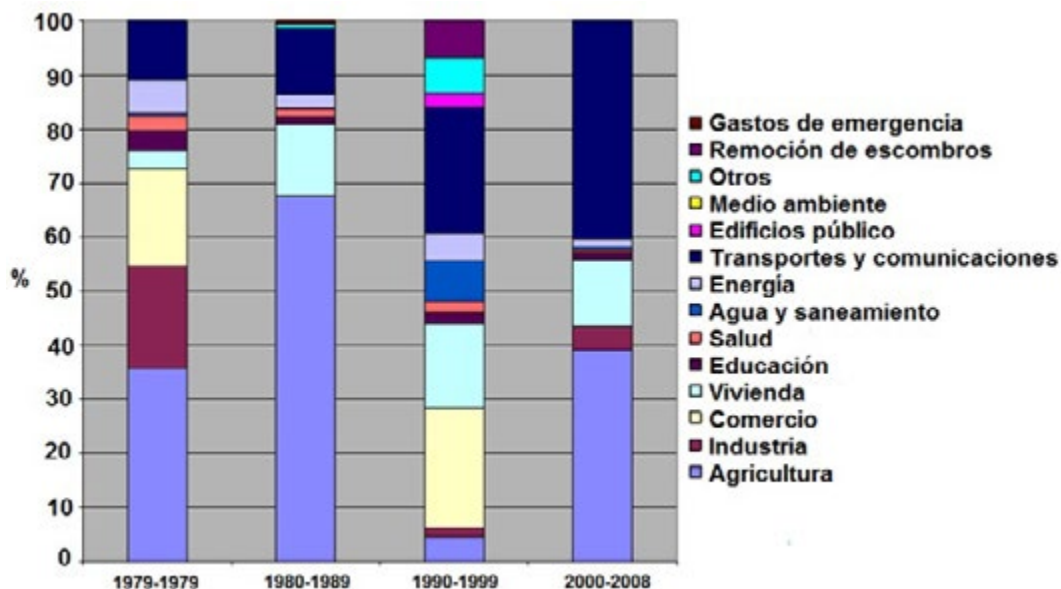
Figura 14. América Latina y el Caribe: Distribución del impacto por sectores 1970-2008



Fuente: Elaboración propia con datos de la Unidad de Evaluación de Desastres de la CEPAL (CEPAL 2011) y de la División de Estadística de la CEPAL (CEPAL 2012) y del EM-DAT (CRED 2011).

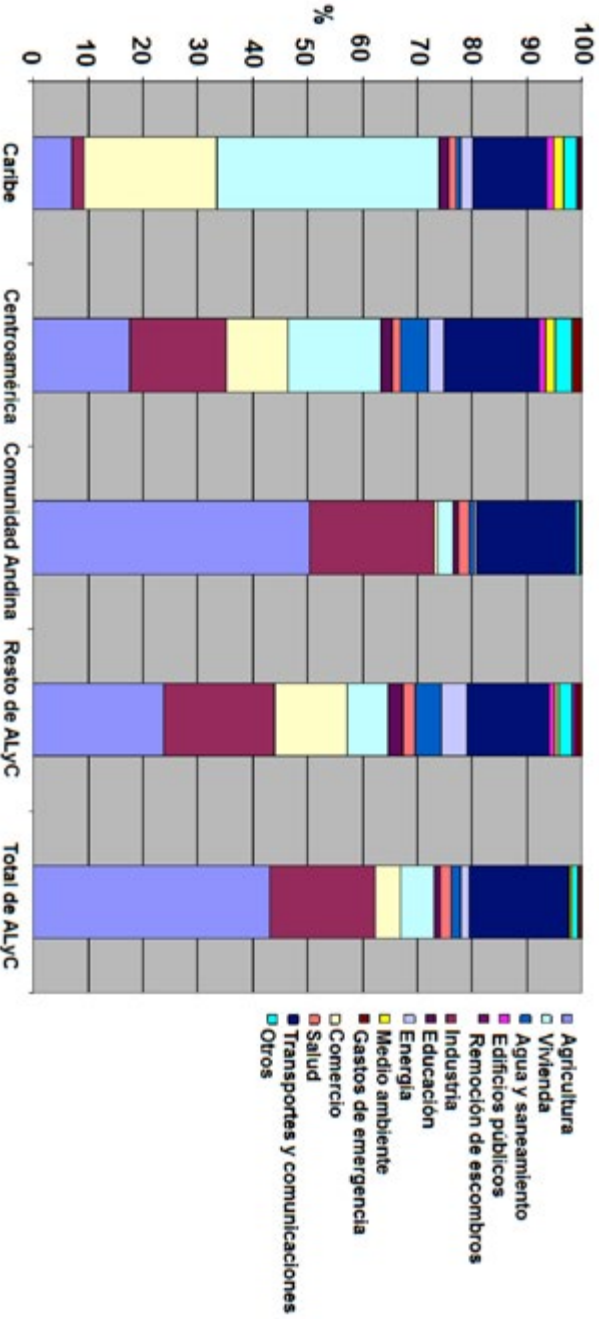
La composición sectorial del costo de los desastres climáticos muestra variaciones tanto a lo largo del tiempo (Figura 15) como entre subregiones (Figura 16). Así, mientras el sector transportes y comunicaciones ha ido aumentando su participación relativa dentro la estructura sectorial de costos de los desastres climáticos, los costos en el sector agrícola se redujeron durante los 1990s para después retornar a su alto valor. Por su parte, mientras que el costo de los desastres climáticos en los países de la Comunidad Andina se ha concentrado más fuertemente en el sector agrícola, en el Caribe se han concentrado predominantemente en los sectores vivienda y comercio. Ello en virtud de la estructura económica inherente a las economías comprendidas dentro de estas regiones.

Figura 15. Composición del impacto de desastres climáticos por sectores, 1970-2008



Fuente: Elaboración propia con datos de la Unidad de Evaluación de Desastres de la CEPAL (CEPAL 2011) y de la División de Estadística de la CEPAL (CEPAL 2012) y del EM-DAT (CRED 2011).

Figura 16. Composición del impacto de desastres climáticos por subregiones, 1970-2008



Fuente: Elaboración propia con datos de la Unidad de Evaluación de Desastres de la CEPAL (CEPAL 2011) y de la División de Estadística de la CEPAL (CEPAL 2012) y del EM-DAT (CRED 2011).

CONCLUSIONES, RETOS Y SUGERENCIAS

Como se analizó en el presente capítulo, el peso económico de los desastres ha aumentado tanto en términos absolutos como respecto a su peso relativo en las economías de América Latina y el Caribe. Para las regiones del Caribe y Centroamérica dicho peso es comparativamente mayor.

El análisis de datos del presente capítulo señala que los países que han visto aumentados sus costos económicos por desastres climáticos han registrado también un menor crecimiento en su PIB *per cápita* al cabo de las últimas cuatro décadas en la región. Se ratifica entonces la noción generalizada de que hay una relación inversa entre el peso relativo de los desastres en un país y el tamaño y grado relativo de desarrollo y diversificación de dicho país.

Conclusiones significativas del análisis son que si bien la recurrencia e intensidad de eventos extremos del pasado y las tendencias de los escenarios climáticos existentes no nos permiten estimar con certidumbre coeficientes para predecir incrementos en recurrencia, intensidad y costo de los desastres, la acumulación de otros factores como la presión demográfica, la degradación ambiental, los patrones de asentamientos humanos y las inversiones productivas con mayor valor agregado sin apropiada internalización de la valoración del riesgo y su reducción, advierten que los costos tanto privados como sociales sólo se verán agravados en el tiempo.

Todo ello, justifica ampliamente la necesidad de realizar cambios de políticas, generar instrumentos económicos y realizar cambios tecnológicos importantes para la reducción del riesgo en el contexto de la adaptación a escenarios de cambio climático. Se hace entonces evidente una convergencia entre las agendas de la reducción del riesgo a desastres y la adaptación al cambio climático. En ambas el denominador común es la resiliencia incrementada.

La falta de resiliencia es mayor en las economías más pequeñas, con menores grados de diversificación y desarrollo, con territorios peque-

ños y más expuestos –como los países y territorios insulares– y con altas tasas de recurrencia de eventos extremos y desastres. Asimismo, en términos sociales tal falta de resiliencia se concentraría en los grupos sociales de menores ingresos, siendo una observación empírica que los efectos sociales de los desastres llevan al incremento de la pobreza y a la postergación de metas del desarrollo. Por lo tanto, medidas de adaptación y gestión del riesgo deben verse como sinérgicas, como medidas no postergables y parte de toda estrategia de desarrollo sustentable que tenga como metas la mayor equidad y convergencia tanto entre estratos sociales como entre países.

Ante la insuficiente información climática disponible para pronosticar incrementos en intensidad de eventos extremos –así como de su costo económico– es necesario avanzar en la investigación sobre la relación entre eventos climáticos extremos, tendencias climáticas de largo plazo y desastres.

En cuanto a los sectores económicos, se requieren inversiones y créditos para el desarrollo de infraestructura para la reducción del riesgo de desastre. Aún cuando no sabemos con certidumbre en dónde y en qué magnitud golpeará el próximo desastre, los registros existentes son argumento suficiente para realizar las inversiones pertinentes en las zonas históricamente más afectadas. Ello es especialmente crucial para la economía rural, la cual sigue estando muy expuesta al cambio climático.

El hecho de que históricamente han sido las inundaciones (provocadas por huracanes, tormentas, fuertes lluvias, entre otros) la principal causa de desastres climáticos en la región, combinado con el pronóstico del advenimiento de huracanes y tormentas tropicales más intensos –discutido en la tercera sección del presente trabajo–, es crucial realizar obras públicas para reducir el impacto negativo de estos eventos. Tales obras incluyen infraestructura hidráulica como es el caso de drenajes profundos en las zonas urbanas, represas, canales de drenaje, diques, entre otros.

En el caso de la sequía, es necesario formularse la siguiente pregunta a todos los niveles (nacional, subnacional, comunidad e individual): ¿es posible cambiar a alguna actividad económica alterna que al menos genere el mismo nivel de ingresos netos pero que implique una disminución sustantiva en el consumo de agua? Las inversiones tanto en infraestructura hidráulica como en reconversión productiva deben, en todo caso, someterse a un análisis costo-beneficio local, tal que compare el beneficio neto de la obra una vez internalizadas las condiciones futuras económicas y medioambientales.

A pesar de que —por falta de investigación y de estudios de caso— este documento no abarca la complejidad latinoamericana, consideramos que provee algunos elementos comunes a la región, dadas ciertas condiciones humanas y ambientales similares.

Actualmente, el manejo del riesgo y la prevención de desastres en la mayoría de los países de América Latina y el Caribe deben sobreponerse a las barreras institucionales y tecnológicas para su operación óptima. La investigación futura debe centrar sus esfuerzos en analizar las barreras y oportunidades que esas medidas de adaptación representan, particularmente porque las nuevas políticas y tecnologías requieren considerar las condiciones de cambio global futuro.

BIBLIOGRAFÍA

- Briguglio L. (2002). *The Economic Vulnerability of Small Island Developing States. In: Sustainable Development for Island Societies: Taiwan and the World*. Taiwan: Asia Pacific Research Program w/SARCS Secretariat Publication.
- Briguglio L. (1992). *Preliminary study on the construction of an Index for ranking countries according to their economic vulnerability*. New York: UNCTAD.
- CEPAL (2011). *Base de datos de desastres de la Unidad de Evaluación de Desastres de la CEPAL*. Santiago de Chile: CEPAL.
- CEPAL (2012). *Banco de Datos de la División de Estadística de la CEPAL*. Santiago de Chile: CEPAL.
- CEPAL (2003). *Manual para la Evaluación del Impacto Socioeconómico y Ambiental de los Desastres*. Santiago de Chile: CEPAL.
- CRED (2011). *The Emergency Events Database (EM-DAT)*. Center for Research on the Epidemiology of Disasters. Brussels: CRED.
- Dille M., Boudreau T. E. (2001). Coming to terms with vulnerability: a critique of the food security definition. *Food Policy* (pp. 229-247). Vol. 26. Issue 3.
- EIRD (2005). *Marco de Acción de Hyogo para 2005-2015: Aumento de la resiliencia de las naciones y las comunidades ante los desastres. Conferencia Mundial sobre la Reducción de los Desastres. Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres*. Kobe: EIRD.
- García V. (2005). El riesgo como construcción social y la construcción social del riesgo. *Revista de Antropología Social*. México: CIESAS.
- IPCC-WGII (Intergovernmental Panel on Climate Change, Working Group II) (2007). Working Group II Contribution to the Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report Climate Change 2007: *Climate Change Impacts, Adaptation and Vulnerability. Summary for Policymakers*. Postdam: IPCC, Cambridge Press.

- Prebisch R. (1950). *The economic development of Latin America and its principal problems*. New York: United Nations Press.
- Prebisch R. (1973), *La cooperación internacional en la política de desarrollo latinoamericano*, Serie Conmemorativa del XXV Aniversario de la CEPAL, Santiago de Chile, CEPAL.
- Raddatz C. (2009). *The Wrath of God: Macroeconomic Costs of Natural Disasters*. Working paper. Washington: World Bank.
- Ramcharan R. (2007). Does the exchange rate regime matter for real shocks? evidence from windstorms and earthquakes. *Journal of International Economics* (31-47). Vol. 73. Issue 1.
- Rodríguez O. (1980). *La teoría del subdesarrollo de la CEPAL*. México: Siglo XXI.
- Sen A. (1981). *Poverty and famines: An essay on entitlement and deprivation*. Oxford: Oxford University Press.
- Stern N. (2007). *The Economics of Climate Change: The Stern Review. Part II. The Impacts of Climate Change on Growth and Development*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Todaro M.P. (1982). *Economics for a Developing World. Second edition*. Essex, UK: Longman Group Limited.
- Turner B.L. (2003). A Framework for Vulnerability Analysis in Sustainability Science (pp.8074-8079). Vol. 100. Issue 14.
- UNCTAD (2001). *Third United Nations Conference on the Least Developed Countries, Brussels, Belgium. Programme of Action for the Least Developed Countries*. Adopted by the Third United Nations Conference on the Least Developed Countries. Brussels: UNCTAD.

SECCIÓN II

ESTRATEGIAS DE MITIGACIÓN PARA EL COMBATE DEL CAMBIO CLIMÁTICO

CAPÍTULO 4

El mercado de bonos de carbono en México: Realidad y perspectivas de desarrollo

Samuel Rosas-Reyes²⁰

Fabiola S. Sosa-Rodríguez²¹

INTRODUCCIÓN

En México prevalecen condiciones de alta vulnerabilidad ante el cambio climático. La información sobre los impactos climáticos históricos y las tendencias socioeconómicas, aunada a los fenómenos actuales de industrialización y urbanización, así como el uso indiscriminado y el consecuente deterioro de los recursos naturales, entre otros, representan un problema ambiental, social y económico que se agudizará por los efectos del cambio climático. En ese contexto, la adaptación debe ser un componente central de cualquier esfuerzo de combate al cambio climático. Respecto a la emisión de CO₂, México contribuyó en 2011 con un 1.5% del total de las emisiones globales derivadas principalmente de la quema de combustibles fósiles. De acuerdo con estas cifras, México es el décimo segundo país con mayores emisiones del mundo (World Resources Institute, 2014).

Pese a que podría decirse que nuestra contribución no es significativa, si se compara con la de los grandes emisores, México debe tener responsabilidad global, convencido de que el desarrollo económico

²⁰ Egresado de la Licenciatura en Economía de la Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco.

²¹ Profesora-Investigadora en la Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco. Correo de contacto fssosa@gmail.com

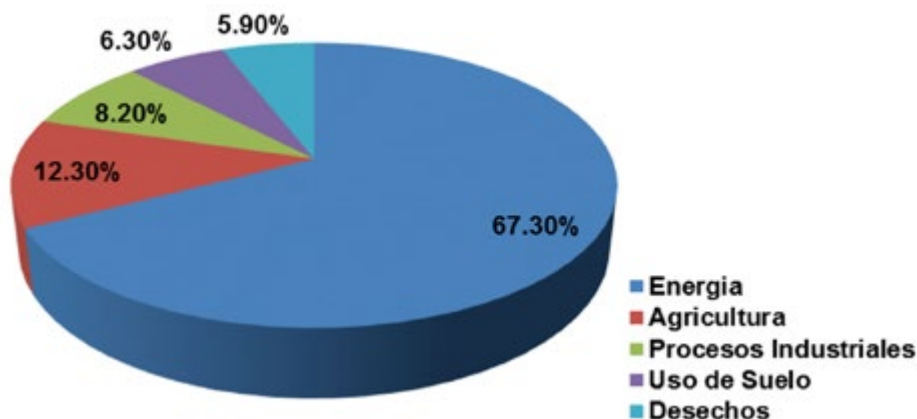
puede y debe alcanzarse mientras se protege al medio ambiente, por ser éste un bien público y ambiental del que dependemos todos los países del mundo (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2007). Este capítulo aborda la situación del desarrollo de los bonos de carbono en México, y de cómo los funcionan los instrumentos económicos aplicables a la problemática ambiental.

LOS GASES DE EFECTO INVERNADERO Y LOS INSTRUMENTOS DE MITIGACIÓN

Las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) para el año 2010 tuvieron un incremento del 33.4% con respecto al año base 1990, con una Tasa de Crecimiento Media Anual (TCMA) de 1.5%. En 2010 la contribución de las emisiones de los GEI de las diferentes categorías en términos de CO₂ equivalente se muestra en la Figura 1.

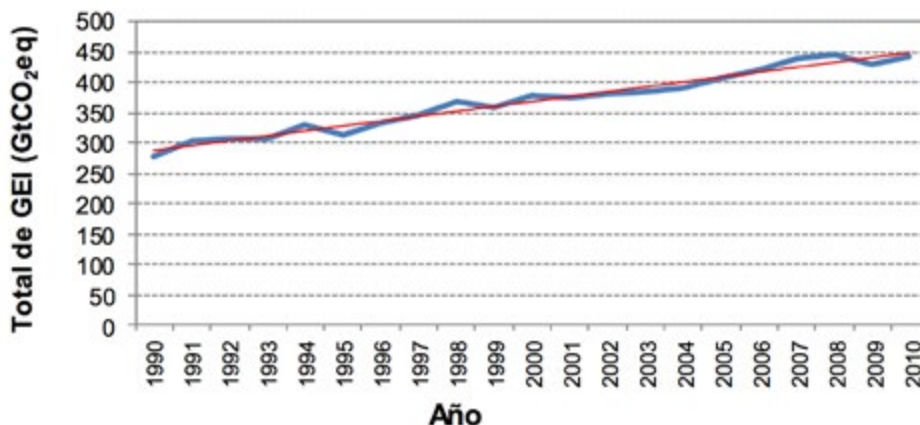
Los sectores con mayor contribución porcentual de emisiones de CO₂ en el 2010 son: transporte, 31.1%; generación eléctrica, 23.3%; manufactura y construcción, 11.4%; consumo propio de la industria energética, 9.6%; conversión de bosques y pastizales, 9.2%; y otros (residencial, comercial y agropecuario), 6.7%. Como puede observarse, cinco de las fuentes de emisión pertenecen al consumo de combustibles fósiles (1A) de la categoría Energía, y aportan 82.1% del total de CO₂ a la atmósfera (INECC, 2012).

Figura 1. Contribución de las emisiones de los GEI de las diferentes categorías en términos de CO₂ para el 2010



Fuente: Elaboración propia con datos de INECC (2012). Quinta Comunicación Nacional ante La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. INECC, México.

En la Figura 2, se puede deducir un potencial crecimiento de las emisiones de GEI en nuestro país en los años venideros, debido a la cada vez mayor capacidad productiva de México. Asimismo, cabe destacar que en el periodo de 1990-2010, el país experimentó una serie de transformaciones en términos económicos y sociales. Entre ellos, el cambio de modelo económico hacia un adelgazamiento del Estado, lo que significó un menor control gubernamental sobre las actividades productivas y los precios. En este contexto, algunas actividades sociales y económicas que contribuyen de manera importante a las emisiones de GEI experimentaron cambios sustanciales.

Figura 2. Tendencia de las emisiones de México, 1990-2010

Fuente: Elaboración propia con datos del World Resources Institute (WRI) 2014.

Pese a los esfuerzos realizados por los gobiernos en turno, el uso de instrumentos económicos para la mitigación ambiental ha sido deficiente, la implementación de políticas de comando y control ha dominado la política ambiental nacional.

Los instrumentos económicos constituyen una categoría más de los instrumentos de regulación ambiental, en teoría pueden utilizarse como complemento o sustituto de otras categorías como lo son los instrumentos de regulación directa.

En la práctica, los instrumentos económicos en la legislación ambiental se han utilizado para complementar los marcos regulatorios existentes.

En la discusión actual, existe un creciente consenso sobre una mayor aplicación de instrumentos económicos, ya que la flexibilidad que ofrecen permite a los agentes minimizar sus costos para cumplir con la regulación, y por ende, también la sociedad minimiza los costos totales en los que incurre para mitigar el daño ambiental. Por ello, resulta relevante el estudio de los instrumentos económicos que han resultado

exitosos en otras partes del mundo, ampliando el abanico de posibilidades para que tanto el Estado como los distintos agentes económicos puedan contribuir a la reducción de emisiones.

REGULACIÓN AMBIENTAL

Hacia finales de la década de 1960 y principios de la de 1970 se empezó a discutir sobre el uso desmedido de los recursos medioambientales en actividades de producción y de consumo las cuales llevarían al deterioro del medio ambiente y a la explotación desmedida de los recursos naturales, es entonces que, en 1972, la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) adoptó el principio de “El que contamina paga”. Este principio representa el eje central de la economía ambiental que considera la inclusión del costo de la contaminación, lo cual ha motivado al interés mundial a utilizar los llamados instrumentos económicos.

El principio del que contamina paga implica que el costo de los bienes y servicios del mercado deben reflejar su costo social total, resultado de la suma del costo de producción y el costo ambiental. Cuando una industria descarga sustancias contaminantes en el ambiente, los recursos naturales se convierten en un factor de la producción en la medida en que los recursos ambientales no son tomados en cuenta dentro del sistema de precios; por lo tanto, cuando se asume que su depreciación no tiene costo, éstos son deteriorados. Por esta razón, los costos externos deben ser interiorizados en las decisiones de producción de las empresas.

Para ello, se requiere tener la información necesaria en cantidad y calidad que permita establecer tanto la vinculación de la actividad productiva con el daño, así como el costo por no producir ese daño. Por tanto, de manera teórica y práctica, dicho principio no resulta de fácil aplicación dada la dificultad para establecer y demostrar científicamente la relación de causalidad, así como de la evaluación del daño ambiental.

El principio del que contamina paga, no fue el único considerado en la toma de decisiones para mitigar el daño al medio ambiente. En

la Declaración de Río de Janeiro, aprobada por la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, en junio de 1992, también se consagró el Principio Precautorio, en donde se estipula que los Estados deberían aplicar ampliamente el criterio de precaución conforme a sus capacidades, por lo tanto cuando haya peligro de daño grave e irreversible, la falta de certeza científica absoluta no deberá utilizarse como razón para postergar la adopción de medidas eficaces en función de los costos para impedir la degradación del medio ambiente.

La economía llegó bastante tarde al debate ambiental, en un primer momento, este estuvo dominado por especialistas provenientes del campo de la biología, la física y la química, y la implementación práctica a cargo de médicos, ingenieros y abogados.

Esto no tiene nada de malo en sí mismo, excepto por la tendencia a resolver los problemas sin considerar los costos de oportunidad envueltos en las decisiones de mejorar el ambiente. Es así como las primeras décadas de política ambiental estuvieron dominadas por los enfoques administrativos de control, con un fuerte énfasis en restricciones, prohibiciones y estándares, que en la mayoría de los casos eran muy rígidos, llegando incluso a la fijación de estándares a procesos y tecnologías al interior de las empresas (INECC, 2012).

Por otra parte, el pensamiento económico neoclásico imperante hacia principios del siglo XX, el cual incorporó el enfoque del análisis marginal, se adecuaba perfectamente a la investigación de precios y estructuras de mercado, que desde ese entonces giraba en torno a la política ambiental (Butze, 2006). Dentro de esta corriente de pensamiento, al economista británico Arthur Pigou se le atribuye por una parte, la primera discusión, en 1920, del uso de los instrumentos económicos en política ambiental y, por otra, ser el primero en introducir la idea de “externalidad óptima” (Pigou, 2001).

Según la teoría económica basada en la microeconomía, el problema del medio ambiente, específicamente la contaminación, es un caso

típico de externalidad negativa que puede ser también denominada de “costo externo”.

Para que esto ocurra, dos condiciones han de ser observadas:

- 1) La actividad de un agente (contaminante) causa una pérdida de bienestar en otro agente.
- 2) Esta pérdida de bienestar no es compensada, la víctima no recibe una compensación equivalente al valor de los daños sufridos (Baumol y Oates, 1975).

De manera convencional se acepta que existe una externalidad, cuando en el consumo o en la producción de algunas actividades, se tiene un efecto indirecto en otras actividades de consumo y producción que no se refleja directamente en los precios de mercado, es decir, los efectos sobre otros (sean beneficios o costos) son externos al mercado, de ahí el nombre de externalidades. Las externalidades surgen como un resultado inter-temporal entre las empresas en dos periodos de producción (Baumol y Oates, 1975).

El desarrollo de los llamados instrumentos económicos en materia ambiental es el resultado de la búsqueda por encontrar una asignación óptima de los recursos, tomando en cuenta no sólo los beneficios y costos económicos directos de una actividad, sino también aquellos derivados de su impacto sobre el ambiente, incluso cuando ellos no se reflejan en el resultado económico de la empresa en cuestión. En este sentido, se pueden identificar dos categorías de la regulación ambiental: por un lado, los instrumentos de comando y control, también conocidos como instrumentos de regulación directa; y por otro lado, los instrumentos económicos.

INSTRUMENTOS ECONÓMICOS

Éstos comprenden todos aquellos instrumentos que inciden en los costos y beneficios imputables a los cursos de acción alternativos que enfrentan los agentes económicos. En otras palabras, es un instrumento económico aquél que afecta la rentabilidad de procesos o tecnologías alternativas, o el precio relativo de un producto, alterando, en consecuencia, las decisiones de productores y consumidores, e induciéndoles eventualmente, a acciones que, en el agregado, contribuirán a reducir los niveles de deterioro ambiental (CEPAL/PNUMA, 1997). Para Stavins (2003) es posible definir los instrumentos de mercado, como aquellos aspectos del derecho o leyes que fomentan conductas a través de señales del mercado en vez de directivas explícitas referentes a métodos o niveles de control de la contaminación.

La regulación indirecta comprende una serie de instrumentos que tienen en común el corregir los problemas ambientales, sin imponer determinadas conductas. Su utilización se ha visto incrementada por la adopción de políticas de corte liberal, tendientes a favorecer la desregulación y revalorizan el papel del mercado en la asignación de recursos.

Los instrumentos económicos o de regulación indirecta comprenden un conjunto de regulaciones diversas de tipo normativo y de mercado, a través del mecanismo de precios, cuyo objetivo es internalizar las externalidades ambientales, y consecuentemente hacer pagar al que contamina.

Lo característico de estos instrumentos es proporcionar incentivos económicos que inducen a los agentes causantes a adoptar medidas eficientes destinadas a evitar la contaminación o a conservar los recursos naturales. En otras palabras, estos instrumentos otorgan a los agentes su libertad de elección, de decisión y de comercio, mientras que al mismo tiempo afectan el esquema de ventajas y desventajas asociadas a las consecuencias de esas elecciones (Stavins, 2003). En la Tabla 1, se exponen los principales instrumentos económicos usados a nivel mundial.

Tabla 1. Instrumentos económicos de mercado

Instrumento	Descripción
Tasa sobre efluentes	Pagos sobre descargas en el medio ambiente, según cantidad calidad del efluente; por ejemplo, el cobro sobre tratamiento de aguas residuales.
Tasas sobre productos	Adiciones a los precios de los productos que generan contaminación. Ejemplo: cargos sobre el contenido de azufre en los combustibles.
Subsidios	
Subvenciones	Asistencia financiera condicionada a la adopción de medidas. Por ejemplo, el apoyo económico a las empresas por utilizar plantas tratadoras de agua.
Empréstitos subsidiados	Financiamiento de inversiones a tasas de interés por debajo de las de mercado. Por ejemplo, el fondo verde en México que apoya con créditos a aquellos inversionistas que desean invertir en empresas con perfiles sustentables.
Creación de mercado	
Permisos de emisión negociables	Compre y venta de derechos (cuotas) de contaminación. Por ejemplo, un mercado de bonos de carbono.
Seguro ambiental obligatorio	Transferencia de responsabilidad por los daños ambientales a empresas de seguros. Por ejemplo, seguros que cubren daños de empresas petroleras al medio ambiente.
Sustentación de mercado	Intervención del gobierno vía precios, para fomentar mercados para materiales secundarios(reciclados)
Sistemas de devolución de depósitos	Sobretasas que inciden en el precio final del producto potencialmente contaminador, devueltas durante el retorno del producto. Por ejemplo, camiones de carga o envases de plástico.

Fuente: Elaboración propia con datos de Pearce y Turner (1991).

La discusión en torno a la superioridad de uno o de otro enfoque es la médula del debate sobre opciones de política ambiental. Por ello, a continuación, se desarrollará una serie de planteamientos para demostrar que los instrumentos económicos son más recomendados para su aplicación con relación a los instrumentos de control directo, con base en su aplicabilidad en el mundo real.

También, se determinará cuál de estos instrumentos es de los más utilizados en el país y cuáles son las condiciones necesarias para su aplicación al igual que las limitaciones que estos enfrentan para ser aplicados; asimismo, sobre cuáles consideramos que se deberían de implementar pero que todavía siguen sólo en la teoría. Dado que la preocupación fundamental de la teoría económica es el logro de la eficiencia en el uso de los recursos, no es de sorprender que, según los economistas, la principal virtud de los instrumentos económicos sea precisamente la eficiencia. No obstante, ésta, definida como la igualación de los costos y beneficios incrementales de abatimiento de la contaminación, es prácticamente imposible de alcanzar en el mundo real. Sin embargo, los instrumentos económicos alcanzan con frecuencia una meta menos ambiciosa, pero es también muy importante considerar la meta de preservar la relación de costo-efectividad, la cual permite que los agentes involucrados escojan las formas que más les convengan para hacer frente al nuevo entorno económico, al igualar el costo incremental del control de la contaminación entre agentes.

Otra virtud de los instrumentos económicos frente a los tradicionales, es que proveen incentivos dinámicos. Los instrumentos de control directo se basan en normas que deben cumplirse y, en consecuencia, una vez que los agentes los han adoptado, no tienen incentivos para seguir modificando sus acciones de tal forma que reduzcan los efectos negativos en el ambiente provocado por sus actividades. En contraste, un instrumento económico es un costo que el agente internaliza permanentemente, por lo que siempre tiene un incentivo para

controlar la contaminación, esto promueve el desarrollo tecnológico (Instituto Nacional de Ecología, 2007).

Bajo este contexto, algunas ventajas de los instrumentos económicos incluyen (Pearce y Turner, 1991):

- 1) Permiten que las organizaciones comerciales y los individuos respondan flexible e independientemente de acuerdo con los precios del mercado para lograr los objetivos del manejo ambiental al menor costo
- 2) Incentivan constantemente a las organizaciones comerciales a reducir la contaminación y por consiguiente, a desarrollar y adoptar nuevas tecnologías y procesos de control para reducir los residuos contaminantes
- 3) Pueden incrementar los ingresos para financiar las actividades de control de la contaminación
- 4) Admiten el crecimiento de las industrias existentes y la entrada de nuevas industrias de mejor modo que del enfoque normativo
- 5) Reducen los costos de vigilar el cumplimiento y los costos administrativos tanto para el gobierno como para la industria (Berntein, 1995).

Las ventajas de los instrumentos económicos compensan la desventaja principal de la regulación directa, la cual es que ésta puede llegar a ser ineficiente y costosa.

Estudios empíricos realizados por el Banco Mundial (1992) señalaron que los costos de implementación de políticas de *comando y control* superan, en mucho, a los de políticas basadas en incentivos económicos. A pesar de que las políticas basadas en incentivos económicos no correspondan exactamente, en la práctica, a las políticas de costo mínimo, los datos indican que los costos de las políticas de regulaciones directas son muy altos, exactamente 22 veces más costosa que la opción de costo mínimo. Además de la propiedad de eficiencia económica (solución de costo mínimo) que sólo corresponde a una ventaja en el sentido estático, las políticas basadas en mecanismos de mercado proporcionan también incentivos dinámicos para reducciones adicionales de contaminación, una vez que exista tecnología disponible y para desarrollo e introducción de las nuevas tecnologías de control de la contaminación.

Según un estudio realizado por la OCDE (1994), las políticas de *comando y control* presentan las siguientes desventajas:

- 1) Son ineficientes económicamente porque no consideran las diferentes estructuras de costo de los agentes privados para la reducción de la contaminación
- 2) Sus costos administrativos son muy altos, pues involucran el establecimiento de normas y especificaciones tecnológicas por parte de agencias oficiales, así como un fuerte esquema de fiscalización
- 3) Crean barreras, pues la concesión de licencias no comercializables tiende a perpetuar la estructura de mercado existente
- 4) Una vez alcanzado el patrón, o cuando la licencia es concedida, el contaminador no es estimulado a introducir nuevas mejoras tecnológicas anti-contaminantes
- 5) Pueden sufrir influencia de grupos de interés

En enfoque normativo también tiende a desalentar la innovación de la tecnología para el control de la información y no ofrece ningún

incentivo financiero a las organizaciones para que superen sus objetivos de control.

Se afirma también que las políticas de *comando y control* demandan mucha información para ser implementadas, así como también un seguimiento o fiscalización de los cambios esperados en el comportamiento de los agentes privados, lo cual explicaría sus costos más elevados. A este respecto, Helm y Pearce (1990) plantean la necesidad de información para la implementación de políticas ambientales basadas en incentivos económicos. Estos autores asumen que los costos de la empresa contaminadora y la función de daños ambientales de los agentes (empresa o consumidor) víctimas de la contaminación son conocidos. En particular, no hay información privada que no esté disponible al regulador, ni información considerada estratégica por las partes involucradas, así como no hay incertidumbre sobre los impactos de la contaminación (Hinostroza Suárez y Mallet Guy Guerra, 2000). Por lo tanto, este enfoque es bastante dependiente del nivel de información disponible. También argumentan que el tipo de intervención debe variar en enfoques, caso a caso. Según estos autores, no existe una solución general. Ambas alternativas de política ambiental implican que los órganos reguladores tengan la información necesaria, lo que puede ocurrir en mayor o menor medida, dependiendo del caso en cuestión. Esto es de gran importancia en la elección de los instrumentos de política más apropiado, la búsqueda de soluciones vía instrumento único, es ingenua y hasta peligrosa.

Por otra parte, Cropper y Oates (1992) afirman que la intención no es sugerir que el énfasis del economista en los sistemas de incentivos económicos haya sido equivocada, pero argumentan que la estructura y el análisis político son mucho más complicados de lo que se sugiere usualmente en libros y textos. La aplicación de sistemas de incentivos económicos está en alguna medida limitada por capacidades de control y complicaciones espaciales. El análisis económico cuidadoso juega un papel importante en la comprensión de las formas de cómo estos sistemas operan.

El uso de los instrumentos económicos en la política ambiental nacional ha sido casi nulo, a pesar de su enorme potencial para contribuir en la solución de los problemas ambientales; existen razones por las cuales el uso de los instrumentos económicos se ha visto tan limitado, por ejemplo, los reguladores prefieren tener el control sobre el resultado final. Desean ver que ciertas fábricas instalen determinados equipos y que las emisiones se reduzcan en una cantidad predecible. Los incentivos económicos implican esperar la reacción de los agentes.

Gran parte de la regulación ambiental ha respondido a presiones políticas, muchas veces que sólo afectan a una localidad dada o a un grupo en específico. En esos casos a desearse un resultado inmediato se utilizan las únicas herramientas disponibles como lo pueden ser normas y permisos, las cuales son validadas a nivel nacional. Los instrumentos económicos tienen efectos limitados en el corto plazo. También, los grupos ambientalistas y las personas preocupadas por la calidad del ambiente no están familiarizados con el funcionamiento de los instrumentos económicos, se necesitan programas educativos para dar a conocer las ventajas de estos.

Finalmente, no existe un marco regulatorio adecuado para incorporar los sistemas de incentivos económicos. Es posible utilizar algunos ya existentes como las leyes fiscales, pero pueden no tener la precisión geográfica necesaria ni todos los elementos bajo control y al utilizar los precios como instrumentos de control se tiene efectos distributivos regresivos, es importante considerar que no siempre es el caso.

Dentro de los instrumentos económicos encontramos a los Permisos de Emisión Negociables que se encuentran dentro de la categoría de instrumentos creadores de mercado, en los cuales se centra nuestra investigación ya que significan el antecedente más directo de lo que hoy conocemos como el mercado de bonos de carbono.

PERMISOS DE EMISIÓN NEGOCIABLES

Los permisos de contaminación comercializables, son instrumentos de política económica ambiental alternativos a los estándares o normas cuantitativas obligatorias que dan lugar a multas o a la aplicación de un sistema impositivo. Es un enfoque político que incorpora incentivos económicos, y en vez de basar su accionar en una entidad centralizada, propicia la interacción entre contaminadores en un mercado descentralizado. Se crea un nuevo tipo de derecho de propiedad, es decir, se crea el derecho a emitir sustancias contaminantes. Es preciso, con base a la teoría, definir las características que estos deben de tener para poder ser implementados en el mercado. En la Tabla 2 se explican las características que determinan este instrumento económico.

Tabla 2. Permisos de Emisión Negociables

Características	Explicación
Distribución inicial	El primer paso en un programa de permisos, proviene de una decisión centralizada, de un gobierno o institución reguladora, la cual decide el número de permisos a emitir. Este número de permisos deberá ser limitado para que pueda ser factible reducir el nivel de contaminación.
Mecanismo de asignación de los permisos	Podemos mencionar dos principales maneras de distribuir los permisos de emisión; la primera de ellas es la subasta, considerado el mecanismo más eficiente de distribución debido a su compatibilidad con el principio del que contamina paga. Otra ventaja es que permite alcanzar más fácilmente el precio de equilibrio y además es de gran ayuda para el proceso de ajuste, en el cual se pasa de un alto volumen de permisos a uno menor, evitando así el retiro arbitrario de permisos.

Características	Explicación
Mecanismo de asignación de los permisos	La segunda es la asignación directa sin contrapartida, esta manera ha sido adoptada para evitar la oposición de las empresas afectadas ante la subasta y las consecuencias de esta, por lo que se ha optado por el reparto sin coste alguno de los permisos entre las empresas afectadas. Mediante la política de “respeto a los mayores”, es decir, reparto de los permisos en proporción a su emisión histórica. Beneficiando así a las empresas más contaminantes para que puedan más fácilmente adoptar las nuevas medidas de mitigación.
Reglas de intercambio	Para que un mecanismo de este tipo funcione es preciso que se establezcan reglas claras, estableciendo quienes pueden ser los participantes y los procedimientos que estos debe de seguir.
Cambio en el número de permisos	Después de la distribución inicial, las distintas partes contaminadoras pasan a negociar entre sí y con otros agentes no contaminadores. Existen tres maneras de reducir el número de permisos, la primera es que los organismos públicos compren los permisos y los retiren de circulación para evitar su venta futura. La segunda es, permitiendo que organizaciones e individuos no contaminantes, por ejemplo, grupos ecologistas, compren los permisos, obteniendo así el mismo resultado. La tercera manera es, poniéndoles fecha de caducidad, para que el poseedor del permiso pueda emitir contaminantes en un periodo de tiempo determinado. Después se podrá entregar un número de permisos decreciente a la misma empresa.

Fuente: Elaboración propia con datos de Field y Field (2002).

El criterio principal para el uso de los permisos de emisión es, sin duda, el incentivo que genera a las empresas para que puedan aplicar mejores formas de reducir emisiones, invirtiendo sus retribuciones en investigación y desarrollo. Del mismo modo, se reconoce que el uso de permisos de emisión permite a los agentes disminuir los costos de cumplimiento al permitirles comprar a precio de mercado los permisos con los cuales podrán alcanzar sus objetivos de mitigación. Al ser un instrumento no prohibido, los permisos permiten congeniar el crecimiento económico e industrial con la conservación ambiental, de igual forma le permite a los regulados tener la flexibilidad necesaria para poder adecuarse a la línea del crecimiento verde, en donde se busca modos de producir no contaminantes. Por otra parte, la oposición a la implementación de los permisos ha sido fuerte, ya que al estar muy localizadas las fuentes de emisión que se quieren controlar y entre las que se establecería un hipotético intercambio, sería imposible hacer uso del poder de mercado. Por ejemplo, si las empresas que reciben los permisos son pocas, podrían formar un oligopolio para elevar el precio de los permisos.

PERMISOS DE EMISIÓN NEGOCIABLES (PEN) PARA EL CASO MEXICANO

El uso de mercados para regular la contaminación, en la práctica, se ha convertido en un mecanismo facilitador del cumplimiento con los límites a las emisiones fijados por los reguladores. Un mecanismo de *cap and trade* es una forma de regular el medio ambiente que consiste en fijar un tope global a las emisiones, determinado con unidades de emisión, generalmente toneladas métricas de gas contaminante. Se reparte ese tope entre las empresas reguladas, asignando a cada una un límite de emisiones fijado en toneladas métricas e identificando cada tonelada con un permiso de emisión y se permite que posteriormente las empresas intercambien libremente sus permisos de emisión. Una

empresa cumple con la regulación si al final del periodo establecido tiene tantos permisos como emisiones ha causado. Las empresas pueden cumplir con sus límites reduciendo las emisiones o comprando derechos de emisión. Las empresas compran siempre que lo que les cuesta reducir emisiones sea mayor que el precio de los derechos y venden siempre que lo que les cuesta es menor que el precio de los derechos. Así, el mecanismo permite concentrar los esfuerzos en reducción de emisiones hacia las empresas y sectores de actividad en donde es más barato realizarlos. A continuación, se analizará el estado actual del mercado de bonos en México con base a los fundamentos de la teoría de los permisos de emisión negociables PEN.

ASIGNACIÓN INICIAL DE DERECHOS

En primer lugar, se tienen que tomar decisiones para determinar la asignación inicial de derechos. La asignación inicial de los permisos puede tener consecuencias redistributivas entre sectores productivos y entre consumidores y empresas, y sobre la eficiencia económica. En la práctica, la asignación inicial se puede hacer gratuita o mediante su venta. La forma gratuita comúnmente usada es en proporción a las emisiones históricas de las empresas reguladas. La forma más razonable de venderlos es mediante una subasta, aunque el mecanismo de asignación mediante subasta es más costoso políticamente. Sin embargo, la parte positiva es que se obtendría una recaudación. El renunciar a esta recaudación puede verse como un subsidio por parte de los contribuyentes a favor de las empresas reguladas. Por otro lado, el mecanismo de subasta, si tiene el diseño correcto, ya estaría seleccionando como mayores compradores a las empresas con mayor coste de reducir las emisiones.

México ya tiene experiencia en los mecanismos de desarrollo limpio. El más relevante para nuestro análisis, ya que involucra un sistema de *cap and trade*, es el mercado interno de emisiones de Pemex, que

funcionó desde 2001 hasta 2005. Pemex empezó a cuantificar emisiones desde 1997 y estableció metas de reducción a partir de 1999 (de 2001 a 2003, redujo en 1% las emisiones totales con respecto a las registradas en 1999). Para realizar la reducción de la forma más eficiente posible organizó un mercado de emisiones interno en que los participantes eran veinticinco unidades de negocio. Para el desarrollo e implementación del mercado, se creó la Auditoría Corporativa de Protección Ambiental. El mercado interno de emisiones de Pemex era un mecanismo de *cap and trade* en que en un principio se asignaban unidades de permisos a cada unidad de negocio; cada permiso equivalía a una tonelada métrica de carbono y las unidades debían balancear permisos con emisiones. Los ahorros con respecto a los permisos concedidos se podían vender a otras unidades de negocio y las transacciones se realizaban sin identificar a las partes para evitar prácticas comerciales desleales. La negociación de los precios se realizaba en un sistema informático de registro de transacciones diseñado por Pemex. Este mercado ya no existe en la actualidad y se ha substituido por otros proyectos de Mecanismos de Desarrollo Limpio (MDL).

Para que la asignación sea eficiente, el funcionamiento del mercado debe llevar a la existencia de precios únicos y competitivos, que serían un buen indicador de los precios de los gases comerciados. Las características y distorsiones presentes en los sectores que en México son candidatos a la regulación hacen muy difícil que un mercado interior por sí sólo pueda lograrlo. Por ello sería necesario integrar el mercado interior de México con un mercado internacional competitivo de gases de efecto invernadero.

PARTICIPANTES EN EL MERCADO

Una parte del diseño de un mercado es decidir quién puede participar. Una posibilidad es dejar participar en el mercado únicamente a las empresas reguladas por el esquema de *cap and trade* que pueden usar los

derechos directamente cambiándolos por reducción de emisiones. La otra es abrirlo a más participantes, en principio a cualquier tipo de participante. En el primer caso, se puede tener un mercado demasiado estrecho en que muchas veces las partes no encuentren contraparte. En el segundo caso, si se abre el mercado a otros participantes que no están posibilitados para usar los derechos directamente, el mercado se amplía, pero a costa de aumentar la especulación, que genera que muchas veces los precios no sean tan eficientes.

En México, los sectores que se presentan como candidatos a la regulación mediante el mecanismo de *cap and trade* son el de generación eléctrica, petróleo y gas. Para aquellos sectores o empresas que no son paraestatales y para los que la asignación se da mediante una subasta se podría suponer un costo que habría que analizar sobre su localización y sensibilidad en la regulación. La presencia de paraestatales en una subasta pública sería una distorsión en sí misma, y por ende, es un argumento en contra de la subasta de derechos de emisión.

TIPO DE COMERCIO

El comercio se puede realizar bilateralmente, cada parte tiene que buscar una contraparte o en un mercado centralizado en que todas las partes pueden acudir a comprar o vender. En este último caso, se deben establecer mecanismos compensatorios en el mercado para garantizar que, a no ser que concurren circunstancias excepcionales, todas las transacciones se puedan realizar. La ventaja del comercio bilateral es que es más barato y fácil de organizar; la desventaja es que puede ocasionar mayor dispersión en los precios. Como hemos mencionado, la minimización de los costes de alcanzar el objetivo de emisiones sólo se logra si el precio al que se intercambian los derechos es único. Dado que los mecanismos de *cap and trade* hasta ahora usados no establecen ningún límite al tipo de comercio y que, en la práctica, mucho del comercio puede ser bilateral, cada parte busca su contraparte y cuando

la encuentra acuerdan o negocian un precio, no hay nada en el mecanismo que garantice la aparición de un precio único. En consecuencia, el diseñador de este mercado tiene un papel fundamental para buscar formas para que los precios tiendan a converger.

Un sistema de *cap and trade* interno en México permitiría ajustes para llevar a concentrar las reducciones de emisiones en las empresas en las que es menos costoso realizarlas. Si el sistema se integra en un mercado internacional, además podría tener la ventaja de que la reducción de emisiones las podrían financiar, al menos parcialmente, empresas de otros países.

Una de las ventajas de poder tener un comercio de emisiones vinculado al sistema europeo es que los participantes en el mercado serán lo suficientemente numerosos como para derivar en un mercado competitivo. Sin embargo, en un mercado más pequeño como el interno de algunos de los países miembros eso no sería así. Por el contrario, una de las desventajas de tener un mercado internacional de derechos con países con regulaciones heterogéneas es la distorsión que surge de comerciar derechos cuya diferencia en valor viene dada por diferencias en lo estricto de la regulación. En la Unión Europea, la diversidad de planes nacionales de asignación ha llevado a una diversidad en el significado, en términos de sacrificio económico y por lo tanto de valoración del derecho, de los derechos emitidos por distintos países. Si se considera un mercado norteamericano, esa diversidad podría ser todavía más extrema que en Europa. Una gran diferencia con el sistema europeo de emisiones es que en Norteamérica es mucho más difícil llegar al nivel de coordinación que permita desarrollar políticas comunes.

Por otra parte, la experiencia europea muestra que a pesar de que ha podido funcionar el mercado con derechos definidos unilateralmente por cada uno de los países de la Unión Europea, ello puede haber implicado que los países han sido más laxos con determinados sectores, lo cual es un efecto distorsionador del mercado de bienes.

Si por el contrario, México se integra en un mercado norteamericano, los demás países participantes van a exigir que los derechos que se entreguen a las empresas tengan un valor parecido a los derechos que ellos emitan para evitar distorsiones en el mercado de bienes. Consideramos que eso va a requerir una negociación con los demás países participantes acerca de mínimos aceptables en términos de verificación del cumplimiento de la regulación y de que la regulación realmente implique una restricción a las empresas y a México como país.

DURACIÓN DEL DERECHO

Otro elemento de diseño del mercado de derechos es establecer su validez temporal. En la mayor parte de los casos prácticos, los derechos se pueden ejercer durante varios años. Esta posibilidad reduce el control anual de las emisiones por parte del regulador, sin embargo, es razonable para emisiones de gases de efecto invernadero, pues sus efectos sobre la atmósfera se producen por acumulación durante muchos años. La duración por más de un periodo da mayor flexibilidad a las empresas para planificar sus emisiones y por ello permite una mayor eficiencia en costos. El punto negativo es que puede generar especulación por el cambio en valor del derecho.

En la práctica, la duración de la validez de los derechos es generalmente mayor a un año. Si estos derechos van a ser comerciados internacionalmente, los derechos emitidos por el gobierno mexicano deberán tener una validez similar a los que se emitan en otros países.

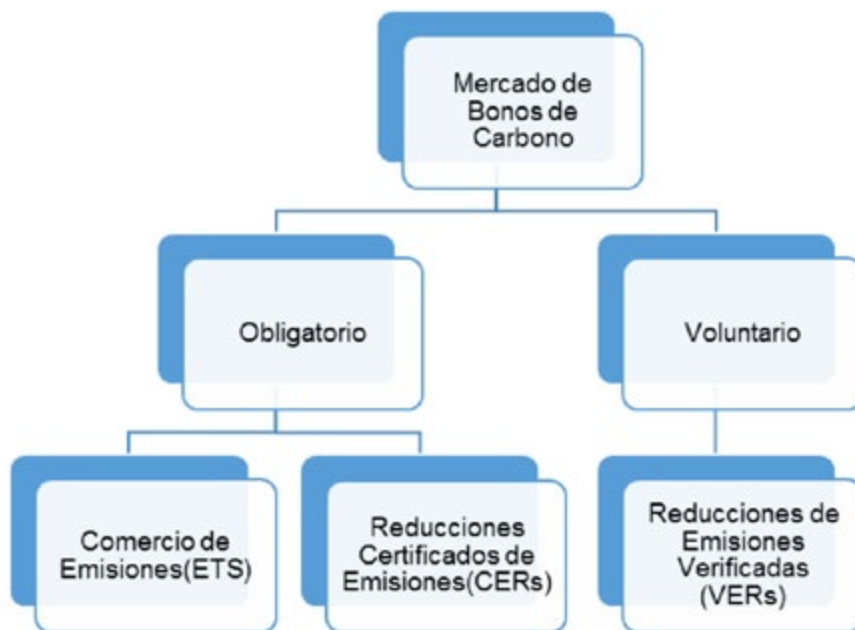
Finalmente, para México es muy importante que la venta internacional de permisos permita financiar, al menos parcialmente, el costo económico de reducción de las emisiones. Por lo tanto, el incentivo adicional que tiene el gobierno mexicano es el de tratar de emitir demasiados derechos para maximizar el beneficio de su venta. El límite a este incentivo va a venir de los países en donde residen las empresas compradoras.

Para hacer efectivo el mecanismo se tiene que tomar en primer lugar decisiones acerca de cómo se asignan originalmente los derechos. En segundo lugar, se debe garantizar un funcionamiento del mercado adecuado que debe llevar a la existencia de precios únicos. En tercer lugar, se debe asegurar el cumplimiento con la regulación mediante el establecimiento de medidores eficaces y de auditorías que verifiquen que estos medidores no se alteran y de penalizaciones efectivas ante los incumplimientos; esto puede llegar a ser un requisito impuesto por los reguladores de terceros países para considerar los derechos de emisión emitidos por el gobierno de México para que sus empresas puedan cumplir con sus regulaciones. Esto puede permitir a México financiar sus esfuerzos en reducir sus emisiones al convertirse en un país exportador de derechos de emisión.

EL MERCADO DE BONOS DE CARBONO

El mercado de bonos de carbono es un instrumento económico contemplado en el Protocolo de Kyoto, que tuvo lugar el 11 de diciembre de 1997, los bonos fueron parte de una estrategia para permitir a los países y empresas de países industrializados cumplir con mayor facilidad sus metas de reducción de emisiones acordadas en el protocolo, ya que significaba un espacio de compra y venta de certificados de reducción de emisiones de GEI.

Cada bono de carbono equivale a una tonelada de CO_2 (tCO_2) que se ha dejado de emitir a la atmósfera. El objetivo de estos bonos es disminuir los costos de las actividades de reducción de emisiones de GEI como parte de las estrategias de mitigación para el combate contra el cambio climático. En la Figura 2 se describe la clasificación de los bonos de carbono que existen en la actualidad y que se comercializan en el mercado.

Figura 2. Clasificación de los bonos de carbono

Fuente: Elaboración propia

Los mercados de carbono pueden dividirse en dos grandes categorías principales, los mercados obligatorios y los mercados voluntarios, los primeros deben seguir reglas y procedimientos unificados y sistemáticos, a fin de lograr la emisión de CERs, la cual es realizada centralizadamente por la Junta Ejecutiva del MDL, de acuerdo a los marcos formales establecidos en la CMNUCC; mientras que los segundos en cambio, no están regidos ni originados por una obligación regulatoria de cumplir con una meta de reducción de emisiones de GEI, sino que responde a motivaciones variadas: exigencias de accionistas y clientes, responsabilidad social empresarial, filantropía, necesidad de prepararse para cumplir con regulaciones federales futuras o estrategias financieras de reventa de créditos para obtener beneficios económicos, entre otras.

MERCADO OBLIGATORIO

Comercio de Emisiones

Los sistemas de comercio de emisiones, también llamados *sistemas cap-and-trade* (de límites máximos y comercio), constituyen un enfoque para resolver, entre otros, problemas de contaminación del aire basado en el mercado. Si son bien diseñados e implementados pueden ser económicamente eficientes pues proveen incentivos a los participantes para que éstos reduzcan sus emisiones de manera flexible, en función de sus propias estructuras productivas, tecnológicas y de costos. El principio básico de estos esquemas consiste en la fijación de un límite máximo a la cantidad total de emisiones permitidas para un período de tiempo determinado (el tope o “cap”) (Gilbertson y Reyes, 2006). Cada participante recibe entonces una cantidad determinada de *permisos de emisión*, los cuales pueden luego comerciarse en un mercado. La distribución de permisos entre los participantes puede realizarse de diferentes maneras, por ejemplo, en función de sus emisiones históricas o mediante un proceso de subasta (en este último caso, las empresas deben comprar los *permisos* que necesitan, lo que les impone una carga financiera total mayor).

El precio de los *permisos* es determinado por el mercado, en función de la oferta y la demanda. De esta manera, durante el período de tiempo especificado, los participantes que emiten menos de lo permitido pueden vender sus permisos excedentes a aquellos participantes cuyas emisiones exceden su cantidad máxima permitida. Así, quienes pueden reducir sus emisiones sin incurrir en grandes costos (por ejemplo, invirtiendo en tecnologías más eficientes) tienen el incentivo para hacerlo, pues pueden beneficiarse vendiendo en el mercado sus permisos sin utilizar.

En el otro extremo, para quienes es muy difícil o costoso reducir emisiones, la compra de permisos en el mercado puede resultar la opción más eficiente. Por lo tanto, cuando un sistema de comercio de emisiones funciona bien las emisiones totales permanecen dentro del límite máximo establecido, mientras que los participantes

tienen la flexibilidad de elegir cómo cumplir con su meta de emisión individual, a partir de su ecuación interna de costos. Uno de los criterios principales para elegir un sistema de permisos es el incentivo que se le ofrece a las empresas para aplicar mejores formas para reducir las emisiones.

CERTIFICADOS DE REDUCCIÓN DE EMISIONES

El instrumento que participa en el mercado obligatorio son los ***Certificados de Reducción de Emisiones, originados en proyectos***, los cuales son creados cuando un proyecto específico de mitigación llevado a cabo en un país en desarrollo o de Europa del Este demuestra que reduce emisiones de GEI en comparación con lo que hubiera ocurrido en ausencia de dicho proyecto. Los certificados generados por proyectos llevados a cabo en países en desarrollo en el marco de los Mecanismos de Desarrollo Limpio (MDL) se llaman “CERs” por sus siglas en inglés (*Certified Emission Reductions*).

Los Mecanismos de Desarrollo Limpio (MDL), es uno de los tres mecanismos establecidos en el Protocolo de Kioto para facilitar la ejecución de proyectos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero por las Partes, que son países en vías de desarrollo (identificados en el Protocolo de Kyoto como países no Anexo I) en cooperación con países desarrollados (identificados como países del Anexo I). Los MDL se encuentran definidos en el Artículo 12 del Protocolo y tienen como objetivo, por un lado, ayudar a los Países que son Partes del Anexo I a cumplir con sus metas de limitación y reducción de emisiones de GEI, y por el otro, ayudar a los Países No Anexo I al logro de un desarrollo sostenible. Es importante mencionar, que el Protocolo de Kyoto estará vigente hasta el año 2020; fecha a partir de la cual entrará en vigor el Acuerdo de París, firmado en la COP21 en París en el año 2015.

MERCADO VOLUNTARIO

Certificados de Reducción de Emisiones Voluntarias

Los activos que se comercian dentro del mercado de voluntarios se denominan **Certificados de Reducción de Emisiones Voluntarias (VERs)**, comprenden a todas las transacciones de créditos de carbono que no están regidas por una obligación regulatoria de cumplir con una meta de reducción de emisiones de GEI. Esto incluye tanto a las transacciones de créditos creados especialmente para los mercados voluntarios (como los VERs—*Verified Emission Reductions*) como a las operaciones en las que se venden créditos de los mercados regulados (como los CERs del MDL) a compradores que buscan voluntariamente compensar sus emisiones.

La demanda en el mercado voluntario de carbono, en cambio, no está regida, ni originada, por una obligación regulatoria de cumplir con una meta de reducción de emisiones de GEI, sino que responde a motivaciones variadas: exigencias de accionistas y/o clientes, responsabilidad social empresarial, filantropía, necesidad de prepararse para cumplir con regulaciones federales futuras o estrategias financieras de reventa de créditos para obtener beneficios económicos, entre otras. Por lo tanto, los principales demandantes de créditos voluntarios son empresas no sujetas a regulación de carbono, organizaciones no gubernamentales, municipalidades, universidades e, incluso, individuos que buscan compensar, por diversos motivos, sus emisiones de GEI.

Como la demanda en el mercado voluntario no depende de la obligatoriedad de cumplir con una meta de mitigación, a diferencia de lo que ocurre en el mercado del MDL, las operaciones se realizan de manera independiente sin seguir un proceso general y uniforme de certificación y sin ser registradas en una entidad central. Coexisten productos certificados mediante una variedad de estándares diferentes. La mayoría de estos estándares, no obstante, siguen un

ciclo de proyecto relativamente análogo al del MDL: involucran la preparación de un documento de diseño de proyecto, requieren la validación por parte de empresas de auditoría independientes, muchas de las cuales están también acreditadas para operar bajo el MDL y exigen registros y verificaciones recurrentes a fin de lograr la expedición de créditos de carbono.

Por este motivo, los costos de desarrollo de un proyecto voluntario son sólo ligeramente inferiores a los costos de desarrollar un proyecto MDL, pues el ciclo de proyecto, en la mayoría de los casos, no varía significativamente. A pesar de estas similitudes operativas, la falta de obligatoriedad, transparencia y uniformidad del mercado voluntario hacen que la demanda en éste sea baja y volátil, y que los precios sean menores que en el mercado del MDL.

SITUACIÓN ACTUAL DEL MERCADO DE BONOS DE CARBONO

La relación entre el crecimiento económico y la expansión de mercados de carbono es estrecha, y puede ser explicada gracias al concepto de crecimiento verde, que significa propiciar el crecimiento y el desarrollo económicos, además de asegurar que los bienes naturales continúen proporcionando los recursos y los servicios ambientales, de los que depende nuestro bienestar. Para lograrlo, se debe catalizar la inversión y la innovación que apuntalen el crecimiento sostenido y abran nuevas oportunidades económicas. En este sentido, los mercados de carbono representan para algunos países una oportunidad de generar recursos adicionales para su propagación en varios sectores: eficiencia energética, producción más limpia, aprovechamiento de las energías renovables, particularmente los biocombustibles, ofreciendo nuevas alternativas para un desarrollo bajo en carbono. La manera de reducir las emisiones en el mercado de carbono puede ser por medio del cumplimiento de las prerrogativas establecidas en

el Protocolo de Kioto o puede llevarse a cabo dentro de un mercado voluntario, el cual no es jurídicamente vinculante y se ha desarrollado como respuesta a los mercados formales establecidos, como son el Sistema Europeo de Comercio de Emisiones (EU-ETS) y el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), entre otros (Lucatello, 2012). Hasta este momento no existe aún un mercado global de carbono, dado que el sistema está caracterizado por una gran fragmentación: por un lado, encontramos los mercados entre Estados y regulados por el Protocolo de Kyoto a nivel internacional, por el otro lado, se encuentran mercados que operan dentro de un Estado o desarrollados a lo largo de fronteras. Esto significa que actualmente los mercados de carbono se caracterizan por la existencia paralela de dos sistemas en constante cambio: los mercados internacionales y los regionales/locales.

Los últimos años han visto un fuerte crecimiento en el comercio de carbono, tanto en el plano interno como en los mercados regionales o internacionales. En general, los mercados de carbono han seguido un camino de expansión, y si bien las repercusiones de la crisis económica podrían revertir esta tendencia, la creación de nuevos mercados regionales y nacionales en América del Norte, Asia y el Pacífico pueden también dar lugar a un mercado global de carbono con un valor de mercado de 2 billones o más para el año 2020. Por lo pronto, las emisiones globales de GEI alcanzaron aproximadamente 50 gigatoneladas de dióxido de carbono equivalente (GtCO_2e) en 2010 y se prevé que suba a 59 GtCO_2e en 2020 (Point Carbon, 2008).

El inventario de emisiones del WRI, en el 2014, reportó las emisiones totales por país y el volumen mundial. En la Tabla 3 se enlistan los 20 principales productores de GEI en el mundo con base en dicho inventario. Las emisiones históricas mundiales, por quema de combustibles fósiles, fueron de 45,913.50 millones de toneladas para el año 2012. Se observa una tendencia en las regiones y países industrializados, a excepción de Estados Unidos, de reducir las emisiones en la

última década. Esto pone en evidencia que el desarrollo industrial ha ubicado históricamente a Estados Unidos como el principal país emisor de CO₂, al contribuir con 30.3% de las emisiones históricas hasta el año 2000 y con 13.3% de las emisiones en el año 2012 ocupando el segundo lugar en el inventario de emisiones por debajo de China que produce 22.3% del total de las emisiones mundiales, ocupando así el primer lugar (Tabla 3).

Existen 15 países que contribuyen con 80.7% de las emisiones de CO₂ mundiales por quema de combustibles fósiles, entre ellos se encuentra México en la posición 12, con una emisión total de GEI igual a 723.17 millones de toneladas de carbono (cifra que representa 1.54% del total mundial). Al considerar a México en el contexto de América Latina y El Caribe, nuestro país contribuye con 27.3% de las emisiones totales de la región, con un índice de 1.5 toneladas de carbono por habitante por año (Tabla 3). Como resultado, la comunidad internacional tiene que reducir drásticamente las emisiones de GEI entre 15 y 44 GtCO₂e para limitar los incrementos de la temperatura en las próximas décadas.

Tabla 3. Principales emisores de Gases de Efecto Invernadero (GEI)

País	Total de emisiones GEI (MtCO₂e)*	Porcentaje
Mundo	45913.50	100.00
China	10260.32	22.35
Estados Unidos de América	6135.03	13.36
Unión Europea (28)	4263.15	9.28
Unión Europea (15)	3446.02	7.51
India	2358.04	5.13
Rusia	2216.59	4.83
Indonesia	2052.91	4.47
Brasil	1419.10	3.09
Japón	1170.28	2.55
Canadá	847.08	1.84
Alemania	805.97	1.75
México	723.19	1.57
Irán	712.45	1.55
Corea del Sur	655.61	1.43
Australia	595.30	1.29
Reino Unido	540.83	1.18
Arabia Saudita	532.89	1.16
Nigeria	496.13	1.08
Francia	462.59	1.01

Fuente: Elaboración propia con datos del World Resources Institute 2014. Climate Analysis Indicators Tool: WRI's Climate Data Explorer. Washington, DC.

*Incluye el cambio de uso de suelo y áreas forestales.

En 2013, un total de ocho nuevos mercados de carbono abrió sus puertas. Los esquemas de comercio de emisiones en el mundo son de un valor aproximado de \$30 mil millones de US dólares (The World

Bank, 2014). El Banco Mundial ha llevado un registro del número de mercados de emisiones en el mundo, caracterizándolos en cinco grandes categorías bajo el criterio de implementación (The World Bank, 2014). Dicho criterio realiza una ubicación geográfica y temporal de implementación. De manera geográfica distingue entre aquellos países o estados que han implementado un comercio de emisiones de manera nacional, es decir unilateralmente, y entre aquellos que lo han hecho de manera regional es decir bilateral. En el aspecto temporal la clasificación distingue entre aquellos países o estados que están en la etapa piloto del comercio de emisiones, es decir, de prueba y entre aquellos que ya lo tiene aprobado pero que aún no lo implementan oficialmente, es decir, implementación programada y finalmente entre aquellos que oficialmente lo están implementando. La Tabla 4 detalla los esquemas de comercio de emisiones existentes, emergentes y potenciales.

Tabla 4. Esquemas de comercio de emisiones existentes, emergentes y potenciales

Tipo	Implementación Vigente	Implementación Programada	Etapa de Prueba	
Nacional	Unión Europea Suiza Kazajistán Australia Nueva Zelanda	Corea del Sur	Brasil Chile México Washington Ucrania	Turquía China Japón Tailandia
Regional	California Quebec RGGI Beijing Tianjin Hubei	Shangai Guangdong Shenzhen Kyoto Tokyo Saitama	Chong-qing	WCI

Fuente: Elaboración propia con datos del The World Bank (2014).

La Unión Europea tiene el mercado de carbono más grande del mundo, con un total de 2,084 megatoneladas (Mt) de CO₂e. Comenzó en 2005 y cubre las emisiones en los sectores de energía, industria y de la aviación, lo que representa alrededor del 45% de las emisiones de CO₂ relacionadas con la energía de la región. El sistema cubre los 28 estados miembros de la Unión Europea, más Noruega, Liechtenstein e Islandia. Las lecciones de sus dos primeras fases han contribuido a configurar el diseño post-2012 del esquema (Ellerman y Buchner, 2007). En diciembre de 2008, el Consejo Europeo y el Parlamento Europeo aprobaron un acuerdo sobre un paquete de cambio climático y energía que implementa un compromiso político de la Unión Europea para reducir las sus emisiones de gases de efecto invernadero en un 20% en 2020, en comparación con los niveles de 1990. Estos objetivos se establecieron en 2008, antes de que la magnitud de la crisis financiera mundial fuera evidente. Debido a la desaceleración económica, las emisiones de gases de efecto invernadero de Europa han disminuido hasta el punto donde se espera que el objetivo del 20% para ser logrado sin ningún esfuerzo de reducción de la industria. Como resultado, los precios de los permisos en el ETS de la UE han disminuido considerablemente, por lo que es necesario un proceso de revalorización a corto y largo plazo. En mayo de 2013, el Parlamento Europeo acordó la retención temporal de 900 millones de toneladas de derechos de emisión de la subasta, esto reducirá el exceso de oferta y restaurará el equilibrio entre la oferta y demanda (International Emissions Trading Association, 2014).

En segundo lugar, está el ETS en China, el cual asciende a 1,115 MtCO₂e, en 2013 fue el inicio de la negociación en Shenzhen, la primera de los siete esquemas de comercio en China. De igual forma, se ha anunciado la intención de establecer una ETS en todo el país para el 2016, incorporando los esquemas existentes. Otros mercados piloto que se pusieron en marcha a finales de 2013 y principios de 2014 fueron los de las ciudades de Pekín, Tianjin, Chongqing y Shanghai y

las provincias de Hubei y Guangdong; se espera que estos mercados piloto cubran en conjunto un total de 700Mt de las emisiones de CO₂ (Scotney *et al.*, 2012).

Para el caso de los Estados Unidos, el primer esquema regional que se implementó fue la Iniciativa Regional de Gases Invernadero (RGGI), que cubre el sector de la electricidad en los estados del nordeste e inició el 1 de enero de 2009. Para febrero de 2013, los estados RGGI acordaron reducir las emisiones de 165 millones a 91 millones de toneladas de CO₂ para 2014, con el fin de igualar las emisiones reales de 2012; esta reducción fue necesaria ya que el tope anterior no anticipó la recesión económica y la rápida sustitución del carbón por el gas de esquisto para la generación de electricidad de Estados Unidos (International Emissions Trading Association, 2014).

También en 2013, fue el inicio de la negociación de los planes de California y Quebec, las reglas de operación para este esquema se desarrollaron de forma cooperativa en el marco de la Iniciativa Climática del Oeste, con un acuerdo entre algunos estados de Estados Unidos y las provincias de Canadá con el fin de promover una plataforma común para el comercio de emisiones. Los sistemas de California y Quebec comenzaron a negociarse en enero de 2013 y se vincularon formalmente al realizar subastas conjuntas de derechos de emisión a partir de 2014, el sistema de California tendrá un papel fundamental en la reducción de emisiones de Estados Unidos para los niveles de 1990 para 2020 (International Emissions Trading Association, 2014).

Para el caso del gobierno de Australia y la Unión Europea se ha anunciado su intención de vincular sus sistemas a partir de una sola vía de comercio de derechos de emisión; esto significa que se emitirían derechos de emisión europeos en el mercado australiano para el 2015, seguido por un comercio de dos vías, en el cual ahora también se permitirá el uso de bonos australianos en el mercado de bonos europeo a partir de 2018. Sin embargo, un cambio de gobierno en Australia en septiembre 2013 ha puesto los planes en duda, ya que el gobierno en-

trante tiene la intención de derogar la legislación ETS (International Emissions Trading Association, 2014).

En Nueva Zelanda existe un esquema de comercio de emisiones en toda la economía integral (NZ-ETS) introducido progresivamente, se inició con el sector forestal en enero de 2008. Los sectores industriales de la energía y el transporte se han incluido a este mercado desde julio de 2010; mientras que el sector residuos y emisiones agrícolas se integrarán al mismo a lo largo del 2015. Una fase de transición, de 2010 a 2015, se basa en un precio tope y obligaciones parciales, ya que este esquema está totalmente ligado al mercado internacional de Kyoto, y por ende, permite el uso ilimitado de proyectos del Protocolo de Kyoto, así como créditos forestales sin límite de emisiones. En este sentido, la vinculación con el mercado internacional está destinada más bien para asegurarse que haya un precio del carbono adecuado, acorde con las condiciones de la economía de Nueva Zelanda (International Emissions Trading Association, 2014).

Una novedad importante en la ampliación del comercio de emisiones para las economías en desarrollo, ha sido la asociación del Banco Mundial para la preparación del mercado, el cual proporciona fondos y asistencia técnica a los países en desarrollo para la creación de capacidades hacia el desarrollo, al igual que la aplicación experimental de instrumentos basados en el mercado para reducciones de GEI. De esta forma, países como Brasil, Chile, China, Colombia, Costa Rica, India, Indonesia, México, Marruecos, Perú, Sudáfrica, Tailandia, Turquía, Ucrania y Vietnam están participando actualmente como países beneficiados.

Después de este ejercicio comparativo entre los principales mercados de carbono, podemos ahora establecer las principales aportaciones de cada uno de ellos, haciendo énfasis en sus antecedentes, así como los avances y obstáculos que han tenido en su incorporación al mercado de carbono global, para finalmente realizar un análisis potencial de lo que significaría en términos económicos la creación de un mercado de bonos de carbono nacional (Tabla 5).

Tabla 5. Análisis comparativo entre los principales esquemas de emisiones

Características	Unión Europea	Australia	Nueva Zelanda	RGGI	WCI
Objetivo de reducción de emisiones	20% por debajo del nivel de 1990 para 2020	5% por debajo del nivel de 2000 para 2020	10-20% por debajo del nivel de 1990 para 2020	10% por debajo del nivel de 2014 para 2018	20% por debajo del nivel de 1990 para 2020
Alcance y Cobertura	11500 instalaciones. Comprende 40% de las emisiones totales	Energía, Procesos Industriales, Comercial Transporte. Comprende 60% de las emisiones totales	Forestal (2008), hidrocarburos e industrial (2010), residuos y GEI sintéticos (2013)	Sector de la energía	Energía, fuentes industriales (2013), petróleo y gas (2015). Comprende 85% de las emisiones totales
Formato de Subasta	En 3 fases, se realiza una asignación gradual	Se realiza de forma proporcional	n/d	90% de los derechos de emisión de CO ₂ disponibles se subastan	Se lleva a cabo en dos fases, actual y avanzada
Distribución/Asignación	Libre y gratuita	Libre y gratuita	Libre y gratuita	Libre y gratuita	Libre y gratuita
Flexibilidad	Mecanismos de flexibilidad previstos en el Protocolo de Kyoto	Comprende la compra de compensaciones Kyoto y No-Kyoto	Mecanismos de flexibilidad previstos en el Protocolo de Kyoto	Puede aceptar cualquier unidad internacional de compensación como Reducciones Certificadas de Emisiones (RCE)	No más de 8% de la obligación de cumplimiento total de una empresa puede ser satisfecho con cualquier tipo de programa sectorial internacional

Características	Unión Europea	Australia	Nueva Zelanda	RGGI	WCI
Volatilidad y Mecanismos de Contención de Costos	Participación de la banca	No hay un precio mínimo, existe acceso al mercado internacional	Se fija un precio máximo y se pide una anticipación de 5 años previos antes de algún cambio	Se fija un precio ajustado por el Índice de Precios al Consumidor (IPC)	El precio mínimo se incrementa anualmente en 5% más la tasa de inflación, calculada con el Índice de Precios al Consumidor (IPC)
Competitividad	Se protege a las empresas que están en riesgo de fuga de carbono con incentivos	n/d	Se protege a las empresas que están en riesgo de fuga de carbono con incentivos	n/d	n/d
La regulación del mercado y la supervisión	Verificación de parte de un agente independiente	El Gobierno y el Parlamento mantienen la supervisión	El Ministerio de Negocios, Innovación y Empleo está a cargo de la supervisión del mercado, de informes y verificación	El monitor de mercado independiente del RGGI y Potomac Economic, proporcionan servicios de supervisión del desempeño competitivo y eficiencia del mercado	Supervisión compartida entre la Comisión de Negociación de Futuros de Materias Primas (CFTC) del Gobierno Federal bajo la Ley Dodd-Frank

Características	Unión Europea	Australia	Nueva Zelanda	RGGI	WCI
Medidas Complementarias	Se incluyeron objetivos del 20% en 2020 para la eficiencia energética y las energías renovables.	El mecanismo de precios del carbono (CPM) es una de varias iniciativas incluidas en el Futuro de Energía Limpia (CEF). La iniciativa Carbon Farming (TPI)	Las medidas de eficiencia energética y los esfuerzos de investigación agrícola complementan el NZ-ETS	No hay otras políticas complementarias regionales para el programa de limitación y comercio	El Plan de alcance AB 32 contiene una serie de políticas de reducción de emisiones, incluyendo un portafolio de energías renovables y uno de combustibles bajos en CO ₂

Fuente: Elaboración propia con datos de International Emissions Trading Association The World's Carbon Markets, March 2014.

UN MERCADO DE BONOS DE CARBONO PARA MÉXICO

La experiencia de México en el mercado internacional de carbono hasta el momento ha llegado principalmente a través de los MDL, dado que este tipo de proyectos significan transferencias importantes de tecnología y flujos apreciables de inversión extranjera directa, nuestro país se encuentra en una fuerte competencia entre países potencialmente receptores de ser anfitriones de tales proyectos. El éxito que México pueda llegar a tener para atraer este tipo de proyectos dependerá en gran medida de sus ventajas comparativas naturales como su potencial eólico y la radiación solar, así como de ventajas competitivas relacionadas con el marco jurídico e institucional.

Pero la pregunta es ¿Por qué nuestro país aún no tiene un mercado de emisiones (ETS) implementado? Esta situación puede ser explicada debido a la falta de capacidad del sector público y privado para involucrarse en la identificación de proyectos, así como en su promoción, diseño, ejecución, financiamiento y seguimiento.

Una incursión exitosa de México en la implementación de un mercado de emisiones nacional dependerá de su capacidad de establecer alianza con las empresas domésticas mediante proyectos de inversión mixta, aportación de capital de riesgo, créditos a la exportación, licencias y transferencias tecnológicas, contratos de compra, autoabastecimiento y autogeneración de energía renovable para las empresas nacionales.

Un elemento adicional del éxito de la implementación sin duda será la capacidad de la autoridad designada de vigilar el mercado, para establecer vínculos de eficiencia con las empresas nacionales, y asegurar que se cumplan los criterios de desarrollo sustentable que se establezcan tanto a nivel nacional como local.

Bajo este mismo contexto, cabe mencionar la necesidad de México para poder implementar iniciativas que le permitan ponderar

la participación del sector privado ya que es necesario generar un panorama de competitividad de empresas privadas en los distintos escenarios sectoriales.

En abril de 2012, el Congreso de México aprobó la LGCC para apoyar su objetivo de reducción de GEI en un 30% para 2020. Esta ley crea una posible vía de México para implementar un sistema de comercio de emisiones nacional que pueda ayudar al país a cumplir con sus metas de mitigación de una forma económicamente eficiente, se prevé que este esquema será implementado en dos fases. En primer lugar, una etapa voluntaria de construcción de capacidades, seguida del establecimiento de metas de mitigación específicas donde los participantes podrán comerciar permisos de emisión previamente otorgados, en principio, se prevén vinculaciones con otros sistemas internacionales. Para apoyar su implementación, la SEMARNAT creará un Registro Nacional de Emisiones. Los sectores que, en principio, cubrirá el esquema serán el energético, transporte, agricultura, bosques y uso de la tierra, residuos y procesos industriales. Si bien aún pudiera ser necesario un mayor avance en materia institucional y regulatoria a fin de poner en marcha el esquema propuesto, la aprobación de esta Ley significa un importante paso y muestra señales del fuerte compromiso de México con la agenda climática internacional.

Lamentablemente existen algunos obstáculos que han impedido que su implementación se desarrolle, principalmente la falta de visión institucional para poder identificar reformas administrativas, regulatorias y jurídicas que acompañen esta ley y que le permitan al país aprovechar todo el potencial de mitigación existente y así posicionarse como un oferente de créditos de emisión de primer nivel y que de esta manera provea al comercio e emisiones nacional un alto valor agregado.

La reducción de las emisiones de GEI deberá ser de fundamental importancia para nuestro país, no sólo para enfrentar el cambio cli-

mático, sino también para facilitar el desarrollo económico. México espera poder beneficiarse estratégica y económicamente al dirigirse hacia economías de bajas emisiones y al explotar las oportunidades y ventajas que se presentan localmente. Numerosas políticas y acciones se pueden adoptar para reducir las emisiones de GEI, con el fin de incrementar la seguridad energética, mejorar la posición competitiva y la balanza comercial del país, y reducir el daño ambiental a nivel local. En este sentido el mercado de bonos de carbono resulta una herramienta sumamente recomendable debido a que disminuye los costos de las actividades de reducción de emisiones de GEI, y sobre todo, permite que los agentes económicos vean en él una opción rentable, ya que el dejar de contaminar significará para ellos, un ingreso.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A continuación, enumeraremos una serie de recomendaciones obtenidas gracias al análisis comparativo entre los distintos mercados internacionales de carbono.

- 1) El objetivo de reducción debe de ser ambicioso, la experiencia internacional muestra que los estándares de reducción en el mundo están por arriba del 50%, lo cual nos habla del fuerte compromiso que existe a nivel global por reducir las emisiones de GEI.
- 2) Por el contrario, el proceso de reducción debe realizarse de manera paulatina y al ritmo propio de nuestro país, debido a que existe un proceso de adaptación de los propios sectores de la economía, en el cual la utilización de nuevas tecnologías y la determinación de los niveles de inversión marcarán el ritmo en el que será implementado el ETS.
- 3) Se debe permitir la participación de la banca para darle mayor seguridad a la inversión.

- 4) Se recomienda establecer un mecanismo de precios del carbono que estimule el uso de créditos tanto nacionales como internacionales.
- 5) El Gobierno deberá mantener la supervisión y la responsabilidad de las decisiones políticas importantes, incluyendo el establecimiento de límites de emisiones nacionales anuales y vinculación internacional.
- 6) Se debe sugerir a los Estados a reconocer el sistema de emisiones nacional, a fin de proporcionar seguridad jurídica a los agentes económicos, sus normas específicas para las asignaciones deben ser completadas con la mayor anticipación posible de la puesta en marcha del programa nacional.
- 7) Se debe generar una plataforma en Internet, que permita al gobierno realizar de una forma más rápida y sencilla la distribución y asignación de bonos de carbono.
- 8) Establecer un comité de expertos o grupo de reflexión que proporcionará apoyo técnico para la toma de decisiones.
- 9) Se sugiere crear un fondo carbono con el propósito de que este fondo apoye la I + D de las energías renovables, el establecimiento y la operación de intercambio de emisiones, y la reducción de emisiones de las empresas.
- 10) La experiencia internacional muestra que la integración regional da mejores resultados en la implementación de ETS, particularmente se recomienda unificar el esquema de comercio de emisiones nacional con el de California, debido a su cercanía y el alto nivel de intercambio económico que existe entre el sector productivo del Norte del país y California.

BIBLIOGRAFÍA

- Pigou A.C. (2001). *Economics of Welfare*. London: McMillan.
- Baumol W.J., Oates W.E. (1975). *The Theory of Enviromental Policy*. New Jersey: Prentice Hall.
- Berntein J.D. (1995). *Alternative Approaches to Pollution Control and Waste Management: Regulatory and Economics Instruments*. Urban Management Programme. Discussion Paper 3. Washington: Word Bank.
- Butze Aguilar W. (2006). Permisos de contaminación negociables: un instrumento de mercado para la regulación ambiental. *Análisis Económico*. Vol. XXI. No.38.
- CEPAL y PNUMA (1997). *Instrumentos económicos para la gestión ambiental en América Latina y el Caribe*. México: CEPAL y PNUMA.
- Cropper M.L., Oates W.E. (1992). Environmental Economics: Survey. *Journal of Economic Literature* (675-740). Vol. 30.
- Ellerman A.D., Buchner B.K. (2007). The European Union Emissions Trading Scheme: Origins, Allocation, and Early Results. *Review of Environmental Economics and Policy* (pp. 67-87). Vol. 1. Issue 1.
- Gilbertson T., Reyes O. (2006). *El mercado de emisiones: cómo funciona y por qué fracasa*. México: Carbon Trade Watch.
- Helm D., Pearce D. (1990). *The assessment: Economic Policy towards the Environment*. Oxford: Oxford Review of Economic Policy.
- INECC (2012). *Quinta Comunicación Nacional ante La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. México: INECC.
- International Emissions Trading Association-Australia (2014). *The World's Carbon Markets: A Case Study Guide to Emissions Trading*, March 2014.
- International Emissions Trading Association-California (2014). *The World's Carbon Markets: A Case Study Guide to Emissions Trading*, March 2014.

- International Emissions Trading Association-Nueva Zealand (2014). *The World's Carbon Markets: A Case Study Guide to Emissions Trading*, March 2014
- International Emissions Trading Association RGGI (2014). *The World's Carbon Markets: A Case Study Guide to Emissions Trading*, March 2014.
- International Emissions Trading Association-EU (2014). *The World's Carbon Markets: A Case Study Guide to Emissions Trading*, March 2014.
- Lucatello S. (2012). Los mercados voluntarios de carbono en Norteamérica y su gobernanza ¿qué reglas aplican para el comercio internacional de emisiones en la región? *Norteamérica*. Vol. 7. Issue 2012.
- Miriam L., Hinojosa Suárez, S., Guerra M.G. (2000). La teoría económica neoclásica y los instrumentos de política ambiental. *Interciencia*. Vol. 25. Núm. 2.
- OCDE (1994). *Economic Instruments in Environmental Policy: Lessons from OECD Experience and their relevance to Developing Economies*. Paris: OCDE.
- Point Carbon (2008). *Carbon 2008. Post-2012 Is Now*. Oslo: Point Carbon.
- Scotney R., Chapman S., Hepburn C., Jie C. (2012). *Carbon Markets and Climate Policy in China*. UK: The Climate Institute.
- SEMARNAT (2007). Estrategia nacional de cambio climático. México: SEMARNAT.
- Stavins R. (2003). *Market-based Environmental Policies: what can we learn from U.S. experience (and related research)?*. California: Harvard University Press.
- The Climate Institute (2014). *China's Pursuit of a Clean Energy Future*. Canberra: The Climate Institute.
- World Bank (1992). *The World Development Report. Development and the Environment*. New York: Oxford University Press.
- World Resources Institute (WRI) (2014). *Climate Analysis Indicators Tool: WRI's Climate Data Explorer*. Washington: WRI.

CAPÍTULO 5

Perspectivas en la construcción de capacidades tecnológicas para el sector eólico en México²²

Raúl Arturo Alvarado López²³

INTRODUCCIÓN

En el actual contexto institucional mexicano, en particular con la Reforma Energética de 2013-2014, se pretendió fortalecer la actividad de generación eléctrica, mediante una explotación más extensiva de las energías renovables y en donde la energía eólica tendría un papel preponderante. Para que lo anterior, es necesario romper (disminuir) la inercia tecnológica de las energías convencionales y un mayor impulso a las tecnologías renovables.

A partir de un estudio previo con nueve casos de estudio para el análisis de capacidades tecnológicas²⁴ se trató de subrayar la importancia que tiene la actuación combinada de los diferentes actores, tales como las diferentes organizaciones que participan en el sector eólico en México (tanto del sector público como privado), para poder incursionar en sendas de aprendizaje e innovación.

22 El presente trabajo forma parte de la tesis doctoral, nombrada: Capacidades Tecnológicas del Sector Eólico en México: Análisis y Perspectivas (Alvarado, 2015).

23 Doctor en Economía por la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Economía-UNAM. Desde noviembre de 2016 Catedrático CONACYT-INFO-TEC (sede Aguascalientes). Correos de contacto raul.alvarado@infotec.mx y alra.unam@yahoo.com.mx

24 Entendiendo a las capacidades tecnológicas como “la habilidad para hacer un uso efectivo del conocimiento tecnológico para asimilar, utilizar, adaptar y cambiar las tecnologías existentes. Esto también permite crear nuevas tecnologías y desarrollar nuevos productos y procesos como respuesta al entorno económico” Kim (1997).

Destacando que el proceso de innovación depende de las interacciones que crean y difunden nuevo conocimiento tecnológico aplicado en la economía. Es así que el conocimiento tecnológico y la construcción de capacidades tecnológicas en un nuevo sector industrial, como es el de la energía eólica en México, es crucial para dar respuesta a la demanda del sector, pero sobre todo para lograr ampliar la oferta de bienes y servicios tanto al mercado local como para el mercado internacional.

Se espera que la generación eoloelectrónica en México cobre una mayor penetración en los próximos años, a partir de los objetivos planteados tanto en el mediano como en el largo plazo, por tal motivo, resulta necesario que la industria local reconozca, y sobre todo aproveche las nuevas condiciones institucionales existentes y las estructuras industriales presentes con el objetivo de hacer de las capacidades tecnológicas con las que actualmente cuentan, las diferentes organizaciones que participan el sector eólico, el detonante de una industria doméstica ligada al sector y que a su vez repercuta en un mayor aprovechamiento de los recursos eólicos nacionales, diversificando así sus beneficios en las diferentes esferas productivas y sociales.

Según proyecciones realizadas por la Asociación Mexicana de Energía Eólica (AMDEE), se espera que para el 2020-2022, se incremente en cinco veces la actual capacidad instalada. Lo cual, sin duda, representa un reto importante para las actuales organizaciones que participan, o bien para aquellas organizaciones que tienen interés de participar en el sector, por tal motivo, el desafío central es el fortalecimiento y acumulación más dinámica de capacidades tecnológicas que permitan la consolidación de una cadena de valor asociada al sector y que cuente con una mayor presencia de la industria nacional.

En este sentido, lo importante es que, a partir de las actuales capacidades tecnológicas, se logren detonar y diversificar un mayor número de ellas al interior del país, y no sólo se concentre en las empresas extranjeras como ocurre actualmente. Hay que puntualizar que una

de las principales estrategias tendría que ser la socialización de dichas capacidades mediante la cooperación entre las organizaciones de los diferentes sectores productivos y de investigación, aprovechando los marcos institucionales existentes.

En este sentido, la cooperación podría ser una de las alternativas para enfrentar las diferentes externalidades a las que se enfrentan las organizaciones, tales como los diferentes costos de transacción asociados al desarrollo de proyectos, principalmente derivados de la construcción de capacidades tecnológicas prioritarias para la consolidación de una industria eólica local.

Por tal motivo, el objetivo del presente trabajo es hacer un análisis descriptivo de las perspectivas que actualmente presenta el sector eólico en México en la conformación de más y mejores capacidades tecnológicas locales, esto desde la visión del Gobierno Federal (en adelante el Estado), de las entidades de educación superior y centros de Investigación y Desarrollo (I+D), ello a partir de las últimas modificaciones a los marcos normativos del sector eléctrico en México y desde la visión de las empresas (para lo cual se parte de la información recabada mediante entrevistas a 9 empresas clave del sector).

Para lo anterior, en el primer apartado se presenta un breve análisis en torno al tema de los costos de transacción, considerando que es un tema que se encuentra presente en el desarrollo de proyectos eólicos de gran potencia, en este tema, se hace énfasis en los costos de transacción y de la importancia de la cooperación como estrategia para reducir aquellos costos (de transacción) asociados a la generación de capacidades tecnológicas locales. En el segundo apartado se presenta el análisis sobre las perspectivas en la construcción de capacidades tecnológicas, esto desde la visión del Estado, de las entidades de educación superior y centros de I+D (este análisis se realiza a partir de los objetivos del CEMIE-Eólico) y finalmente desde la visión de las empresas.

COSTOS DE TRANSACCIÓN ASOCIADOS AL SECTOR EÓLICO EN MÉXICO

La racionalidad económica de las organizaciones les obliga a plantearse como objetivo prioritario la optimización de sus recursos y la obtención de ganancias en el mercado, a ello se suma el dinamismo de los mercados actuales que eleva los niveles de competencia entre ellas, las cuales se ven en la necesidad de hacer un uso más intensivo de los recursos disponibles y minimizar costos por todas las vías posibles.

El desarrollo de proyectos eólicos en México implica que las diferentes organizaciones participantes incurran en diversos costos de transacción, considerando que dichos costos son aquellos en los que incurren las organizaciones por realizar un intercambio económico (una transacción en el mercado), esto bajo la primicia de la competencia imperfecta e información asimétrica.²⁵

De la misma manera las organizaciones incurren en diversos costos de transacción cuando dichas organizaciones buscan difundir determinados aprendizajes tecnológicos que buscan objetivos comunes, como puede ser el caso de potencializar o fortalecer la construcción de mayores y/o mejores capacidades tecnológicas en beneficio de un sector productivo determinado.

La difusión de dichos aprendizajes y capacidades tecnológicas implica diversos costos de transacción que no hacen operable dicho proceso, en este sentido, el concepto de cooperar toma un papel relevante, considerando que dicho concepto se refiere a “la acción de trabajar conjuntamente con otro u otros para el mismo fin” (un fin común), por

25 Entendiendo a estas últimas como fallas de mercado, donde la competencia imperfecta tienen como principales implicaciones el control de mercado a partir de la fijación de precios. En tanto, que la información asimétrica se refiere cuando los agentes involucrados en una transacción económica no poseen la misma información.

lo que se puede considerar como una guía primordial para el establecimiento de vínculos entre personas, empresas o cualquier otro tipo de organización (Alvarado, 2013).

En este sentido, en el presente apartado se aborda el tema de los costos de transacción asociados al desarrollo de proyectos eólicos en México, centrándose en subrayar la importancia de la cooperación entre las organizaciones como estrategia y/o alternativa para disminuir los costos de transacción asociados a la difusión del aprendizaje tecnológico entre las organizaciones y, por lo tanto, a la construcción de capacidades tecnológicas.

Costos de transacción asociados al desarrollo de proyectos eólicos

Un elemento central en el aprovechamiento de los recursos energéticos renovables y en el desempeño de las medidas encaminadas a la mejora de la eficiencia energética y de la reducción de las emisiones de CO₂, es el tema de los costos de transacción asociados a la implementación de este tipo de proyectos, ya que dichos costos se pueden traducir en que, en algunos casos, pueden llegar a suponer un verdadero obstáculo para el desarrollo y éxito de tales proyectos. Hay que destacar que en general los proyectos de energías renovables se pueden enfrentar a costos relativamente mayores en comparación con los proyectos energéticos convencionales.

Lo anterior, se debe, entre otras razones, a que:

- a) Aun cuando muchos de los proyectos de energías renovables son pequeños, tienen que cumplir el mismo conjunto de trámites que los de mayor escala;
- b) Las evaluaciones de impacto ambiental son más complejas que las de proyectos que utilizan combustibles fósiles, ya que los de energías renovables, por lo general, ocupan amplias extensiones de tierra (además de que las variedades de flora y fauna que deben ser consideradas en las evaluaciones); y

- c) Hay poca experiencia para este tipo de evaluaciones (en particular para el caso de los parques eólicos en México y en general otras energías renovables) efectuar estos estudios tiene un costo –de transacción– que, en muchas ocasiones, son relativamente altos.

Dentro de los proyectos eólicos unos de los principales costos de transacción son los derivados de las barreras a la entrada para los desarrolladores de proyectos de gran potencia. Dentro de las principales barreras a la entrada podemos encontrar: a) Infraestructura de transmisión (escasas líneas de transmisión en las zonas donde se desarrollan los proyectos); b) Arrendamiento de tierras; c) Disponibilidad y costo de la tecnología; d) Altos costos de inversión y restricción crediticia y e) Regulaciones y legislaciones.

Hay que destacar que si bien las reformas realizadas entre 2013-2014 a las diferentes leyes para el aprovechamiento de los diferentes recursos energéticos renovables, buscan reducir los costos de transacción asociados a la explotación de los mismos, también hay que subrayar que su aprovechamiento se ha visto limitado hacia el sector público mexicano, ya que como se refleja en la Reforma Energética (2013), los objetivos centrales de la misma es seguir privilegiando la participación del sector privado en la explotación de estos recursos.

Lo anterior ha resultado ser una limitante para la consolidación de una industria eólica doméstica ya que no existe un marco normativo y sobre todo una política industrial que impulse a una industria asociada a estas fuentes de energía, como si ha sucedido en otros países y que han hecho de la energía eólica una fuente de desarrollo industrial local.

Sin embargo, hay que destacar que un aspecto central para internalizar los diferentes costos de transacción asociados a la energía eólica es la cooperación entre las diferentes organizaciones con interés de integrarse al sector, lo cual puede ser fundamental para la generación de aprendizajes y la construcción de capacidades tecnológicas locales.

La cooperación como estrategia para reducir los costos de transacción derivados de la generación de capacidades tecnológicas

A la luz de la teoría de los costos de transacción, se reconoce que dadas las condiciones del mercado a las que se enfrentan las empresas, lejos de operar en forma individual y aislada, han creado paulatinamente, redes cooperativas, alianzas o fusiones que les permiten potencializar sus capacidades y aprovechar oportunidades que el mercado ofrece. Lo anterior, con el fin de reducir los diversos costos de transacción asociados al sistema económico.

En cierta medida la cooperación entre empresas (y demás organizaciones) ha permitido que éstas replanteen sus estrategias y objetivos al explorar nuevas dimensiones como cooperar con sus competidores directos, colaboración táctica, con el fin de competir a escalas cada vez mayores, o cooperar con sus principales socios para hacer más eficiente la producción, minimizar costos, compartir riesgos y/o compartir capacidades tecnológicas y humanas (Alvarado, 2013).

A nivel de la empresa, al perseguir sus intereses personales pueden entrar en conflicto con otras organizaciones, pero a la vez observan, que actuando cooperativamente es posible obtener una ganancia conjunta derivada de un esfuerzo colectivo, superior a la ganancia que pudieran alcanzar cada uno de ellos actuando individualmente, es así que se plantea que mediante acuerdos cooperativos es posible obtener un mayor nivel de beneficios, como puede ser el caso aquí planteado, el de generar más y mejores capacidades tecnológicas que deriven en el fortalecimiento de una industria local.

Entre los objetivos para incursionar en procesos de cooperación y colaboración tecnológica por parte de diferentes organizaciones con interés de incursionar al sector o incrementar su participación en el mismo, es poder replantear sus estrategias y objetivos individuales para explorar y explotar nuevas alternativas en el aprovechamiento de oportunidades que el mercado eólico ofrece.

Tal como lo describe Coase (1937), en el ambiente del mercado, el papel de la cooperación entre las diferentes organizaciones de determinado sector productivo es relevante, pues es en dicho ambiente donde las empresas confluyen en un proceso de competencia constante y donde los costos de transacción se hacen presentes en un escenario de incertidumbre, por lo cual, la cooperación surge como una estrategia de reducir dichos costos, además de que es posible potencializar la construcción de capacidades tecnológicas tanto individuales como colectivas.²⁶

La idea es que la cooperación entre las organizaciones dentro de una dimensión tecnológica (tanto en acuerdos de corto como de largo plazo), logren potencializar la consolidación y aprovechamiento de las ventanas de oportunidad que el nuevo sector presenta a un costo de transacción menor. Los costos son menores porque se disminuye la racionalidad limitada (reducir la incertidumbre) a la que se enfrentan las organizaciones al tratar de participar en un nuevo mercado. La idea es expandir sus capacidades tecnológicas y utilizar de mejor manera los recursos con los que cuentan.

Destacando que cada organización es un conjunto de conexiones con la tecnología, el personal y los métodos muy particulares e individuales, los cuales no pueden modificarse o imitarse con facilidad o rapidez, sin embargo, mediante estrategias cooperativas, se vuelve un proceso más rápido y económico, obteniendo así mejores resultados.

En este sentido, la conformación de una industria local ligada al sector eólico no es una tarea fácil ya que “las empresas y las industrias deben formar un patrón de organización económica que tome en cuenta la necesidad de adquirir conocimientos en forma más especializada” (Demsetz, 1996: 225), el autor destaca además que mientras mayor sea el número de cuerpos de conocimiento diferentes que se requieren

26 Hay que destacar que la cooperación entre las organizaciones no es un acto espontáneo ni desinteresado, ya que los actos cooperativos buscan beneficios colectivos e individuales, que se ven determinados por diversos componentes y factores tales como: los sociales, los económicos, los institucionales y los medioambientales.

para producir un determinado bien (o servicio), o más especializado sea el conocimiento requerido, mayor será la utilización de estructuras colaborativas, potencializando de esta manera los beneficios.

Las capacidades tecnológicas con las que cuentan actualmente las organizaciones que participan en el sector pueden ser potencializadas (y construir nuevas), a un menor costo de transacción, siempre y cuando se establezca el interés de los diferentes agentes por cooperar con la finalidad de obtener y generar mayor conocimiento tecnológico derivado de las tecnologías y servicios ya existentes en el mercado, con el fin de aprovecharlas y adecuarlas a las condiciones específicas del sector en México. La idea es que la cooperación promueva los intereses comunes, como es el de la construcción de capacidades tecnológicas prioritarias a un menor costo y lograr un papel preponderante dentro de la cadena de valor del sector.²⁷

PERSPECTIVAS PARA EL SECTOR EÓLICO EN MÉXICO

La necesidad de generar mecanismos y estrategias mediante los diferentes marcos institucionales, las entidades de Gobierno, las empresas y las instituciones de educación e I+D que permitan generar condiciones para hacer frente a los requerimientos de los futuros desarrollos eólicos, requiere de estrategias que involucren la formación de recursos humanos y la generación de tecnologías locales para disminuir en la medida de lo posible la dependencia que se tiene hacia el exterior (tanto del sector tecnológico como del sector servicios).

27 La construcción de mejores capacidades tecnológicas y la consolidación de una industria local, requiere, por lo tanto, el aprovechamiento de los recursos internos y externos aprovechando los recursos productivos disponibles con el fin de generar y obtener mayor valor agregado. Es así que el comportamiento colaborativo puede ser un pilar para potencializar las capacidades tecnológicas en el aprovechamiento de las oportunidades productivas.

El reto es hacer de la energía eólica no sólo una fuente de abasto eléctrico sustentable sino una fuente de empleos y desarrollo económico local.

Lo anterior, considerando que el 100% de los aerogeneradores instalados en México provienen del extranjero, así como el desarrollo de los principales proyectos provienen principalmente de la inversión privada del exterior, dominada principalmente por España.

El desarrollo de dichos proyectos por parte de empresas extranjeras y las inversiones que representan, son sin lugar a dudas de suma importancia, sin embargo, hay que destacar que los beneficios que estos proyectos generan, tendrían que diversificarse hacia los sectores industriales locales y a la población en general. Lo anterior, mediante la creación de más y mejores empleos, no sólo para la operación y manteniendo de los parques sino en la generación de empleos dentro de todos los eslabones de la cadena de valor, es decir tanto en la manufactura de componentes y equipos como en la prestación de servicios de mayor valor agregado.

Según proyecciones del Estado, se prevé que el sector eólico será un sector muy dinámico que demande importantes inversiones, en el conjunto de las diferentes tecnologías, ello con el apoyo de la Reforma Energética (2013), por ejemplo el Programa de Obras e Inversiones del Sector Eléctrico 2012-2026 (POISE), destaca que en el horizonte de planeación para las nuevas instalaciones eléctricas con base a las energías renovables se considera la entrada en operación de un bloque importante de generación a partir de proyectos eólicos.

El 25 de febrero de 2015, al inaugurarse el congreso *Mexico WindPower* 2015 en la Ciudad de México, el Secretario de Energía Pedro Joaquín Coldwell, destacó que la Reforma Energética buscaría facilitar la participación de nuevos competidores en este sector y por lo tanto, un desarrollo más acelerado de las energías renovables y de manera especial a la energía eólica, dando mayor certidumbre a los inversionistas mediante los certificados de energías limpias, y derechos financieros de transmisión.

Pero para lograr esto, el reto urgente para el corto y mediano plazo, es consolidar el sector eólico, y que genere una mayor competencia en

beneficio de la industria local, lo cual requiere la construcción de capacidades tecnológicas que permitan diversificar los beneficios que el sector genera. En este tenor a continuación, se presenta un breve análisis en torno al tema de las perspectivas que se tienen en el aprovechamiento de la energía eólica y en el desarrollo de mayores capacidades tecnológicas locales, esto desde la visión de los tres agentes ya mencionados.

Perspectivas de las capacidades tecnológicas en el sector eólico

A partir del nuevo marco institucional, el Estado prevé que las energías renovables obtengan cada vez mayor presencia en el sector eléctrico nacional, y en donde se espera que la energía eólica siga teniendo un papel preponderante.

A partir de la entrada en vigor de la Ley para el Aprovechamiento de las Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética en 2008 (LAERFTE) y con las últimas reformas realizadas a esta ley en 2013 y la Ley General de Cambio Climático (LGCC, 2012), se fijaron diversas metas que inciden directamente en la planeación del sector eléctrico y, por lo tanto, deben ser consideradas por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) en sus programas de expansión y aprovechamiento de los energéticos renovables y, por lo tanto, el retiro de centrales de generación a base de combustibles fósiles. Las metas de la Prospectiva del Sector Eléctrico 2013-2027, se presentan en la Tabla 1.

Hay que destacar que para el conjunto de las energías renovables, la tendencia del uso de energía eólica se ha incrementado a una tasa de 69.8% en los últimos años, y se espera que para el 2017, se presente un cambio aún más sustancial en la trayectoria del consumo autoabastecido, esto asociado a la entrada en operación de los proyectos de autoabastecimiento y producción independiente de energía con tecnología eólica, considerados para las temporadas abiertas (2a temporada) en Oaxaca, Tamaulipas y Baja California; que en total suman 3.7 Gigawatt-hora (GWh).

Tabla 1. Metas del sector eléctrico en México

Ley	Metas	Año
Ley para el Aprovechamiento de las Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética	65% máximo de generación con fuentes de energía fósiles.	2024
	60% máximo de generación con fuentes de energía fósiles.	2035
	50% máximo de generación con fuentes de energía fósiles.	2050
Ley General de Cambio Climático	38% como mínimo de generación con fuentes limpias.	2024
	Constitución de un sistema de incentivos que promueva y haga rentable la generación de electricidad a través de energías renovables, como: eólica, solar y mini hidráulica.	2020
	Desarrollo y construcción de infraestructura para el manejo de residuos sólidos que no emitan metano a la atmósfera con centros urbanos de más de cincuenta mil habitantes, y cuando sea viable, implementarán tecnología para la generación de energía eléctrica a partir de emisiones de gas metano.	2018

Fuente: Prospectiva del Sector Eléctrico 2013-2027 (SENER, 2013).

Según el programa de Prospectiva del Sector Eléctrico 2013-2027 de la SENER, para disminuir a 65% entre 2024 y 2027 la participación de generación con combustibles fósiles en la producción eléctrica, resultado del ejercicio de planificación de mínimo costo, una estimación preliminar sería desplazar 56 Terawatt-hora (TWh) y 67 TWh, respectivamente de generación fósil por no fósil.

Para lo anterior, se busca sustituir la generación de ciclos combinados y Tecnologías de Carbón Limpio (TCL) por las de centrales nucleares y tecnologías con fuentes de energía renovables. Es importante destacar que son los proyectos basados en tecnología eólica de donde se pretende tener mayores resultados, para el primer año de ajustes al programa (2020), el cual espera una participación de 50.1% del total de la capacidad neta.²⁸

La energía eólica ha sido la de mayor expansión, dentro de las energías renovables (sin contar la gran hidráulica) que en los últimos años ha tenido tanto en México como en el Mundo, ya que ésta tecnología se ha convirtiendo en una alternativa cada vez más rentable, considerando que el costo nivelado de la energía eólica puede variar significativamente de acuerdo a la calidad del viento, el costo de inversión, los requerimientos de operación y mantenimiento, los costos de capital, así como las mejoras tecnológicas. Los recientes avances tecnológicos han hecho posible que los equipos con alturas superiores de hélice y rotores largos ofrezcan mayor captura de energía, sin embargo, estos factores han incrementado su costo de inversión.

Además de que existe otro factor importante a considerar, como son los costos asociados del traslado de la tecnología desde donde se desarrolla (principalmente en Europa) a los lugares donde se ubica-

28 Por otro lado, la tecnología de ciclo combinado reduciría su participación a tan sólo 33.1%, seguido por la turbogas con 13.5%, hidroeléctrica con 2.2% y finalmente tecnología geotérmica con 1.1% del total de 6,107 MW que se espera obtener para el año de inicio del programa.

ran los proyectos, en este sentido, resulta relevante ubicar una industria ligada al aprovechamiento de esta fuente de energía en el propio país donde son desarrollados los proyectos, más aún cuando existe un importante potencial por explotar, como es el caso de México.

En las siguientes Tablas se presenta la proyección de corto plazo en el aprovechamiento de la energía eólica en México, según el Programa Especial para el Aprovechamiento de Energías Renovables (PEAER, 2013). Para una mayor participación de la industria local la LAERFTE, propone la creación de fondos y fideicomisos por parte del Estado que tengan por objeto apoyar la investigación, promoción y aprovechamiento de investigación científica y tecnológica en materia de energía renovable y garantizar así los objetivos de la transición energética hacia un uso más extensivo de los energéticos renovables.

Tabla 2. Estimación del crecimiento anual de la capacidad instalada eólica en México, (2015-2018)

Tabla 3. Estimación del crecimiento anual de generación eoloelectrica en México, (2015-2018)

Año	Capacidad de generación eléctrica (MW)	Generación eléctrica (GWh/año)
2015	3,337	10,232
2016	3,840 ²⁹	11,773
2017	8,722	26,742
2018	8,922	27,355

Fuente: (PEAER, 2013).

De la misma manera con el avance en la aplicación de la Reforma Energética, se plantea construir capacidades tecnológicas locales a partir de estrategias tales como: i) Una mayor apertura hacia la inversión (tanto nacional como del exterior) y competencia; ii) Perspectivas claras sobre las trayectorias de ampliación del mercado para las energías renovables; iii) Promoción de la interacción con la autoridad y comunidades para la gestión social de los proyectos; iv) Mecanismos más eficientes de mercado para incentivar la inversión (tanto para el desarrollo de proyectos como para la industria manufacturera y de servicios asociados al sector) y v) Promoción de proyectos para la generación distribuida.

De esta manera se busca que los sectores públicos y privados fomenten la explotación de los recursos energéticos renovables con los

²⁹ Al cierre de 2016, según la AMDEE se alcanzó una capacidad instalada de 3,527 MW. Dato disponible en: <http://www.amdee.org/mapas/parques-eolicos-mexico-2016> (fecha de consulta: junio de 2017).

incentivos generados por los Certificados de Energías Limpias, con los cuales se busca generar las condiciones de certidumbre que favorezcan el desarrollo del sector. Con los objetivos y metas de la Prospectiva de Energías Renovables (2014-2028) (SENER, 2014), además se busca incrementar la participación de las energías renovables dentro del sector energético, plantean impulsar el desarrollo tecnológico, el talento (recursos humanos) y de cadenas de valor asociadas al sector.

Sin embargo, se plantea la necesidad de contar con un mayor desarrollo de empleos verdes y de alta productividad, un incremento en las bases del crecimiento endógeno, el crecimiento de la base exportadora y la contribución al desarrollo de una economía del conocimiento. Pero para poder alcanzar dichos objetivos urge impulsar una política industrial que incentive el desarrollo de una cadena de valor nacional asociada al sector. Además, hay que destacar que los porcentajes mínimos de contenido nacional tanto para el área de tecnologías como de servicios no quedan claramente establecidos, lo cual es un elemento central para estimular una mayor participación de la industria local.³⁰

Por otra parte, en el marco de la Ley de Ciencia y Tecnología, para el sector energía, existe el Fondo Sectorial SENER-CONACYT de Sustentabilidad Energética (FSE), instrumento creado para impulsar la investigación científica y tecnológica aplicada, así como la adopción, innovación, asimilación y desarrollo tecnológico en cuatro líneas: 1) eficiencia energética; 2) fuentes renovables de energía; 3) uso de tec-

30 Sin embargo, como estrategia de Estado para el desarrollo de capacidades tecnológicas en las energías renovables, la Secretaría de Economía (SE) cuenta con el Programa de Desarrollo de las Industrias de Alta Tecnología (PRODIAT), que hasta el momento se aprovecha en la industria solar, pero podría ser aprovechado por otros sectores tecnológicos, con el fin de generar los diagnósticos estratégicos sobre las barreras del mercado que impiden el desarrollo de mayores componentes de las cadenas de valor competitivas (SENER, 2014).

nologías limpias y 4) diversificación de fuentes primarias de energía. El Fondo cuenta con dos iniciativas insignia: los Centros Mexicanos de Innovación en Energía (CEMIEs) y el Laboratorio de Innovación en Sustentabilidad Energética.

El Estado (por lo menos en el papel), destaca la necesidad de construir capacidades tecnológicas locales que detonen en innovaciones a favor del crecimiento económico y la competitividad. Así es que, mediante el nuevo marco institucional, el Estado busca mejorar el proceso de intercambio de conocimiento de los centros de I+D y universidades hacia la industria y el mercado. Sin embargo, el reto es impulsar la productividad de la economía y promover la generación de nuevos mercados.

También, como estrategia de Estado se creó el Programa Estratégico de Formación de Recursos Humanos en Materia Energética (PEFRH-ME, 2014), cuyo objetivo general es que México aproveche y potencie su talento para apoyar el desarrollo de un sector de energía más atractivo, dinámico y competitivo. Para ello, se plantea como necesario cerrar la brecha entre la oferta y la demanda de especialistas capaces de desempeñarse activamente en el sector energético en los próximos años, tanto en la cantidad como con la calidad y los perfiles requeridos.³¹

En la visión del Estado, se prevé que en los próximos años (2020), la industria generará un mínimo de 135 mil empleos directos y 365 mil indirectos y que tenga un efecto multiplicador en el resto de la economía. Para lo cual, las principales acciones del Programa Estratégico se concentrarán en el otorgamiento de más de 60 mil becas de nivel técnico, superior, especializaciones, posgrado e idiomas, para la preparación de especialistas.

Los objetivos específicos del programa son: a) Estimular la ampliación de una oferta educativa de calidad y pertinencia; b) Fomen-

31 El diseño del programa estuvo a cargo del CONACYT, la Secretaría de Energía y la Secretaría de Educación Pública (SEP).

tar la formación de capital humano especializado y de alto nivel; c) Incrementar la oferta de programas para la reconversión de técnicos y profesionales; d) Fomentar la oferta de programas de adiestramiento y certificación de competencias y e) Crear o consolidar centros de adiestramiento en las empresas del sector y establecer una campaña de formación y actualización.

Finalmente hay que destacar que si bien en México, se han logrado construir diferentes capacidades tecnológicas en el sector, ésta capacidades son insuficientes para la conformación de una industria doméstica, en ese sentido la urgencia de ir conformando más y mejores capacidades tecnológicas que logren dar respuesta a las proyecciones de crecimiento del sector, y en donde el papel del Estado es central para alcanzar tales objetivos.

Perspectivas de las capacidades tecnológicas en el sector eólico: La visión de las entidades de educación superior y centros de I+D

El impulso a la vinculación y consolidación de capacidades tecnológicas resulta ser un elemento central que permitirá al sector energético en general y a las energías renovables en particular, contar con las condiciones científicas, tecnológicas y de innovación suficientes para desarrollar las soluciones tecnológicas que el país necesita. El aprovechamiento de las energías renovables es una de las principales áreas de la investigación en donde la comunidad científico-tecnológica del país ha enfocado parte de sus esfuerzos desde hace varios años (pero sin duda se requiere de mayores esfuerzos).

México cuenta con diversas capacidades tecnológicas en las diferentes fuentes renovables de energía (en mayor o en menor medida dependiendo de la fuente de energía), sin embargo, es una realidad que dichas capacidades requieren del fortalecimiento, consolidación y vinculación, con el fin de alinearlas y potencializarlas en beneficio de las esferas ambiental, social y económica.

De esta manera es que los CEMIEs³², buscan incidir favorablemente en el aprovechamiento de las energías renovables, la consolidación y vinculación de las capacidades científicas y tecnológicas existentes en la materia, y la consecuente formación de recursos humanos especializados (principalmente aéreas de mayor valor agregado dentro de la cadena de valor).

Los CEMIEs son un primer paso hacia la I+D tecnológico del sector energético sustentado en la innovación mediante la interacción de diferentes agentes tanto del sector productivo, pero principalmente del de educación e I+D. Los Centros son proyectos nacionales, integrales y multidisciplinarios que comprenden la conformación de consorcios en donde se busca conjuntar y alinear las capacidades nacionales existentes y construir nuevas (SENER, 2014).

Como una estrategia de cooperación entre diversas organizaciones (públicas, privadas, del sector productivo y educativo) para el desarrollo tecnológico en el sector eólico en México se crea en 2013 el Fondo CONACYT-SENER-Sustentabilidad Energética (FSE), el cual publicó una convocatoria para conformar un Centro Mexicano de Innovación en Energía Eólica (CEMIE-Eólico³³), donde los objetivos centrales fueron la integración de un consorcio que genere sinergias en favor del aprovechamiento de la energía eólica en el país, incluyendo la planeación científico-tecnológica en el mediano y largo plazo para el conocimiento, dominio y uso favorable de la energía eólica.

32 Los Centros se desarrollan en las áreas de Geotérmica, Solar, Bioenergía, Océano y claro Eólico.

33 Información disponible en: <http://evaluarer.iie.org.mx:8080/cemie> (fecha de consulta: junio de 2014).

Asimismo, se presenta como el medio para lograr el desarrollo y la consolidación de capacidades tecnológicas, la vinculación entre las instituciones y las empresas, el CEMIE-Eólico incluye la ejecución de proyectos estratégicos que propicien la consecución de resultados de valor para el sector energético del País. Las principales líneas de investigación del centro se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Principales líneas de investigación del CEMIE-Eólico

Líneas de investigación	Aerogeneradores.
	Integración a red.
	Formación de recursos humanos especializados.
	Aerodinámica y aero-elástica.
	Materiales y recubrimientos.
	Recurso eólico.
	Aplicaciones de inteligencia artificial y mecatrónica.
	Almacenamiento de energía.
	Pruebas, validación de diseño de viento libre y certificación o acreditación de sistemas, subsistemas o componentes para aerogeneradores de mediana capacidad.

Fuente: SENER (2014).

El consorcio se encuentra liderado por el Instituto de Investigaciones Eléctricas³⁴ (IIE) e integrado por 32 miembros, los cuales corresponden a 6 centros públicos de investigación; 14 instituciones de educación superior; 10 empresas y fundaciones; 1 centro de in-

³⁴ Desde el 24 de diciembre de 2015 dicho Instituto asume el nombre de Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL).

vestigación extranjera y 1 entidad de Gobierno (Estado de Oaxaca), así como dos organizaciones multilaterales que aportarán recursos económicos, estas organizaciones son el Fondo Mundial para el Medio Ambiente (GEF) y el Banco Interamericano para el Desarrollo (BID).

Con la conformación de este primer grupo de trabajo del CEMIE-Eólico, la distribución geográfica quedó conformada de la forma en que se presenta en la Figura 1. La administración del CEMIE-Eólico se realiza a través del IIE quien funge como “Sujeto de Apoyo”, recibe los recursos para el proyecto y se encargará de su ejercicio y de su distribución a los participantes del consorcio de acuerdo con los lineamientos aplicables y con los planes estratégico y operativo, así como de acuerdo con las modificaciones, adecuaciones o actualizaciones que se hagan a dichos planes como consecuencia de los acuerdos que tome el Grupo Directivo del CEMIE-Eólico.

Figura 1. Distribución geográfica de los miembros iniciales del CIMIE-Eólico



Fuente: CEMIE-Eólico, disponible en: <http://evaluarer.iie.org.mx:8080/cemie>.

Con la conformación del CEMIE-Eólico, se busca lograr desarrollar diversas innovaciones para la energía eólica en México, actualmente (primera etapa) para el inicio de trabajos del consorcio se cuenta con 13 proyectos a realizarse en diferentes organizaciones participantes. Este tipo de acuerdos entre diferentes organizaciones, que tienen como objetivos comunes ampliar los conocimientos en torno al tema eólico, sin duda son una estrategia que permite reducir los costos de transacción asociados a la propia difusión de dichos conocimientos entre las organizaciones participantes y, por lo tanto, potencializar un mayor número de capacidades tecnológicas para la consolidación de una industria eólica local y el fortalecimiento de su cadena de suministros.

En este sentido, es que la cooperación entre diferentes organizaciones y de diferentes sectores y objetivos rectores toma relevancia al potencializar los diferentes beneficios que de manera individual resultaría más difícil y costoso. Además de facilitar la generación de conocimiento tecnológico prioritario para el sector y con la visión de tener una mayor participación de las organizaciones.

Algo importante a destacar es que si bien el CEMIE-Eólico surge como una iniciativa y es apoyado financieramente por el Estado, el Centro refleja las estrategias y esfuerzos de las entidades de educación superior y de los centros de I+D para la consolidación de más y mejores capacidades tecnológicas para el sector en México y que permitirá potencializar aquellas capacidades que han logrado acumular a lo largo de su vida y de sus diferentes actividades de investigación científicas que hayan realizado.

*Perspectivas de las capacidades tecnológicas en el sector eólico:
la visión de las Empresas*

Resulta importante conocer las perspectivas que tienen las empresas en torno a la generación de capacidades tecnológicas locales a par-

tir de sus diferentes actividades que actualmente realizan en México para el sector, por tal motivo, en el marco de la exposición y congreso *Mexico WindPower* realizado en la Ciudad de México los días 25 y 26 de febrero de 2015, se realizaron algunas entrevistas a empresas clave que participan en el mercado eólico en México, con el fin de conocer cuáles es su percepción en cuanto a su participación en el sector y en torno a la construcción y fortalecimiento de sus capacidades tecnológicas en el futuro.

Por tal motivo, y a partir de los resultados arrojados en un estudio previo sobre capacidades tecnológicas en el sector eólico, se distinguen algunas capacidades nucleares (distintivas y comunes a los casos de estudio) y en torno a ellas se busca conocer cuáles son sus perspectivas para su fortalecimiento.³⁵

Con las entrevistas realizadas se buscó conocer entre otras cosas, las actividades que desarrollan las empresas para el sector eólico en México, en qué áreas de la cadena de valor se involucran o participan, qué percepción tienen respecto a la Reforma Energética para poder seguir participando en el sector (certidumbre e incentivos) y cuáles son los planes de corto y mediano plazo de la empresa en el sector en México. Sin embargo, principalmente se buscó conocer las perspectivas que las empresas tienen respecto a las diferentes actividades que realizan o esperan realizar para fortalecer las capacidades tecnológicas descritas en la Tabla 5.

35 Tomando de referencia la matriz de capacidades tecnológicas desarrollada por Bell y Pavitt (1995) se realizó un análisis cualitativo de capacidades tecnológicas para el sector eólico en México, fue un análisis de casos de estudio, 9 casos en total divididos en tres grupos: 1) Entidades de educación superior y centros de I+D, 2) Empresas desarrolladoras y operadoras de proyectos de gran potencia y 3) Empresas prestadoras de servicios y componentes. Fue un estudio de corte trasversal, con fuentes de información a partir de entrevistas a profundidad a agentes clave, Información documental e institucional de la organización e Información recabada en eventos del sector. El análisis dio como resultado las mencionadas capacidades tecnológicas, las cuales resultaron distintivas y comunes a los casos estudiados (Alvarado, 2015).

Tabla 5. Capacidades tecnológicas específicas

1) Formación de Recursos Humanos (capacitación/reclutamiento)	2) Licenciamiento de nueva tecnología y/o Ingeniería de reversa
3) Maquila de equipos en territorio nacional	4) Mejora de procesos, componentes y equipos en territorio nacional
5) Desarrollo de nuevos componentes y equipos (en casa matriz y en México)	6) Actividades de I+D en territorio nacional
7) Procesos de vinculación (Univ-Emp-Gob)	Otros

Fuente: Elaboración propia a partir Alvarado (2015).

Para tal propósito fue posible entrevistar a ocho empresas,³⁶ seis de ellas desarrolladoras de tecnología y/o operadoras de parques eólicos, y dos más que pertenecen al sector de servicios y componentes (las dos últimas empresas). El interés por conocer la visión de las empresas respecto a su desempeño futuro en el sector y en la acumulación de capacidades tecnológicas radica en que gran parte de las capacidades son construidas al interior de las mismas y que en muchas ocasiones son ellas las que impulsan su difusión y creación de capacidades tecnológicas locales.

Lo anterior, destacando que el aumento de la competencia y la complejidad de los mercados impulsan a la especialización de las empresas basada en el aprendizaje tecnológico, la especialización dirigida hacia los recursos humanos y el desarrollo de nuevas y mejores tecnologías, donde gran parte de estos esfuerzos se encuentran en las grandes empresas multinacionales. Para el caso del sector eólico, éste se encuentra claramente dominado por grandes empresas multinacionales, en donde

36 El número de entrevistas realizadas obedeció a la accesibilidad para realizar la misma y de la información necesaria para su documentación.

su importancia económica actualmente radica en que la presencia de dichas empresas tenga un impacto positivo sobre el desarrollo nacional o regional, favoreciendo la consolidación de cadenas de valor locales.

Hay que subrayar que existen voces a favor y en contra en torno al impacto de dichas empresas, en el desarrollo de la industria local, en este sentido, Contreras *et al.* (2012:301), plantea que:

“Diversos estudios han mostrado que la presencia en el país de este tipo de empresas [...] pueden propiciar nuevas funciones productivas y administrativas hacia las empresas locales, así como diversas derramas tecnológicas y de conocimiento sobre la economía regional (o en determinado sector productivo). Pero otros argumentan que, si bien las operaciones de estas empresas pueden conducir a la mejora en productos, tecnologías y modelos de organización, tales fenómenos no tienen efectos claros en el desempeño macroeconómico del país ni en las regiones donde se han producido”, más aún cuando las tecnologías son desarrolladas totalmente en el exterior, es decir que los beneficios o las actividades con mayor valor agregado no se difunden localmente.

Por tal motivo, la creación de capacidades tecnológicas locales juega un papel central para el aprovechamiento de las diferentes oportunidades que un nuevo sector, como el eólico ofrece, destacando que la actividad innovadora y el aprovechamiento de las nuevas tecnologías no depende de capacidades o iniciativas individuales, sino que involucra principalmente las relaciones colaborativas para socializar y fortalecer las capacidades tecnológicas locales en su conjunto. Esto dependerá de las capacidades de absorción de las organizaciones locales para obtener beneficios, generar conocimiento y aprovechar oportunidades de aquellos entornos institucionales que impulsen la innovación y el aprendizaje tecnológico, en donde cabe

recaltar que los procesos de cooperación resultan centrales para lograr y alcanzar dicho objetivo.

El desarrollo y consolidación de capacidades tecnológicas locales resultan prioritarios para la consolidación de la industria ligada al aprovechamiento del recurso eólico, ya sean estas desarrolladas por empresas extranjeras o locales, lo importante es construir y fortalecer aquellas capacidades que logren dar respuesta a los crecientes requerimientos del sector. A partir de estas consideraciones, a continuación, se presenta el análisis realizado a las empresas en torno el tema de sus perspectivas para el fortalecimiento de sus capacidades tecnológicas.

I. General Electric (GE Power & Water). Empresa de origen estadounidense, con amplia presencia en México en diversas líneas de negocio para el sector eléctrico. En el sector eólico se incorporó en 2013 con la puesta en marcha del parque eólico de “Santa Catarina, Nuevo León (22 MW)”, sin embargo, la empresa tiene proyectada una mayor participación en los próximos años, principalmente en la línea de negocio de venta de turbinas y en el posible desarrollo de proyectos.

La empresa ve como positiva la Reforma Energética para poder seguir teniendo una mayor participación en el sector eléctrico en general y en particular en el sector eólico. Además, subraya su interés por desarrollar más y mejores capacidades tecnológicas, muchas de las cuales busca que sean desarrolladas localmente, ejemplo de ello es el GEIQ (*General Electric Infrastructure Querétaro*, por sus siglas en inglés), con en el que la empresa busca detonar una mayor participación. En torno al tema de las capacidades específicas, la empresa refiere las siguientes perspectivas:

Tabla 6. Perspectivas de GE en torno a las capacidades tecnológicas

Capacidades	Descripción de perspectivas
Formación de Recursos Humanos (capacitación/reclutamiento)	Cuenta con el GEIQ ³⁷ , centro integrado por ingenieros mexicanos; expertos que están cambiando la forma de ver el potencial que tiene el país en el marco de la economía global del conocimiento, realizando actividades de I+D. Se menciona que se cuenta con un grupo de trabajo para el área eólica y que será un área que seguirá creciendo en los próximos años dentro del GEIQ.
Licenciamiento de nueva tecnología y/o Ingeniería de reversa	La empresa cuenta con tecnología propia (componentes y equipos), las turbinas eólicas instaladas en México son las más modernas con las que actualmente cuenta la empresa de 2.75 MW de potencia. Se espera que la empresa realice una mayor inversión en al área de diseño y componentes en territorio nacional dentro del GEIQ.
Maquila de equipos en territorio nacional	En el mediano plazo la empresa busca desarrollar y maquilar componentes varios en territorio nacional, principalmente torres y álabes. Esto como una estrategia para reducir costos y fortalecer del mercado de Latinoamérica desde México.
Mejora de procesos, componentes y equipos en territorio nacional	En los próximos años se espera que el GEIQ, cuente con un área más grande y dinámica para el sector eólico, ello con el crecimiento de la plantilla de ingenieros mexicanos (talento nacional).

37 Actualmente, el GEIQ se especializa en los negocios de generación de energía y de aviación. Pero también fabrica accesorios como bombas de combustible, arneses, sistemas que dirigen el aire dentro de la turbina.

Capacidades	Descripción de perspectivas
Desarrollo de nuevos componentes y equipos (en casa matriz y en México)	Por el momento, en México se realizan algunas actividades de diseño, I+D dentro del GEIQ, pero la maquila y el ensamblaje de la tecnología eólica se realiza en la casa matriz y subsidiarias (principalmente en USA). Sin embargo, no se descarta que en el mediano plazo se pueda realizar parte del ensamble de la tecnología en México (ello dependerá de cómo se desarrolle el sector en el futuro).
Actividades de I+D en territorio nacional	La I+D más fuerte para el sector eólico que realiza la empresa en México se efectúa en el Departamento de Investigación del Recurso Eólico del GEIQ. Y en los próximos años se buscará una mayor actividad de I+D para el sector eólico principalmente en áreas tecnológicas.
Procesos de vinculación (Univ-Emp-Gob)	Si existen varios acuerdos de vinculación del GEIQ con otros centros públicos de investigación, empresas y universidades de la región de Querétaro para mejorar los procesos de desarrollo tecnológico, y con la expectativa de seguir incrementado la actividad cooperativa.
Otros	En México la empresa no realiza ingeniería de detalle para el diseño y desarrollo de proyectos sin embargo no se descarta la posibilidad de incursionar en el futuro en el desarrollo de los proyectos y en la operación y mantenimiento. Actualmente la principal línea de negocio de la empresa en el sector eólico es la venta de turbinas.

Fuente: Elaboración propia.

La empresa ha hecho hincapié en el interés por desarrollar capacidades tecnológicas locales y no sólo vender tecnología, ejemplo de ello es el GEIQ, mediante el cual se espera seguir desarrollando el talento mexicano, en el sector mediante las diferentes estrategias para la I+D tecnológico y seguir fortaleciendo sus diferentes líneas de negocio en el sector eléctrico.

II. Vestas México. Empresa de origen danés dedicada principalmente al desarrollo, fabricación, venta y mantenimiento de tecnología eólica. Es el primer proveedor mundial de aerogeneradores de gran potencia, ya que se han instalado más de 40,000 aerogeneradores en 65 países. La experiencia de Vestas va más allá de los aerogeneradores, ya que también cuentan con especialistas en planificación, instalación, operación y mantenimiento. A nivel internacional integran toda la cadena de valor, sin embargo, en México su participación en el sector eólico se centra principalmente en la venta de turbinas eólicas.

Los parques eólicos de México que actualmente utilizan las turbinas de la empresa son: La venta I Oaxaca; Arriaga Chiapas; Los Altos Jalisco y El Porvenir Tamaulipas. La empresa destaca como positiva la Reforma Energética para poder seguir teniendo una mayor participación en el sector. En torno a las capacidades tecnológicas específicas según la empresa tiene las siguientes perspectivas:

Tabla 7. Perspectivas de Vestas en torno a las capacidades tecnológicas específicas

Capacidades	Descripción de perspectivas
Formación de Recursos Humanos (capacitación/reclutamiento)	La empresa destaca que, a partir de su línea de negocio en México, que es la venta de turbinas, no se involucran en la formación de recursos humanos. Subraya que a nivel global cuentan con la formación de recursos humanos altamente capacitados, pero estos se forman en sus centros de I+D (Dinamarca y Alemania principalmente). Y no se tienen perspectivas a futuro de tener algún centro de I+D o de formación de recursos humanos en México.
Licenciamiento de nueva tecnología y/o Ingeniería de reversa	La empresa no realiza ingeniería de reversa ni licencia tecnológica ya que históricamente han contado con desarrollos tecnológicos propios (esto en su casa matriz).
Maquila de equipos en territorio nacional	Toda la tecnología (turbinas) es importada y no hay planes para que se maquile o ensamble la tecnología en México en el futuro.
Mejora de procesos, componentes y equipos en territorio nacional	La experiencia de la utilización de la tecnología en México ha generado aprendizajes que ha permitido a la empresa realizar mejoras tecnológicas, las cuales se realizan en el exterior (casa matriz). No se tienen planes para realizar estas actividades fuera de la casa matriz (de sus centros de I+D).
Desarrollo de nuevos componentes y equipos (en casa matriz y en México)	Todo el diseño y desarrollo de nuevos componentes se realizan únicamente en la casa matriz y filiales del extranjero (tanto en ensamblaje como la maquila de componentes). La empresa no tiene planes en el futuro cercano para realizar esta actividad en México.
Actividades de I+D en territorio nacional	Las actividades de I+D se realizan casi en un 100% en Dinamarca. Y no hay planes para realizarse en México.

Capacidades	Descripción de perspectivas
Procesos de vinculación (Univ-Emp-Gob)	La empresa refiere no tener acuerdos de vinculación o cooperación tecnológica con otras organizaciones en México.
Otros	N/A

Fuente: Elaboración propia a partir de la información proporcionada por el encargado del área de gestión tecnológica para Latinoamérica, Vestas (febrero de 2015).

Se subraya que la empresa, cuenta con las mejores capacidades tecnológicas a nivel mundial en el sector eólico, sin embargo, se hace hincapié en que no existe un interés a mediano ni largo plazo por desarrollar capacidades tecnológicas en México, principalmente porque su línea de negocio para México seguirá siendo la venta de turbinas. Por lo cual, respecto a las capacidades tecnológicas de la empresa se destaca que éstas se seguirán construyendo y acumulando en el exterior, en sus centros de I+D tecnológico de Dinamarca y Alemania.

III. Acciona Energía. Empresa de origen español, con una importante presencia en el sector eólico en México, cuanta con la mayor capacidad eólica instalada al 2014, 556 MW, con la operación de los parques Eurús fase I y II, Oaxaca II, Oaxaca III y Oaxaca IV. Se encuentra presente en toda la cadena de valor, destacando como áreas principales las actividades de desarrollo de proyectos, ingeniería y construcción; fabricación industrial de aerogeneradores; operación y mantenimiento de instalaciones y venta de energía.

Con la Reforma Energética, la empresa espera tener una mayor presencia en los próximos años con el desarrollo de más proyectos, principalmente en Oaxaca, pero esperan también tener presencia en otros Estados de la República. Respecto a las proyecciones de la empresa para el desarrollo de las capacidades específicas, se presentan el análisis en la Tabla 8.

Tabla 8. Perspectivas de Acciona en torno a las capacidades tecnológicas específicas

Capacidades	Descripción de perspectivas
Formación de Recursos Humanos (capacitación/ reclutamiento)	La empresa cuenta con una plantilla importante de recursos humanos altamente capacitados dentro de las diferentes actividades que realiza para el sector eólico. Con los nuevos desarrollos espera seguir incrementado su plantilla (la mayor parte de su personal es mexicano y dedicado a actividades de operación y mantenimiento).
Licenciamiento de nueva tecnología y/o Ingeniería de reversa	Para el sector eólico no se realiza ingeniería de reversa ya que la empresa cuenta con tecnología propia, la cual refieren es una de la más competitiva a nivel internacional.
Maquila de equipos en territorio nacional	No se realiza ningún tipo de ensamble o maquila en México y NO hay planes para realizarlo, por lo menos en el mediano plazo.
Mejora de procesos, componentes y equipos en territorio nacional	Sólo se realiza en la casa matriz o subsidiarias (en el extranjero), pero la información recabada por la operación de los equipos en México ha ayudado a realizar mejoras tecnológicas en los nuevos equipos.
Desarrollo de nuevos componentes y equipos (en casa matriz y en México)	Sólo en la casa matriz, y no hay planes para que se realice en México.
Actividades de I+D en territorio nacional	Las actividades de I+D para el sector eólico se realizan en el centro de I+D de España. Y no hay planes, por lo menos en un futuro cercano de realizarlo en México.
Procesos de vinculación (Univ-Emp-Gob)	Si hay diversos acuerdos de vinculación, principalmente con universidades y centros de I+D de la región del Istmo. Se espera seguir fortaleciendo los acuerdos de cooperación tecnológica en los próximos años.
Otros	N/A

Fuente: Elaboración propia a partir de la información proporcionada por el Técnico en seguimiento de producción de la empresa (febrero de 2015).

Si bien la empresa actualmente opera los parques eólicos más grandes de México, con lo cual refiere que cuenta con un amplia número de recursos humanos capacitados por ellos, principalmente en la operación y mantenimiento de los parques, sin embargo se destaca que la empresa, no tiene el interés en el mediano plazo de tener una actividad más activa en la generación de capacidades tecnológicas relacionadas con el desarrollo tecnológico o actividades de I+D en México, ya que dichas actividades se seguirán concentrando en el exterior, en su centro de I+D y otras plantas filiales donde se realizan actividades de ensamble.

IV. Siemens Innovaciones S.A. de C.V. Empresa de origen alemán con presencia en México desde hace más de 116 años en sus diferentes líneas de negocio, cuenta con un portafolio capaz de satisfacer las necesidades en términos de soluciones para la generación, transmisión y distribución de energía eléctrica. Para la industria eólica, son fabricantes de aerogeneradores de gran potencia, en México actualmente no participan en el mercado eólico, pero tienen planes de corto plazo para poder integrarse al mercado mediante el desarrollo de los próximos proyectos.

Se destaca que la Reforma Energética podrá contribuir para que la empresa alcance sus objetivos una mayor de participar en el sector eólico en México y dar mayor certidumbre para sus inversiones.

Respecto a las proyecciones de la empresa para el desarrollo de las capacidades específicas, se presentan en el Tabla 9.

Tabla 9. Perspectivas de Siemens en torno a las capacidades tecnológicas específicas

Capacidades	Descripción de perspectivas
Formación de Recursos Humanos (capacitación/ reclutamiento)	La empresa no tiene presencia en el sector eólico en México, pero se tienen proyecciones de participar en la venta de turbinas. Respecto a la formación de recursos humanos sus actividades se centran en las diferentes áreas de su portafolio de negocio, principalmente en el sector eléctrico, pero no para el sector eólico en México.
Licenciamiento de nueva tecnología y/o Ingeniería de reversa	Para el sector eólico no se realiza ingeniería de reversa ya que la empresa cuenta con tecnología propia.
Maquila de equipos en territorio nacional	En el tema eólico no se maquila ningún tipo de tecnología o componente en México, pero si en otras áreas de negocio principalmente del sector eléctrico. Y No existen planes en el corto plazo para realizar esta actividad en el sector eólico.
Mejora de procesos, componentes y equipos en territorio nacional	La mejora de equipos se realiza en la casa matriz y subsidiarias en el extranjero (Alemania, Dinamarca y USA). Y no se tienen planes de que esta situación cambie en los próximos años.
Desarrollo de nuevos componentes y equipos (en casa matriz y en México)	Sólo en la casa matriz, y No hay planes para que se realice en México en un futuro cercano.
Actividades de I+D en territorio nacional	Las actividades de I+D para el sector eólico se realizan en Dinamarca y Alemania. Y No existen planes para que se realicen en México.
Procesos de vinculación (Univ-Emp-Gob)	La empresa no tiene acuerdos de vinculación con otras organizaciones en México.
Otros	N/A

Fuente: Elaboración propia a partir de la información proporcionada por el Gerente de ventas comerciales de Siemens para América Latina (febrero de 2015).

Si bien la empresa actualmente no tiene presencia en el sector eólico, si tienen proyecciones de aprovechar oportunidades que ofrece el mercado mexicano, y de ésta manera seguir ampliando su presencia en América Latina en el área eólica. Sin embargo, hay que destacar que en el tema de construcción de capacidades tecnológicas locales, la empresa no aportara en ese sentido, por lo menos en el mediano plazo, ya que por su estrategia de negocio hacia el sector eólico en México es vender tecnología y seguir acumulando sus capacidades tecnológicas en su casa matriz (principalmente Dinamarca y Alemania).

V. Potencia Industrial. Empresa mexicana de gran tradición en diferentes áreas del sector eléctrico, que por más de 50 años, se ha especializado en el diseño y fabricación de motores eléctricos, generadores y sistemas de energía eléctrica de alta calidad. Para el sector eólico cuenta con turbinas de pequeña potencia (5KW) con diseño y de manufactura propia.

A pesar de que actualmente no participa en el sector eólico de gran potencia si ha generado importantes capacidades en el sector derivadas de sus actividades y líneas de negocio. Respecto a las proyecciones de sus capacidades tecnológicas para el sector eólico, se presenta a continuación:

Tabla 10. Perspectivas de Potencia Industrial en torno a las capacidades tecnológicas específicas

Capacidades	Descripción de perspectivas
Formación de Recursos Humanos (capacitación/ reclutamiento)	En sus diferentes líneas de negocio la empresa cuenta con importantes recursos humanos cien por ciento mexicanos y formados en territorio nacional. Y que espera seguir formando personal altamente calificado.
Licenciamiento de nueva tecnología y/o Ingeniería de reversa	Para el sector eólico y componentes eléctricos cuentan con desarrollos tecnológicos propios. Cuenta con la turbina Colibrí, la cual tiene: funcionamiento contra viento, eje horizontal, rotor de tres aspas, generador de transmisión directa. La empresa no descarta la posibilidad de desarrollar turbinas de mayor potencia en el futuro (principalmente de mediana potencia).
Maquila de equipos en territorio nacional	Además de la turbina Colibrí, desarrollan diversos equipos y componentes para el sector eléctrico, como motores y generadores (hidroeléctricos, imanes permanentes, etc.) que se desarrollan totalmente en México.
Mejora de procesos, componentes y equipos en territorio nacional	Siempre se busca seguir innovando en sus diferentes productos, desarrollos que se hacen en México. Además de que se tiene la proyección de seguir avanzando en nuevas líneas de negocio como es el caso de la energía eólica de mediana y gran potencia, ello con el desarrollo de nuevos componentes y la prestación de nuevos servicios.
Desarrollo de nuevos componentes y equipos (en casa matriz y en México)	

Capacidades	Descripción de perspectivas
Actividades de I+D en territorio nacional	Las actividades de I+D para mejora continua de sus productos e incursionar en nuevos mercados se realiza de manera constante y se espera poder seguir con esta actividad y explorar nuevas ventanas de oportunidad que el sector en México ofrece.
Procesos de vinculación (Univ-Emp-Gob)	Principalmente con entidades de Gobierno como CONACYT, y centros de educación superior para seguir impulsando sus desarrollos de I+D (la empresa es miembro del CEMIE-Eólico).
Otros	N/A

Fuente: Elaboración propia a partir de la información proporcionada por el Gerente de Ventas, (febrero de 2015).

Se espera que, en los próximos años, la empresa logre incursionar en el mercado y seguir potencializando las capacidades tecnológicas que han logrado desarrollar en el sector eléctrico en particular en el sector eólico a lo largo de su historia, destacando sobre todo que el 100% de sus capacidades tecnológicas han sido desarrolladas localmente.

VI. Eléctrica del Valle de México (subsidiaria de EDF). Empresa subsidiaria de Électricité de France (EDF) dedicada a la generación y distribución eléctrica, desarrollaron y operaron el parque eólico “La Mata-La Ventosa”, el parque “Bii Stinú” y parque eólico “Santo Domingo”. La empresa se encuentra en proceso de licitación de otros parques eólicos en México, con lo cual busca seguir teniendo mayor presencia dentro del mercado eólico mexicano. Las perspectivas de la empresa en torno a las capacidades tecnológicas se presentan a continuación:

Tabla 11. Perspectivas de EVM-EDF México en torno a las capacidades tecnológicas específicas

Capacidades	Descripción de perspectivas
Formación de Recursos Humanos (capacitación/ reclutamiento)	Por las actividades de la empresa en México la formación de recursos humanos se ha centrado en capacitar personal para la operación y mantenimiento de los proyectos. Una parte de la capacitación de su personal operativo se realiza en USA y la mayor parte en sitio (parques eólicos en México). Con el desarrollo de nuevos proyectos se espera seguir capacitando más capital humano en la operación y manteniendo de los parques.
Licenciamiento de nueva tecnología y/o Ingeniería de reversa	No son desarrolladores tecnológicos, ya que su principal línea de negocio para el sector eólico en México, es el diseño, desarrollo y operación & mantenimiento de los proyectos.
Maquila de equipos en territorio nacional	
Mejora de procesos, componentes y equipos en territorio nacional	Se realizan mejoras en los procesos para la operación y mantenimiento, además de retribuir información para la mejora de tecnologías a los desarrolladores tecnológicos. Destacan que México seguirá siendo importante en la generación de información para las mejoras tecnológicas (de sus clientes).
Desarrollo de nuevos componentes y equipos (en casa matriz y en México)	No son desarrolladores tecnológicos, sin embargo, la operación de los proyectos en México ha permitido innovar en los procesos derivados de la operación y el mantenimiento. En México se espera seguir teniendo mayor actividad.

Capacidades	Descripción de perspectivas
Actividades de I+D en territorio nacional	Las actividades de I+D para mejora de procesos se realiza en la matriz de Francia y USA.
Procesos de vinculación (Univ-Emp-Gob)	La empresa tiene algunos acuerdos de colaboración informal con otras organizaciones, principalmente operadores. Sin embargo, consideran como necesario una mayor vinculación para hacer procesos operativos cada vez más eficientes.
Otros	N/A

Fuente: Elaboración propia a partir de la información proporcionada por el Gerente Comercial, (febrero de 2015).

En el corto y mediano plazo la empresa espera desarrollar y operar otros proyectos eólicos, algunos ya licitados y otros en proceso de licitación y aunque no se involucran con el desarrollo tecnológico, la empresa busca innovar constantemente en sus procesos y en la generación de información que le sea útil a sus clientes y a los desarrolladores tecnológicos. Así como seguir capacitando personal de la región donde se ubican los proyectos.

VII. Trinity Industries de México, S. de R.L. de C.V. Empresa de origen estadounidense, que para el sector eólico en México ha ofrecido una extensa gama de fabricación de torres estructurales, adecuadas a las necesidades de la industria eólica, además de componentes varios como internos de la torre y servicios de transporte y logística.

Según la información referida en la entrevista la empresa ha proveído el 90% de las torres eólicas instaladas en los parques eólicos que operan en México al 2014. A continuación, se presenta el análisis sobre las perspectivas de las capacidades tecnológicas de la empresa.

Tabla 12. Perspectivas de Trinity Industries en torno a las capacidades tecnológicas específicas

Capacidades	Descripción de perspectivas
Formación de Recursos Humanos (capacitación/reclutamiento)	La principal capacitación del personal se desarrolla en la planta de manufactura de Huehuetoca, Estado de México. Los recursos humanos en las diferentes áreas son principalmente mexicanos, y con los planes de crecimiento del sector se espera incorporar más personal y con mayor calificación.
Licenciamiento de nueva tecnología y/o Ingeniería de reversa	Los componentes son desarrollados a partir de las especificaciones de los clientes (Turbinas).
Maquila de equipos en territorio nacional	La maquila (ensamble) se realiza en la planta de Huehuetoca, así como el desarrollo de los otros componentes menores de la torre.
Mejora de procesos, componentes y equipos en territorio nacional	Las mejoras a los componentes se realizan totalmente en territorio nacional, mejoras basadas en los requerimientos de los clientes. La empresa espera un mayor impulso al ensamblado en territorio nacional en los próximos años de otros componentes.
Desarrollo de nuevos componentes y equipos (en casa matriz y en México)	Los nuevos componentes y las mejoras de los mismos se realizan en la planta de Huehuetoca.
Actividades de I+D en territorio nacional	No hay actividades de I+D, por sus actividades sólo realizan algunas mejoras tecnológicas menores (bajo requerimientos de los clientes).
Procesos de vinculación (Univ-Emp-Gob)	La empresa NO tiene acuerdos de vinculación con otras organizaciones en México.
Otros	N/A

Fuente: Elaboración propia a partir de la información proporcionada por la Gerente de mercadotecnia (febrero de 2015).

En el corto y mediano plazo la empresa busca tener una mayor presencia y seguir siendo líder en el mercado ya que cuenta con la mayor experiencia en la manufactura de torres eólicas en México. Su experiencia le ha permitido ir acumulando capacidades centrales derivadas de sus diferentes actividades y buscan seguir participando en los próximos proyectos.

VIII. Cisa Energía. Empresa de origen mexicano que provee servicios de promoción, diseño, construcción, operación y mantenimiento para proyectos de energía eólica en todo México. Con una década de experiencia en el mercado nacional ofrece un conocimiento profundo y una gran experiencia para el sector eólico en México. Las principales actividades para el sector eólico se centran en: la pre-planeación; aseguramiento de la tierra; permisos y trámites; anteproyectos; adecuación de caminos y cimentaciones; erección de aerogeneradores; líneas de transmisión; operación; mantenimiento, etc.

Los principales proyectos eólicos a los que han prestado sus servicios en México son: Bii Nee Stipa I (31 turbinas Gamesa y desarrollador Iberdrola Renewables), Bii Nee Stipa II (turbinas Gamesa y desarrollador Gamesa/Enel GreenPower), Bii Nee Stipa III (turbinas Gamesa y desarrollador Gamesa/Enel “Grupo México”), Bii Nee Stipa IV (turbinas Gamesa y desarrollador Iberdrola Renewables) y Sierra Juárez, Baja California (47 turbinas Vestas y desarrollador Lenova), además se encuentran desarrollando 2 proyectos, el XISA I y XISA II. Respecto al análisis de las perspectivas sobre las capacidades tecnológicas específicas de la empresa, se presenta en el siguiente Tabla.

**Tabla 13. Perspectivas de Cisa Energía en torno
a las capacidades tecnológicas específicas**

Capacidades	Descripción de perspectivas
Formación de Recursos Humanos (capacitación/reclutamiento)	Dentro de sus diferentes actividades y portafolios de negocio cuentan con capital humano altamente capacitado, principalmente especialistas mexicanos. Con las proyecciones de crecimiento del sector se espera seguir formando capital humano altamente capacitado para la prestación de los diferentes servicios.
Licenciamiento de nueva tecnología y/o Ingeniería de reversa	Sus actividades es la presentación de servicios, por lo que buscan de manera constante innovar en sus servicios.
Maquila de equipos en territorio nacional	
Mejora de procesos, componentes y equipos en territorio nacional	Mejora continua en los procesos para satisfacer los requerimientos de los clientes (principalmente a partir de los requerimientos de las nuevas tecnologías).
Desarrollo de nuevos componentes y equipos (en casa matriz y en México)	N/A
Actividades de I+D en territorio nacional	
Procesos de vinculación (Univ-Emp-Gob)	La vinculación se da principalmente con socios comerciales, clientes y la AMDEE para mejorar procesos y servicios.
Otros	N/A

Fuente: Elaboración propia a partir de la información proporcionada por la Control de obra (febrero de 2015).

Con las proyecciones de crecimiento del sector, la empresa espera que en el corto y mediano plazo se tenga una participación más activa y una mayor cuota de mercado en comparación con las desarrolladoras del extranjero.

Ahora hay que puntualizar que, con la revisión realizada sobre el tema de perspectivas de las capacidades tecnológicas de las empresas, se intenta resaltar que las diferentes actividades que las empresas realizan para desarrollar mayores competencias que deriven en ventajas competitivas resultan centrales para fortalecer su presencia en este nuevo sector.

Recordando que las capacidades tecnológicas desde el enfoque de Bell y Pavitt (1995) son los recursos necesarios para generar y administrar mejoras en los procesos y en la organización de la producción, productos, equipos y proyectos de ingeniería, los cuales están acumulados e integrados en los individuos (habilidades, conocimientos y experiencias), y en los sistemas organizacionales.

Hay que recordar que la construcción de capacidades tecnológicas, no es un proceso sencillo ni uniforme ya que tiene que ver con “las diferentes actividades que conforman el aprendizaje, algunos se relacionan con las fortalezas internas de la empresa (conocimiento, I+D, etc.). Otras se desprenden de las relaciones que la empresa establece con instituciones existente en el entorno: con empresas nacionales y extranjeras, con clientes y proveedores, con centros de investigación o con universidades. La articulación entre las fortalezas internas y las relaciones externas constituyen la pauta para el desarrollo de estrategias tecnológicas ofensivas que puedan traducirse en factores de innovación y competitividad” (Villavicencio y Díaz, 2007). En la medida en que se aglutinen dichos esfuerzos se potenciará la construcción de mayores capacidades tecnológicas locales que deriven en la conformación de una industria eólica doméstica.

A pesar de la visión positiva existente por parte del Estado y demás organizaciones (empresas, universidades y centros de I+D) para la

construcción de capacidades tecnológicas, el verdadero reto es hacerlas realidad y que se vean materializadas en mayores beneficios tanto económicos como ambientales y sobre todo sociales. Finalmente debemos destacar que las alianzas tecnológicas son una alternativa viable que requiere necesariamente de la voluntad de los diferentes agentes integrantes del sector y que podrían derivar en la generación de más y mejores capacidades locales.

CONCLUSIONES

La perspectiva de crecimiento de la energía eólica en México y en todo el Mundo se presenta como una ventana de oportunidad para generar beneficios en diferentes ámbitos, tanto ambientales como económicos y sociales, pero a su vez representa un reto al sector industrial para poder satisfacer los requerimientos derivados del crecimiento de la explotación de esta fuente de energía.

Para el caso de México, el reto inmediato y de mediano plazo es lograr consolidar una industria local que tenga mayor presencia en los diferentes eslabones de la cadena de valor del sector y de esta manera diversificar los beneficios generados por el desarrollo de los proyectos eólicos al interior del país.

Aprovechar las ventanas de oportunidad y hacer frente a los retos del sector requiere necesariamente de la construcción de mayores y mejores capacidades tecnológicas, principalmente en aquellas áreas prioritarias asociadas a un mayor valor agregado, con el objetivo de ir disminuyendo la dependencia que existe hacia las grandes empresas transnacionales.

En este sentido, un aspecto importante es el tema de los costos de transacción, ya que éstos pueden ser una barrera importante para el adecuado aprovechamiento del potencial eólico existente en nuestro país, así como para la construcción de capacidades tecnológicas por parte de las organizaciones locales, ya que la difusión del cono-

cimiento tecnológico entre los diferentes agentes implica elevados costos de transacción. Por tal razón, el tema de cooperación entre las organizaciones toma un papel relevante, como estrategia para reducir los diferentes costos de transacción e impulsar la construcción de mayores capacidades tecnológicas que detonen en la conformación de una cadena de valor local sólida.

El tema de la cooperación entre las diferentes organizaciones, tanto del sector productivo, como del sector de educativo y de I+D, resulta central, pero hay que destacar que la cooperación y/o la creación de acuerdos comerciales y de desarrollo tecnológico entre las diferentes organizaciones no es una actividad espontánea, ya que se encuentra determinada por diversos aspectos y de diferente índole, como son los sociales y económicos.

En México un acuerdo de colaboración tecnológica entre diferentes organizaciones del sector educativo, científico y productivo que podría ser muy importante para la construcción de capacidades tecnológicas en el sector, y que pudiera ser parte importante para las diferentes organizaciones que buscan incursionar o consolidarse el sector eólico es el CEMIE-Eólico, consorcio que entre otras cosas busca crear las sinergias necesarias para el aprovechamiento de ésta fuente de energía mediante el desarrollo de proyectos tecnológicos estratégicos que propicien resultados de mayor valor para el sector.

El CEMIE-Eólico, es una iniciativa impulsada desde el Estado, pero en donde los actores centrales son las universidades y los centros públicos de I+D, para desarrollar y acumular capacidades tecnológicas en el área mediante el desarrollo de diferentes proyectos tecnológicos y de formación de recursos humanos altamente capacitados a partir de los requerimientos del sector. Para lo cual, con los acuerdos de colaboración tecnológica se busca incidir favorablemente en la consolidación de las capacidades tecnológicas y científicas con las que actualmente cuentan, pero sobre todo desarrollar y acumular más capacidades tecnológicas en aquellas áreas prioritarias de la cadena de valor.

De esta manera es que los acuerdos de colaboración pueden impulsar una mayor internalización de los diferentes costos de transacción a los que se enfrentan las organizaciones en el desarrollo de sus actividades para el sector eólico, y a la vez incentivar una mayor construcción de capacidades tecnológicas locales y, por lo tanto, el fortalecimiento y socialización de éstas.

Así mismo, desde la visión del Estado la capacidad tecnológica para el sector eólico se busca que sea impulsada a través del nuevo marco normativo e institucional, mediante mayores inversiones en el sector para incrementar la capacidad instalada, así como la creación de fondos y fideicomisos por parte del Estado para seguir apoyando la investigación científica y tecnológica en la materia de energías renovables e incentivar proyectos de generación distribuida.

En los diferentes planes y programas relacionados al sector eléctrico el Estado plantea que impulsará cadenas locales de valor que incentiven la creación de empleos y una mayor actividad económica de la industria. Aquí lo importante es lograr aterrizar los diferentes planes y programas para que deriven en la acumulación de capacidades tecnológicas prioritarias que hagan realidad la creación de las cadenas locales de valor.

Desde la visión de la empresa hay que destacar, que estas organizaciones ven con buenos ojos la actual Reforma Energética, como incentivo para que el sector privado tenga una mayor participación. Sin embargo, hay que destacar que la gran mayoría de las empresas entrevistadas (particularmente las extranjeras) refieren que no ven posible que en el mediano plazo las capacidades tecnológicas que ellas acumulan en el exterior se difunda en México, en particular aquellas capacidades tecnológicas relacionadas con las actividades de I+D y de alta tecnología. Esto, sin tratar de demeritar la importancia que las otras capacidades tecnológicas, tales como la formación de recursos humanos (para la operación y mantenimiento de los parques).

Finalmente es necesario subrayar la necesidad de impulsar una mayor derrama de capacidades al interior del país para lograr consolidar una industria local, en donde las empresas extranjeras y líderes tecnológicas en el sector podrían jugar un papel central.

Aunque es importante destacar un caso paradigmático, el de General Electric, empresa que ha hecho evidente su interés de generar capacidades tecnológicas locales y no ser sólo una empresa proveedora de equipos eólicos, lo anterior, a través del GEIQ, centro de I+D con el cual la empresa busca formar y consolidar capacidades locales en el sector formando talento mexicano (ingenieros mexicanos) y potencializar sus actividades de I+D para el sector eólico en México en el mediano plazo.

BIBLIOGRAFÍA

- Alvarado R. (2015). *Capacidades Tecnológicas del Sector Eólico en México: Análisis y Perspectivas*, Tesis presentada para obtener el grado de Doctor en Economía por la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Economía. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Alvarado R. (2013). Cooperación empresarial y ecología industrial: el reciclado de PET. En: Carrillo, G. (coordinadora), *La ecología industrial en México*, Ciencias Sociales y Humanidades. México: Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco.
- Bell M., Pavitt K. (1995). The Development of Technological Capabilities". In: I. U. Haque (ed). *Trade Technology and International Competitiveness* (pp 69-101), Washington: The World Bank.
- Coase R. (1937). La naturaleza de la empresa. En: Williamson, O. y S. Winter (1996). *La naturaleza de la empresa: Orígenes, evolución y desarrollo*. México: FCE.
- Contreras O., Carrillo J., Olea J. (2012). Desprendimientos de las multinacionales, ¿Una vía para el aprendizaje y la innovación en empresas locales?. En: Carrillo J., A. Hualde y D. Villavicencio (coordinadores), *Dilemas de la innovación en México: dinámicas sectoriales territoriales e institucionales*. México; Colegio de la Frontera Norte.
- Demsetz H. (1996). Una revisión de la teoría de la empresa. En: Williamson, O. y S. Winter (comp.). *La naturaleza de la empresa: orígenes evolución y desarrollo* (pp. 220-247). México: FCE.
- DOF (Diario Oficial de la Federación) (2012). *Ley General de Cambio Climático*. México: Gobierno de la República.
- DOF (Diario Oficial de la Federación) (2008). *Ley para el Aprovechamiento de las Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética*. México: Gobierno de la República. Última reforma: 12-01-2013.

- Kim L. (1997). *From imitation to Innovation. The Dynamics of Korea's Technological learning*. Boston: Harvard Business School Press.
- CEMIE (2014). *Plan Estratégico del CEMIE Eólico*. México: CMEIE-E-CAR.
- PEFRHME (2014). *Programa Estratégico de Formación de Recursos Humanos en Materia Energética*. México: Secretaría de Energía, CONACYT.
- CFE (2012). *Programa de Obras e Inversiones del Sector Eléctrico, 2012-2026 (POISE)*. México: CFE.
- Gobierno de la República (2013). *Reforma Energética. Reforma Constitucional en Materia de Energía*. México: Gobierno de la República.
- SENER, Secretaria de Energía (2014). *Prospectiva de Energías Renovables 2014-2028*, México: SENER.
- SENER, Secretaria de Energía (2014b). *Prospectiva del Sector Eléctrico 2014-2028*, México: SENER.
- Villavicencio D. y F. Díaz (2007). Innovación y alianzas tecnológicas: ventajas y riesgos para la empresa química mexicana. En: Casas, R., C. de Fuentes y A. Veracruz (2007). *Acumulación de capacidades tecnológicas, aprendizaje y cooperación en la esfera global y local*. México: UAM, ADIAT y Miguel Ángel Porrúa.

CAPÍTULO 6

Combustión catalítica: una alternativa en la mitigación de gases de efecto invernadero, una perspectiva desde México

Ana Lilia De Jesús Lázaro³⁸

Jorge Morales Hernández^{*1}

INTRODUCCIÓN

El cambio climático, calentamiento global, generación de gases de efecto invernadero, disponibilidad de combustibles fósiles y, finalmente la vulnerabilidad de la población ante el cambio climático; todas las definiciones anteriores con un común denominador, “las actividades antropogénicas”.³⁹ Una de las actividades antropogénicas que más contribuye a la generación de GEI, es la combustión de combustibles fósiles.

Desde la revolución industrial y la creación de los motores de combustión interna y de la industrialización de prácticamente todos los procesos, no se tenía ninguna preocupación por el cuidado del medio ambiente y fue hasta la década de los 90's cuando se acepta que, a nivel mundial, se tiene un problema sobre el cambio climático derivado de las actividades antropogénicas que es necesario de atender ahora.

Uno de los principales inconvenientes del uso de la combustión es que no se lleva a cabo de manera eficiente, generando gases de combustión como CO, CO₂, NO_x, SO_x, entre otros, dependiendo de

38, *1 Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica S.C. (CIDETEQU); Parque Tecnológico Querétaro s/n Sanfandila, Pedro Escobedo, Querétaro, C.P. 76703

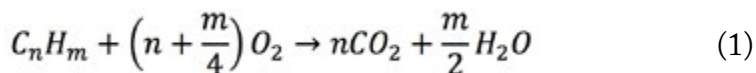
39 Se refiere a las actividades, procesos o materiales que son el resultado de actividades humanas, a diferencia de los que tienen causas naturales sin influencia humana.

la relación combustible-comburente, así como de los combustibles y contaminantes del comburente que se quemen, siendo la combustión catalítica una alternativa para la mitigación de los GEI producto de la combustión.

Combustión de combustibles fósiles

La combustión en términos generales es una reacción química de oxidación fuertemente exotérmica. Esta reacción implica la presencia de un combustible (elemento que se oxida), un comburente (elemento oxidante) y calor.

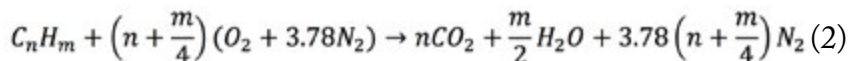
Durante la oxidación completa de hidrocarburos se forma bióxido de carbono (CO_2) y vapor de agua (H_2O), la reacción de oxidación de los hidrocarburos puede describirse de la siguiente manera (ecuación 1):



Sin embargo, durante la combustión se hacen presentes otras especies que hacen más complejo el proceso de combustión, más allá de una simple oxidación que dé como productos CO_2 y agua. El uso de aire como comburente hace que la participación del nitrógeno sea importante, dando origen a la formación de óxidos de nitrógeno; entre otros contaminantes contenidos en los combustibles, los cuales son transformados durante la combustión. Finalmente, siempre que la combustión no es completa, se generan productos llamados inquemados o parcialmente quemados.

La composición del aire está compuesta por nitrógeno (79.1%) y oxígeno (20.9%). Así que, durante la combustión, por cada mol requerido de oxígeno se consumirán 3.78 moles de nitrógeno. Así pues,

en términos generales la reacción de combustión de un hidrocarburo es (ecuación 2):



De tal manera que, por cada mol de combustible quemado, $3.78(n+m/4)$ moles de aire son requeridos y $3.78(n+m/4) + (m/4)$ moles de productos de combustión son generados.

Las ecuaciones 3 a 5 muestran las fracciones molares de los productos de combustión generados por cada mol de combustible quemado: La fracción molar de los productos de combustión por cada mol de combustible quemado:

$$Y_{CO_2} = \frac{n}{4.78\left(n + \frac{m}{4}\right) + m/4} \quad (3)$$

$$y_{H_2O} = \frac{m/2}{4.78\left(n + \frac{m}{4}\right) + m/4} \quad (4)$$

$$y_{N_2} = \frac{3.78\left(n + \frac{m}{4}\right)}{4.78\left(n + \frac{m}{4}\right) + m/4} \quad (5)$$

Además de estos componentes existen otros como el azufre que es oxidado a óxido de azufre (SO_2) incluso existen algunos compuestos de azufre de altos estados de oxidación que son reducidos a SO_2 . De igual manera que los productos inquemados se generan cenizas y contaminantes particulados resultado de la oxidación parcial de combustibles inorgánicos (minerales).

Pocos sistemas son operados en condiciones estequiométricas debido a la dificultad de lograr una íntima mezcla entre el aire y el combustible que se requiere para generar una conversión perfecta. La relación aire/combustible es utilizada para definir las condiciones de operación durante la combustión, esta relación suele definirse mediante una relación estequiométrica referenciada por la comparación entre diferentes combustibles. La relación equivalente entre el combustible/aire en una combustión rica en combustible, ϕ , es definida por una relación normalizada de la siguiente forma:

$$\phi = \frac{m_f/m_a}{(m_f/m_a)_a} \quad (6)$$

Donde:

" m_f " es la masa del combustible

" m_a " es la masa del aire

" s " se refiere a que se encuentran en solución

De igual manera, la relación estequiométrica, λ , aire/combustible, normalizada con respecto a la relación estequiométrica es,

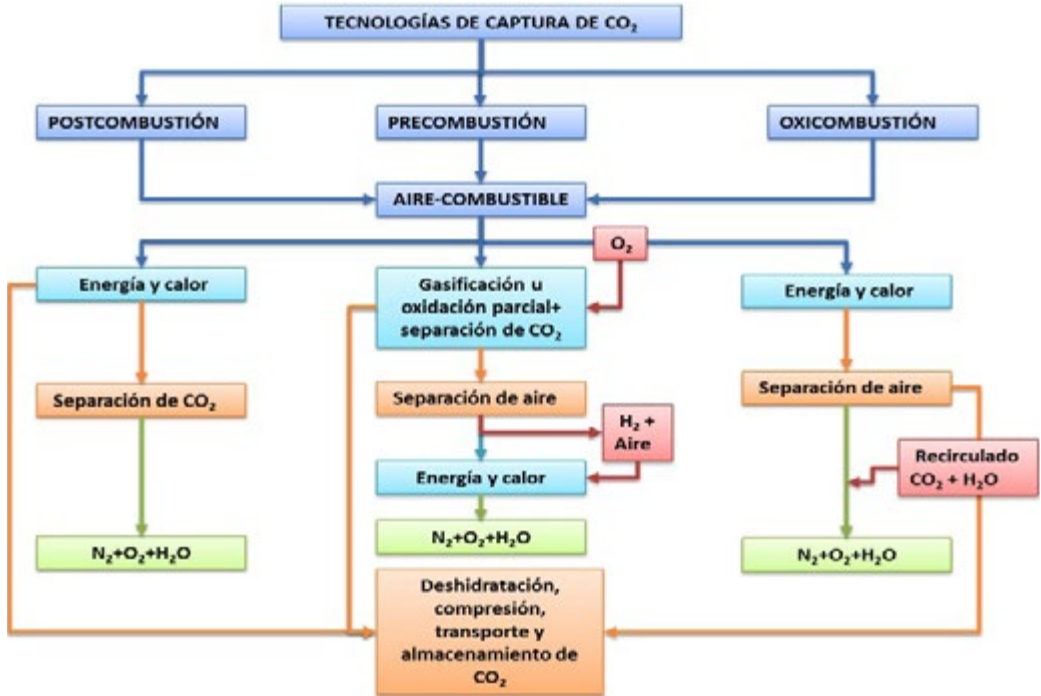
$$\lambda = \frac{m_a/m_f}{(m_a/m_f)_s} = \frac{1}{\phi} \quad (7)$$

La combustión puede ser completa bajo condiciones de combustible bajas (exceso de aire, $\Phi < 1$), con algún remanente de oxígeno sin reaccionar, pero con el inconveniente de adicionar un exceso de nitrógeno por lo que resulta importante establecer una nueva relación combustible/nitrógeno. La composición de los productos de combustión de bajo-combustible, puede ser determinado mediante el balance atómico individual establecido por la reacción (2).

El problema con la especificidad de los productos de combustión es más complicado para la combustión rica en combustible, $\Phi > 1$ con respecto a la combustión baja en combustible. Bajo condiciones ricas en combustible el oxígeno no es suficiente, por lo que durante la oxidación son generados los siguientes productos: CO, CO₂, H₂, H₂O, N₂; pero la estabilidad y el balance de estos productos de combustión es complicadas, siendo requeridas las condiciones cinéticas y termodinámicas para determinar la composición exacta.

Tecnologías para el tratamiento de emisiones a la atmósfera

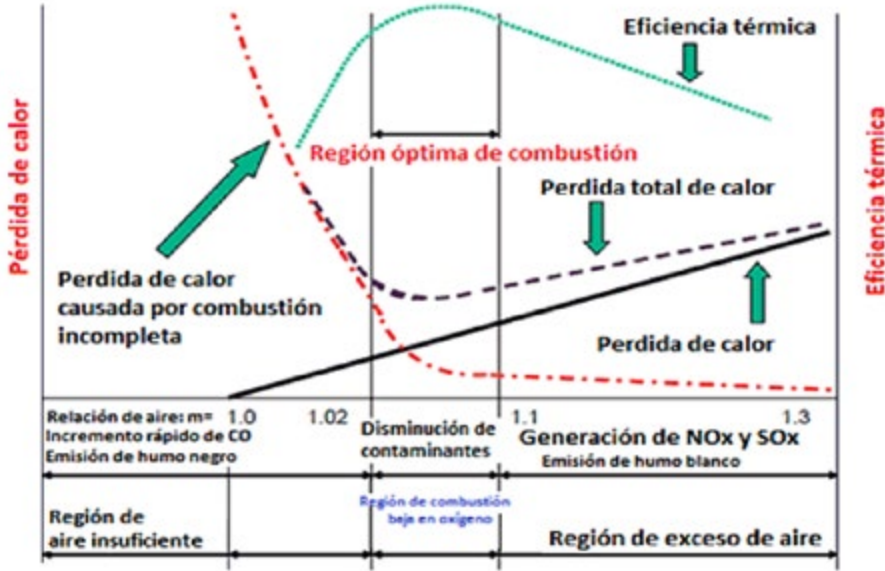
A nivel mundial se han desarrollado diferentes tecnologías para el tratamiento de emisión de gases contaminantes a la atmósfera producto de la combustión parcial de combustibles fósiles, entre ellas se contemplan dos tipos, las tecnologías de pre combustión y postcombustión las cuales se ilustran en la Figura 1.

Figura 1. Tecnologías de captura de CO₂

Fuente: González Santaló, 2009.

Las tecnologías de pre combustión son aquellas en las que se involucra eficientar la relación aire/combustible; en la Figura 2 se muestra la estrecha relación que existe entre el combustible y comburente para el caso del gas natural donde esta relación debe ser específica para hacer más eficiente la combustión en un rango estrecho de entre 1.02 y 1.1.

Figura 2. Relación de aire-combustible en la combustión de gas natural



Fuente: www.yokogawa.org

Otras tecnologías de pre combustión contemplan el uso de O_2 puro como oxidante durante la combustión. Esta tecnología se llama oxicomustión, siendo la principal desventaja la pureza y cantidad de oxígeno que se utiliza durante todo el proceso. Esta tecnología no contempla la eliminación de otros gases de la combustión; como los SO_x , CO y otras trazas que pueden reaccionar durante la oxidación.

Existen otras tecnologías de pre combustión como, el lavador de gases, una tecnología donde se utilizan aminas para adsorber el CO_2 . Esta tecnología involucra una fuerte inversión inicial debido a que en un principio se debe construir una torre de absorción.

La postcombustión se lleva a cabo en dos etapas independientes; la primera consiste en la separación del CO_2 para tener un gas esen-

cialmente puro que se pueda comprimir y confinar, esto es lo que se conoce como captura. La segunda etapa es la compresión del gas hasta condiciones supercríticas (la presión crítica del CO_2 es de 73 atmósferas (Perry, 2004) para el confinamiento geológico. Ésta es la etapa del secuestro o confinamiento.

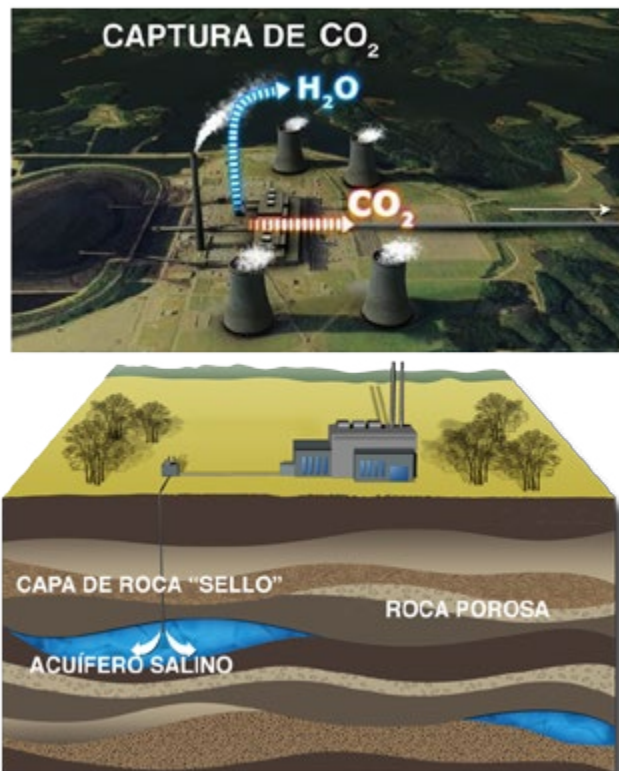
Tecnologías de confinamiento geológico

Existen 6 tecnologías para el confinamiento geológico, de las cuales solamente tres se encuentran en una etapa avanzada de desarrollo. Estas tecnologías contemplan la absorción de CO_2 en procesos de reforestación, fijando el carbono en las nuevas plantas y la inyección de CO_2 a profundidades del orden de 3 mil metros en el fondo del mar. Esta última tecnología aún no es muy aceptada por la incertidumbre de lo que pueda ocurrir en el fondo del mar con la presencia de CO_2 .

Confinamiento en yacimientos de hidrocarburos

Este confinamiento puede ser con o sin recuperación de CO_2 . Estos yacimientos se consideran ideales debido a que contuvieron petróleo y gas a altas presiones durante millones de años (Figura 3). Por lo tanto, se tiene la certeza de que no se tendrán fugas a la atmósfera, sin embargo, es importante verificar que durante la explotación de los yacimientos éstos no se hayan alterado y que las estructuras geológicas mantengan su estanqueidad.

Figura 3. Confinamiento geológico de CO_2



Fuente: González, 2009.

Confinamiento en acuíferos salinos

Los acuíferos que se encuentran a más de mil metros de profundidad y saturan medios porosos, tienen contenidos de sales demasiado elevados para el consumo humano, estas formaciones son ideales debido a su gran tamaño. El CO_2 va quedando atrapado en los poros del medio y aunque desplaza al agua, su impacto es mínimo.

Confinamiento en yacimientos de carbón

Esta es la tecnología menos probada, en ella el CO_2 es inyectado en los yacimientos de carbón que están demasiado profundos para ser explotados. Estos yacimientos normalmente están saturados con metano. Al ser el CO_2 más afín al carbón que con el metano, este gas es desplazado y el CO_2 es adsorbido en el carbón. Así este proceso tiene la ventaja de una recuperación de gas natural al inyectar el CO_2 , sin embargo, ésta es la tecnología ha sido poco utilizada.

Generalidades de la combustión catalítica

La combustión catalítica puede ser definida como la oxidación completa de un compuesto combustible sobre una superficie catalítica. Mientras que la combustión convencional ocurre en la presencia de una flama, la combustión catalítica es un proceso sin flama, se lleva a cabo a bajas temperaturas, lo que da como resultado una baja emisión de óxidos de nitrógeno. La combustión catalítica ofrece menos restricciones en los límites de flamabilidad que la combustión convencional. Estas ventajas de la combustión catalítica son determinantes para sus aplicaciones potenciales.

Una de estas aplicaciones potenciales es la baja emisión de compuestos nitrogenados, de igual manera tiene un potencial importante en la generación de energía en las turbinas de gas. Las turbinas que hoy en día operan a escala de laboratorio han mostrado reducir la emisión de NO_x hasta 3 ppm. Esta tecnología requiere un enfoque integrado basado en el diseño avanzado de un combustor y el desarrollo de catalizadores de alta actividad química y estabilidad térmica.

El diseño de la combustión catalítica es típicamente asociado con la presencia de sistemas monolíticos, a base de corderita (óxidos complejos de Al, Fe, Mg y Si) y con un recubrimiento delgado el cual ofrece una buena distribución debido a su gran área superficial, pero con una baja resistencia a la presión.

En cuanto a los catalizadores lo más investigados dadas sus propiedades en la oxidación de metano, son los metales nobles como platino, paladio y algunos óxidos.

Las aplicaciones de la combustión catalítica son variadas, destacando la eliminación de COV (compuestos orgánicos volátiles) presentes en el aire en bajas concentraciones utilizando filtros de platino. Los convertidores catalíticos automotrices utilizan la tecnología de la combustión catalítica por medio de un convertidor de tres vías donde es posible oxidar el CO a CO₂, oxidar los hidrocarburos inquemados y reducir la presencia de los NO_x a N₂. Además También, se utiliza en la ignición catalítica para la generación de energía, en la tecnología de celdas de combustible, síntesis química, micro quemadores y microreactores.

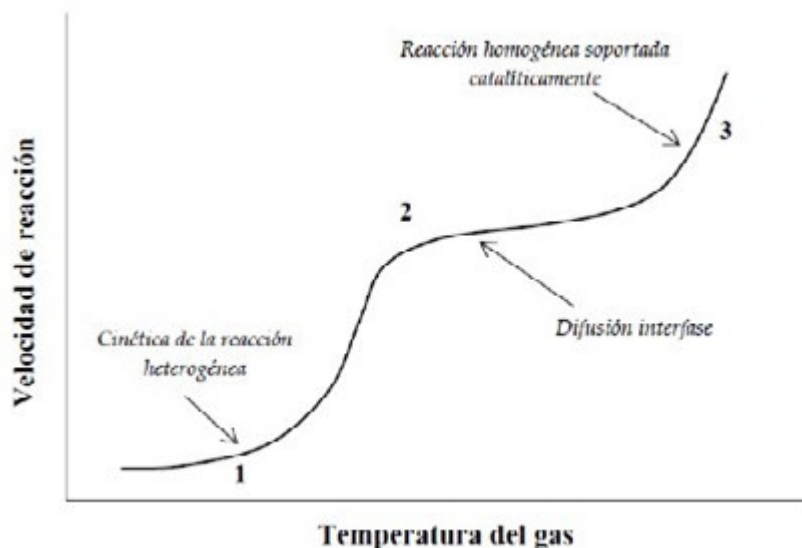
El uso de un catalizador se enfoca en controlar la ignición o para la estabilización de la combustión homogénea en estado gaseoso mediante la interacción química y térmica, con la reacción exotérmica heterogénea. Esta capacidad catalítica establecida durante la combustión es la que controla la expansión en los límites de flamabilidad y la reducción de emisión de contaminantes.

Cinética de reacción

El principal desafío para la combustión catalítica es la descripción de las cinéticas de reacción; esto debido a dos inconvenientes, uno de ellos es que la velocidad de reacción se lleva a cabo en solo 1 ms con un incremento exponencial de la temperatura como se puede observar en el gráfico de la figura 4. En este gráfico se observan tres etapas, la primera sección describe el proceso de combustión heterogénea, en la que la temperatura ejerce un efecto significativo en la cinética de reacción, durante este proceso el catalizador convierte el metano en productos de combustión. En una segunda etapa se alcanza un valor más o menos estable, debido principalmente a las limitaciones difusivas del metano. Finalmente, en la zona 3 se establece la combustión

homogénea. En esta zona se alcanza la máxima temperatura y velocidad de reacción de combustión (Groppi *et al.*, 2003).

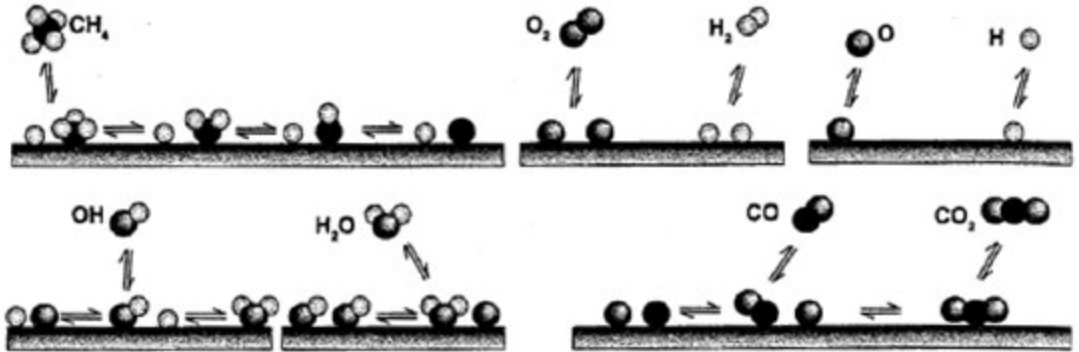
Figura 4. Cinética de reacción de combustión de un combustible



Fuente: John Lee, 2001.

El uso del catalizador proporciona una ruta de reacción alternativa entre los reactivos y los productos mediante la reducción de la energía de activación en la reacción de combustión. Después de la difusión de la fase de gaseosa sobre los catalizadores, los reactivos se adsorben en la superficie, lo que implica reacciones de disociación y descomposición. Las tasas de reacciones superficiales y desorción dependen de la superficie y la temperatura durante la oxidación. Además del mecanismo de reacción de Langmuir-Hinshelwood, mostrado en la Figura 5; existe otra ruta de oxidación en la combustión catalítica de metano sobre platino en fase gaseosa, tales como las que se llevan a cabo en la superficie de reacción del catalizador.

Figura 5. Esquema de la reacción de la combustión catalítica de metano sobre metales nobles



Fuente: Kohse-Höinghaus, 2002.

De esta manera, las reacciones heterogéneas de la combustión catalítica pueden ser aproximadas a las reacciones heterogéneas en fase gaseosa, lo que significa que los adsorbatos son distribuidos de manera aleatoria sobre la superficie. El estado de la superficie catalítica se describe por la temperatura T y un conjunto de Θ_i , ambos dependen de la posición macroscópica dentro del reactor, pero también de las fluctuaciones microscópicas locales. Las ecuaciones de equilibrio se establecen para acoplar los procesos de la superficie con el flujo reactivo circundante. Las tasas de producción de especies en estado gaseoso (debido a la adsorción y desorción) en la superficie se describen como:

$$S_i = \sum_{k=1}^{K_s} \nu_{ik} k_{fk} \prod_{l=1}^{N_g + N_s} (c_l)^{\nu_{lk}} \quad (8)$$

Dónde, K_s es el número total de reacciones en la superficie incluyendo las reacciones de adsorción y desorción; v_{ik} y v'_{ik} son los coeficientes estequiométricos, K_{fk} el coeficiente cinético de reacción, N_g (N_s) el número de especies gaseosas en la superficie, c_i la concentración de las especies i , las cuales son expresadas en mol/cm² de especies adsorbidas. Al inicio de la adsorción sobre la superficie, la reacción varía con respecto al número de las especies adsorbidas. La expresión entonces es más compleja y se describe como:

$$K_{fk} = A_k T^{\beta_k} \exp \left[\frac{-E_{ak}}{RT} \right] \prod_{i=1}^{N_s} \Theta_i^{\mu_{ik}} \exp \left[\frac{\varepsilon_{ik} \Theta_i}{RT} \right] \quad (9)$$

Donde A_k es el factor pre exponencial, β_k es el exponente de la temperatura de la superficie, E_{ak} es a energía de activación de la reacción k . Los parámetros μ_{ik} y ε_{ik} son los parámetros que describen la dependencia del coeficiente de las velocidades de reacción sobre la superficie de reacción de las especies i . Para las reacciones de adsorción, los coeficientes de fricción son comúnmente utilizados. Así estos pueden ser convertidos a la forma convencional por:

$$K_{fk}^{ads} = \frac{S_i^0}{\Gamma^\tau} \sqrt{\frac{RT}{2\pi M_i}} \quad (10)$$

Con S_i^0 como coeficiente de fricción inicial, Γ es la densidad de la superficie de reacción, τ número de sitios ocupados por la adsorción de especies y M_i la masa molar de la especie i .

1.1 Disminución de GEI

Como ya hemos establecido, durante la ignición de combustibles fósiles se crean durante la oxidación del combustible los óxidos de nitrógeno, los cuales se pueden generar mediante dos métodos; formación térmica siendo el Mecanismo Zeldovich o térmico; y el mecanismo “Prompt ON” o mecanismo de oxidación de los compuestos nitrogenados, entre los más importantes.



En aquellos combustibles dónde los compuestos nitrogenados son mínimos tal como el gas natural, solo cobran importancia los dos primeros mecanismos y entre estos, predomina el mecanismo Zeldovich donde la dependencia con la temperatura de la reacción global de este mecanismo es altamente significativa, por lo cual la velocidad de formación de estos óxidos es considerable a temperaturas superiores a los 1500°C.

El mecanismo “Prompt ON” se da en mezclas ricas en hidrocarburos. La combustión catalítica permite un control de los perfiles de temperatura a lo largo del quemador como también una combustión más homogénea lo que evita altos gradientes de temperatura y concentración. Es por ello que la combustión catalítica es una alternativa muy interesante en la disminución de gases tan nocivos a la atmósfera como los óxidos de nitrógeno, la cual se representa en la Figura 6.

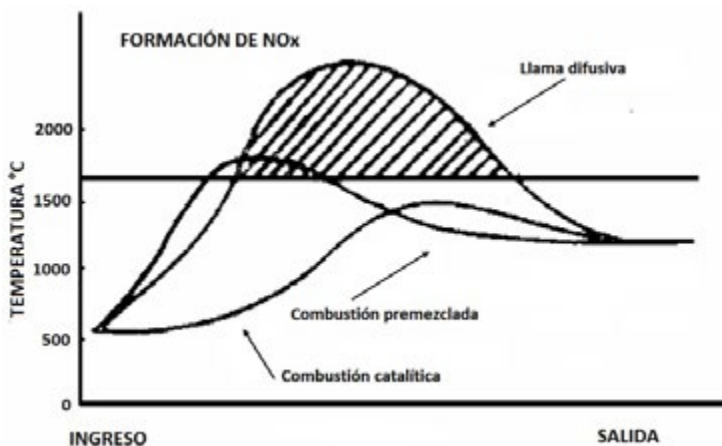
De esta manera, las ventajas de una combustión catalítica no es solo lograr el hacer más eficiente la combustión al eliminar gases como los de los óxidos de nitrógeno y CO; se logra también la reducción de los productos inquemados en aproximadamente el 2%.

La Tabla 1, muestra las tecnologías utilizadas para eliminación de óxidos de nitrógeno, en la combustión de gas natural, donde el costo

de eliminación se analiza por unidad de potencia producida (kWh) considerando las mismas concentraciones de entrada y salida en todos los procesos.

Se presentan asimismo los costos para la eliminación de NOx también son reportados los costos asociados al proyecto de la turbina, es decir los costos por la eliminación de NOx pero por kWh producido; es decir, el costo de producción de energía con la eliminación de contaminantes.

Figura 6. Generación de NOx durante la combustión de combustibles fósiles



Fuente: Lombardo *et al.*, 2001.

Como se observa en la Tabla 1, como los costos del uso de la tecnología de combustión catalítica resulta ser más económica en cualquiera de las tres unidades generadoras, es decir los costos de producción de energía con la eliminación de NOx es igual en cualquiera de los tres tamaños analizados, no así para la tecnología SCONOX la cual es igual de eficiente pero los costos varían de acuerdo al tamaño de la turbina.

1.2 Ventajas y desventajas de la combustión catalítica

El uso de la combustión catalítica presenta varias ventajas entre las que destacan, la reducción de los productos de combustión debido a que se tiene una disminución en el consumo de combustible al incrementarse la eficiencia de la oxidación del combustible, reportando hasta un 100% de eficiencia, consiguiendo las emisiones más bajas de NO_x (de la Tabla 1). Es un método de tratamiento primario de muy bajo costo.

Tabla 1. Costos asociados al uso de las diferentes tecnologías para el control de las misiones

Tecnología de control de emisiones de NO _x	Emisiones de NO _x (ppm)	5 MW		25 MW		150 MW	
		\$/ton ^a	\$/kWh ^b	\$/ton ^a	\$/kWh ^b	\$/ton ^a	\$/kWh ^b
DEL	25	260	7.5	210	12.4	122	5.4
Combustión catalítica	3	957	31.7	692	21.5	371	14.6
Inyección de vapor	42	1652	41	984	24	476	15.2
RCS	9	6274	46.9	3541	20.4	1938	11.7
RCS a alta temperatura	9	7148	53	3841	22.1	2359	13.4
RCS a baja temperatura	9	5894	10.6	11554	42.9	6938	28.9
SCONOX	2	16327	84.7	2202	46.2	-	-

a= coste para eliminar una tonelada de Nox
b= coste por unidad de energía prducida a sumar a los costes asociados al proyecto de la turbina de gas

Fuente: Lombardo *et al.*, 2001.

La tecnología es eficiente a altas temperaturas, incluso entre los 1300-1500°C, por lo cual se tienen control de las reacciones a alta temperatura.

Las principales desventajas que presenta la combustión catalítica es que deben garantizarse al menos 8000 horas de trabajo del catalizador, o de otra manera se incrementarían los costos. Las temperaturas que se alcanzan durante la combustión son superiores a los 1500°C así que deben tomarse en cuenta en el diseño y construcción de los equipos y el combustor.

Si esta tecnología quiere emplearse en una configuración ya establecida, puede ser una ventaja si el calor generado es reutilizado para calentar agua de servicios, o si este calor es recirculado para activar la combustión catalítica, la cual inicia dependiendo del catalizador entre los 300 y 400°C.

Otra de las principales desventajas del uso de catalizadores a altas temperaturas implica que el catalizador debe poseer de igual manera se necesita tener una alta selectividad y ser estable térmicamente durante todo el proceso. -

1.2.1 Características de los materiales para combustión catalítica

Una de las principales desventajas de la combustión catalítica es el uso de catalizadores que sean selectivos a altas temperaturas, pero estables térmicamente a altas temperaturas. En términos tecnológicos, esta es una de las principales oportunidades de mejora y desarrollo de la combustión catalítica.

Un catalizador para uso en la combustión catalítica requiere de ciertas características tales como: alta selectividad a bajas temperaturas, estabilidad térmica, resistencia mecánica y resistencia al desgaste; evitar la sinterización y desactivación para mantener su estructura durante los choques térmicos.

1.3 Desarrollos futuros

Debido a que el gas natural presenta baja difusividad, es necesario el desarrollo de cámaras de combustión híbridas, es decir, es necesario

el desarrollo de cámaras de combustión, así como contemplar que la parte catalítica pueda ser incluida en el control en la alimentación de aire de modo que la cinética de combustión sea más eficiente y con un mayor control en la temperatura adiabática (que se mantenga debajo de los 1000°C). De esta manera, los gases calientes salientes de la sección catalítica promoverán una combustión homogénea a temperaturas inferiores de aquellas obtenidas con una cámara de combustión de una sola fase.

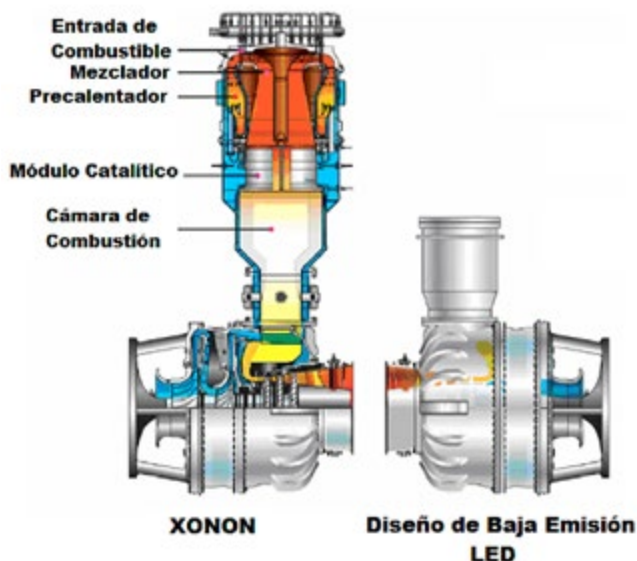
Con la cámara de combustión híbrida propuesta por Toshiba, pero desarrollada por CRIEPI (Ozawa *et al.*, 1999), se han reportado en condiciones máximas de carga en una turbina de 10 MW, donde se han alcanzado los siguientes valores.

- 1) Emisiones de NO_x < 5 ppm
- 2) Emisiones de CO inquemados < 5%
- 3) Eficiencia de combustión > 99%
- 4) Pérdidas de carga < 5%

La tecnología XONON™ desarrollada y comercializada por la empresa Catalytic Energy System, es una muestra de la eficiencia de la tecnología como se puede ver en la Figura 7, donde la integración del módulo catalítico no representa ningún cambio en la configuración de una Turbina de diseño de baja emisión (LED). Sólo se le añade una cámara para colocar los quemadores de precalentamiento y el sistema de remezcla, acoplando el módulo catalítico. Este arreglo que ha sido desarrollado y comercializado es prueba de que la tecnología es eficiente, puede ser desarrollada y aplicada en sistemas previamente instalados.

El desarrollo de la tecnología de combustión catalítica incluso en turbinas previamente desarrolladas tiene un gran potencial, incluso a manera de investigación puede arrojar datos que podrían ser el punto de partida en el diseño de turbinas con una mayor capacidad que las ya instaladas.

Figura 7. Aplicación de la tecnología XONON a una turbina previamente establecida



Fuente: Lombardo *et al.*, 2009.

1.4 Materiales catalíticos para uso en la combustión catalítica

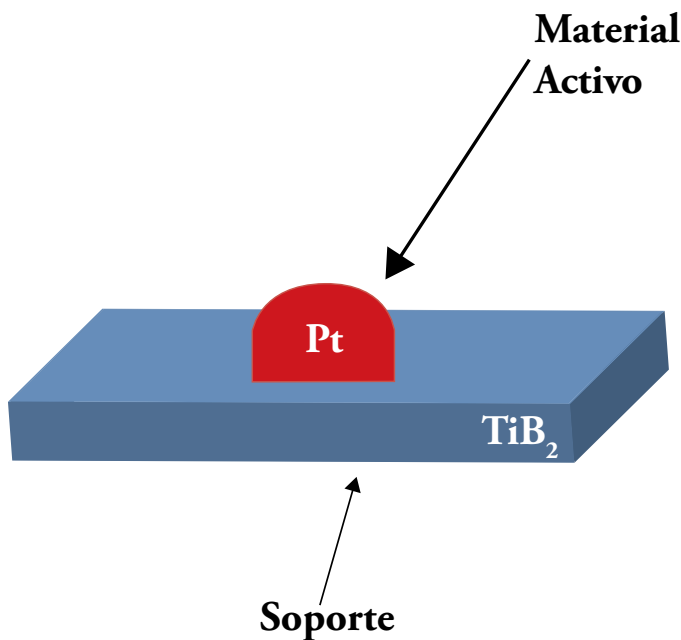
Un catalizador para uso en la combustión catalítica requerirá como principal característica ser estable térmicamente a altas y bajas temperaturas obteniendo como consecuencia una alta selectividad.

Los metales nobles como Pt, Rh y Pd y sus óxidos, son el material activo en un catalizador mayormente utilizados en la combustión catalítica de metano. Los catalizadores de mayor uso en la combustión catalítica están constituidos de diversas fases. El material activo, el soporte, el material de recubrimiento y un revestimiento activo. En la Figura 8, se describen los diferentes materiales que componen los catalizadores típicos de uso común en la combustión catalítica.

Los materiales activos más utilizados en la combustión de gas natural son los de Pt y Pd [John Lee, 1994] soportados sobre materiales cerámicos donde la alúmina es el material de mayor uso dadas sus propiedades térmicas.

En la Tabla 2 se muestran los principales catalizadores utilizados en la combustión catalítica de metano.

Figura 8. Catalizador típico utilizado en la combustión catalítica



Fuente: Combustión catalítica para turbinas de gas, 2011.

Tabla 2 Catalizadores utilizados en la combustión catalítica de metano

Catalizador/ Soporte	Temperatura (°C)	Relación (O ₂ /CH ₄)	Pretratamiento	Conversión de CH ₄	Velocidad de reacción (mol/g cat min)
CoO ₃ O ₄	450	O ₂ puro	-	-	0.78
0.5% Pd/Al ₂ O ₃	450	O ₂ puro	-	-	22.5
0.5% Pd/Al ₂ O ₃	450	O ₂ puro	-	-	1.02
Pd	290-480	2	Reducido con H ₂ a 480°C	5-80%	-
0.155% Pd/Al ₂ O ₃	275-475	4	Calentado a 500°c con He	-	-
0.153% Rh/Al ₂ O ₃	350-500	4	-	>80%	1.60 E-05
0.22% Pt/Al ₂ O ₃	300-500	4	-	>25%	2.30 E-05
0.2% Pt/SiO ₂	450	2	Reducido con H ₂ a 300°C	>10%	7.40E-05
0.22% Pt/Al ₂ O ₃	450	2	-	-	-
0.2% Pt/SiO ₂ -Al ₂ O ₃	450	2	-	-	-
1.95% Pt/Al ₂ O ₃ (I)	280-600	4	Reducido con H ₂ a 600°C	100%	-
1.95% Pt/Al ₂ O ₃ (II)	280-600	4	Precalentado con O ₂ /CH ₄ a 600°C	100%	-

Fuente: Jonh Lee, 1994.

Como se observa en la Tabla 2, algunos catalizadores son muy eficientes cómo en el caso de Pt soportado sobre alúmina, donde precalentado la mezcla de combustión se logra una eficiencia de conversión del 100%. Este antecedente es definitivamente el más prometedor debido a que al menos a nivel laboratorio se ha logrado una conversión del 100% a una temperatura relativamente baja y sin ningún tratamiento extra.

1. POLÍTICA MEXICANA ANTE LA MITIGACIÓN DE GEI

Desde que México fue incluido en el Anexo II de la Convención Marco de las Naciones Unidas Sobre Cambio Climático celebrada en Kioto Japón en 1997, se ha comprometido a reducir sus emisiones de GEI a la atmósfera. México como país adscrito al Anexo de los países en vías de desarrollo se compromete a desarrollar tecnologías preventivas, es decir al ser un país en vías de desarrollo no está obligado a participar activamente en la mitigación de GEI si no que está comprometido a desarrollar su propia tecnología sustentable y amigable con el medio ambiente. Para ello, México ha accedido a varios fideicomisos como el del protocolo de Montreal en el cual participan México-Canadá-Estados Unidos, entre otros.

México ha emprendido varias acciones y creado varias leyes como la Ley General sobre Cambio Climático dónde se describen la política y acciones a seguir en cuanto a mitigación y adaptación.

Igualmente, ha publicado varios documentos, libros e investigaciones a partir del sexenio 2006-2012 donde se plantearon políticas más radicales en todos los sectores. Se publicó la agenda Gris, un documento que describe la política mexicana y el plan de acción a seguir para durante los próximos 50 años. El actual sexenio actualizó varios programas como el de adaptabilidad de la zona costera, y transformo al ya establecido Instituto Nacional de Ecología en el Instituto Nacio-

nal de Ecología y Cambio Climático, fortaleciendo las actividades e incluyendo el cambio climático como un tema de actualidad, el cual es necesario de incluirlo en las políticas públicas del país.

1.1 La combustión catalítica una alternativa en la mitigación de GEI, una perspectiva desde México

Las reservas de hidrocarburos del país se muestran en la siguiente Tabla 3, donde se observa que, en el año 2009, las reservas de petróleo se proyectaban para 9.6 años, considerando la extracción de pozos profundos. En cuanto el carbón y gas natural las reservas se estiman por poco más de 50 años. En un panorama energético poco favorable es esencial que la política mexicana dé un gran salto a una alternativa de mitigación y adaptación responsable, generando políticas y leyes que de alguna manera los procesos de generación y consumo de energía sean sustentables y amigable con el medio ambiente.

En el análisis de la economía sobre el cambio climático, el Dr. Galindo resalta que en pocos años los costos de la falta de acción serán al menos tres veces mayores que los costos de mitigación que se adopten. Partiendo de este concepto es necesario desarrollar un plan de acción que vaya más allá de los decretos que se quedan en papel. Es necesario trabajar en diversos temas tratando de incluir a todos los sectores involucrados.

Tabla 3. Reservas totales de hidrocarburos en México

Hidrocarburos	Reservas (1E6 ton)	Producción (1E6 ton)	R/P (Años)
Carbón	1211	12	99
Gas Natural	89	1.41	63.07
Petróleo	11000	1145.83	9.6

Fuente: González, 2009.

Si se logra tener un eficiente conjunto de acciones con los sectores que pueden y deben tener participación activa, se logrará que México además de ser pionero en el tema de mitigación sea uno de los países incluidos en el Anexo 1 de la CMUNCC al tomar la iniciativa en materia de mitigación y adaptación de forma activa, siendo el sector energético y de transporte los principales rubros por atender dado que son los principales aportadores de los GEI debido a la combustión parcial de los combustibles fósiles que les caracteriza desde hace muchos años atrás.

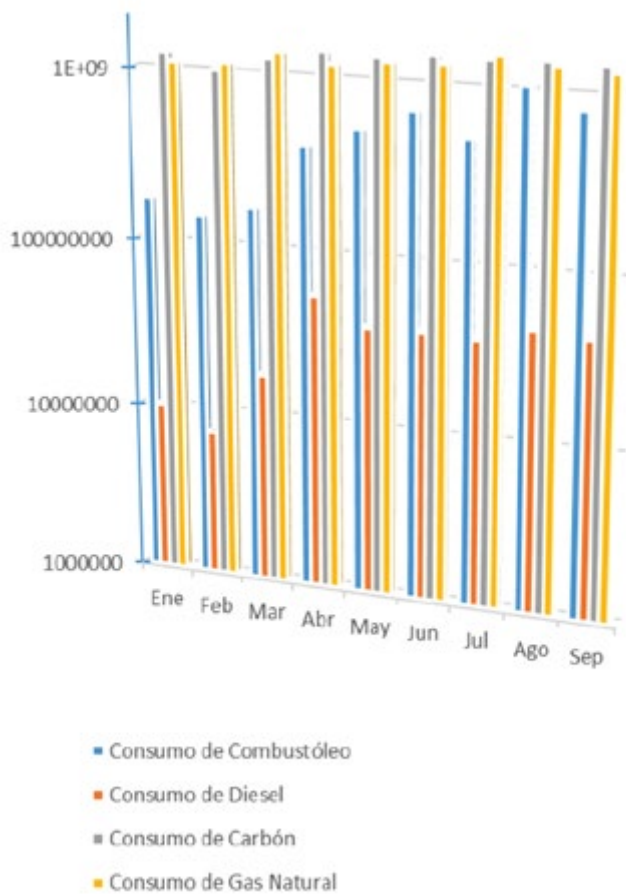
1.1.1 Generación de energía en México

En México, la generación de energía se lleva a cabo mediante el quemado de dos fuentes combustibles. El gráfico de la Figura 9 muestra al carbón y gas natural como los dos combustibles que mayor consumo en la generación de electricidad. En lo que va del año (2015) se ha incrementado de manera considerable el consumo de gas natural. Así que es muy importante que se analicen las posibles formas de prevención de emisión de gases de combustión como NO_x, SO_x, CO y CO₂ además de la fracción de CH₄ que queda sin reaccionar.

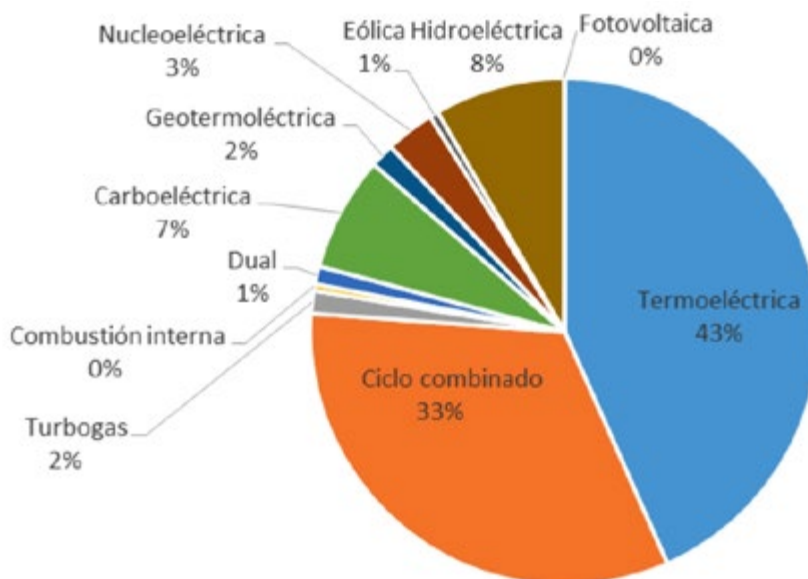
En la Figura 10 se observa la proporción de las principales tecnologías generadoras de electricidad en México donde la quema de combustibles fósiles en la termoeléctrica es la tecnología más utilizada, siendo la quema de combustibles la principal forma de generar electricidad y el gas natural el combustible que más se utiliza.

Otra de las principales fuentes de generación de GEI es el transporte, contribuyendo con el 40% del total de las emisiones.

Figura 9. Consumo de combustibles fósiles para la generación de electricidad



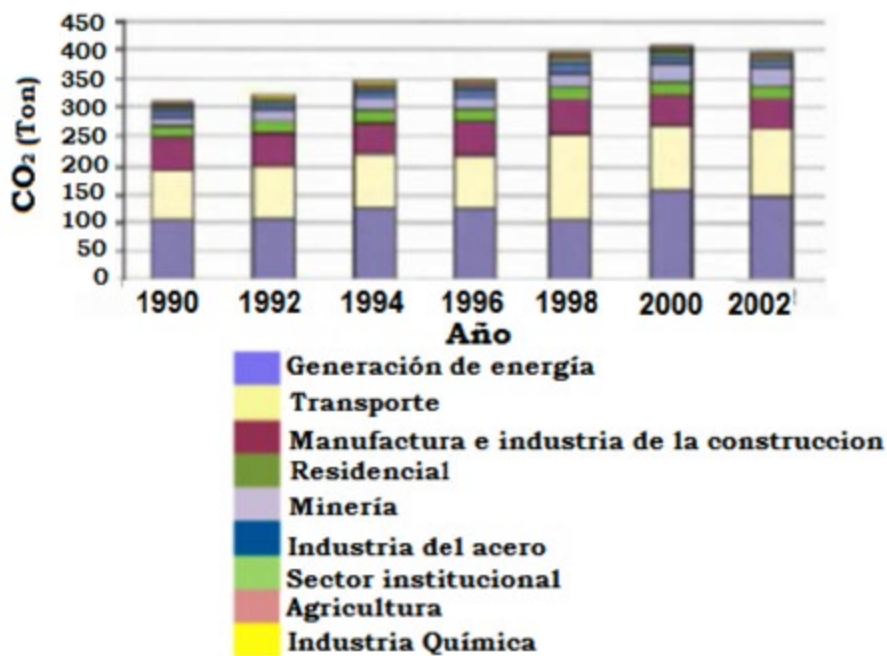
Fuente: sie.energia.gob.mx

Figura 10. Generación de electricidad por tecnología

Fuente: sie.energia.gob.mx

1.1.2 Emisión de GEI por el transporte

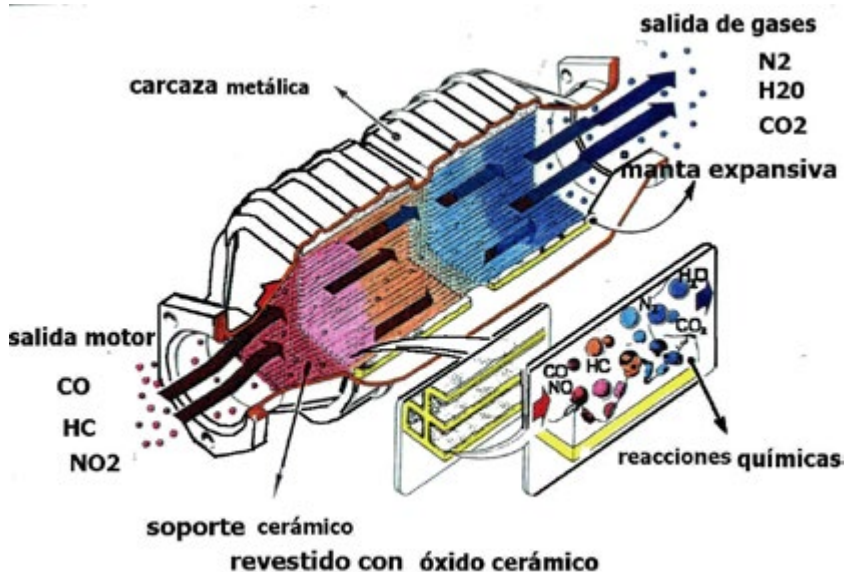
Además de la generación de energía eléctrica el transporte es otro de los grandes generadores de GEI debido a la combustión parcial de combustibles fósiles. En la Figura 11 se observa su estrecha relación con la generación de CO₂ emitido a la atmósfera.

Figura 11. Tendencia de la emisión de GEI en México 1990-2002

Fuente: Johnson *et al.*, 2009.

Hace algunos años se intentó disminuir estas emisiones acoplando un catalizador a la salida de los gases de combustión (postcombustión). Este convertidor catalítico está hecho de una mezcla de Ro-Pd-Pt, soportado sobre corderita y recubierto con óxido de lantano (Figuras 12 y 13). Éste convertidor catalítico presentaba varias desventajas tales como, la sinterización del material cerámico debido a su baja estabilidad térmica por lo que se fractura con facilidad.

Figura 12. Convertidor catalítico común

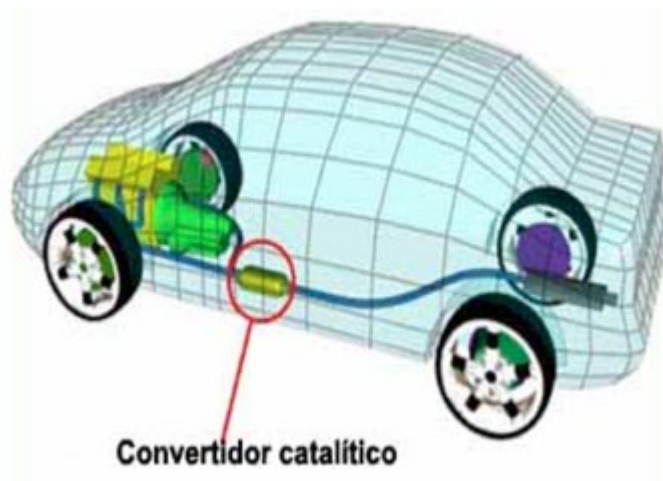


Fuente: Techemet Inc.

Otra desventaja es el costo, incluyendo la disminución de la contaminación generada por los metales que se desprendían del catalizador; aunado a que nunca se planteó en un análisis de ciclo de vida la disposición final de este tipo de materiales.

La combustión catalítica puede ser una alternativa viable para este sistema. Esto porque el convertidor se fundamenta en el mismo principio de catálisis heterogénea a bajas temperaturas (200-300°C) bajo un concepto de pre combustión y no postcombustión.

Figura 13. Función del convertidor catalítico (Techemet Inc)



Fuente: Techemet Inc.

Otra parte esencial en el desarrollo de cualquier tecnología de mitigación es el análisis de costo beneficio, el cual indicará si la tecnología puede ser aplicable en los términos en el que se plantea. Yendo un poco más adelante, lo esencial sería hacer un análisis de ciclo de vida de la tecnología por desarrollar.

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

El análisis de ciclo de vida es una técnica efectiva en la comparación de dos productos o servicios donde se identifica y cuantifica la energía, materiales usados, entradas y salidas al medio ambiente. La evaluación incluye desde la extracción de las materias primas, manufactura, transportación y distribución, uso, reutilización, reciclaje y disposición final. Este análisis se realiza para evaluar si una tecnología es competitiva o no con respecto al impacto ambiental que su manufactura,

utilización, rechazo y confinación pueden generar dentro de su ciclo de vida; siendo necesario hacer este tipo de análisis paralelamente al análisis costo-beneficio que debe hacerse a cada una de las tecnologías, para así poder establecer un balance en cuanto a emisiones que cada tecnología puede originar.

REFLEXIONES FINALES

México siempre se ha caracterizado por tener una participación activa y comprometida con la disminución de los contaminantes atmosféricos, hasta ahora los esfuerzos se han concentrado en la disminución de CFC's debido a que se ha comprometido su disminución desde el Protocolo de Montreal.

Se ha elaborado un plan de Trabajo ha desarrollar durante los próximos 30 años, se han firmado acuerdos, escrito libros, promulgado leyes entre otras cosas. Se han desarrollado estrategias de desarrollo bajo en emisiones LEDS (Low Emission Development Strategies) la cual contempla evaluar los potenciales de mitigación, así como los costos de abatimiento. En el Plan Especial de Cambio Climático 2014-2018, del contenido en el Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018 México Prospero de las 6 estrategias sólo una contempla la disminución de los Gases de Efecto Invernadero, ninguna contempla el desarrollo de tecnologías que hagan más eficiente la combustión o que promuevan el uso sustentable de los combustibles fósiles.

Aunque el reporte de los costos de mitigación publicados en 2009 por el Dr. González, indica que los costos de inacción son al menos 3 veces mayores a los costos de mitigación. El principal y real costo debiera ser el hecho de que se están consumiendo recursos no renovables y que el daño causado a los ecosistemas y el medio ambiente es irreversible.

Sin duda alguna proponer una estrategia de mitigación requiere de un esfuerzo de parte de varios actores, que si trabajan en equipo

buscando el bien común resultaría en una política pública y eficiente. Además de contribuir al crecimiento sustentable e incluyente de todos los sectores involucrados (sociedad, gobierno, sector empresarial e investigación).

Implementar acciones no sólo de adaptación, sino de abatimiento con impactos positivos, sobre la economía, desarrollo social, reducción de la pobreza e incrementando la productividad del país.

Algunos autores describen los pasos a seguir para el desarrollo de una LED con la consecuente implementación de una tecnología, generalmente estos pasos son varios. Sin embargo, se pueden resumir en tres principales, tales como:

- 1) Desarrollar un proceso de planificación participativo e incluyente; preparar los perfiles de cambio climático, así como los posibles escenarios e identificar los más vulnerables.
- 2) Identificar opciones estratégicas que conduzcan hacia el desarrollo de una política de mitigación. Identificar Políticas y Opciones de Financiamiento para la implementación de Acciones Prioritarias para hacer frente al Cambio Climático.
- 3) Evaluar las emisiones de GEI por sector, así como su proyección de emisión a futuro, para hacer una estimación de las tecnologías útiles en cada región y zona geográfica del país.

Esto para que una vez que se establezca la mejor tecnología a implementar, desarrollar el mejor plan de acción para cada tecnología. Para que de esta manera se pueda preparar la estrategia de desarrollo bajo en emisiones y adaptado al cambio climático, se realicen las consideraciones necesarias para hacer de la tecnología una tecnología sustentable al menos por un tiempo considerablemente largo (tiempo de vida del catalizador).

A este respecto, la combustión catalítica es una tecnología promissora, debido a que presenta algunas ventajas como:

En cuanto a la política de eficiencia energética se promueve el uso de tecnologías sustentables. Es decir, la tecnología promueve el uso eficiente de los combustibles de origen fósil, y de manera indirecta disminuyendo la generación de GEI como el CO_2 el cual se reduce al utilizar una cantidad menor de combustible, sumado al uso de un catalizador que evita la generación de gases contaminantes y productos inquemados.

En las compañías dónde ya es aplicada la tecnología, ésta ofrece una alternativa muy eficiente en la generación de energía.

Claro tendría que analizarse de manera correcta y eficiente si su uso es viable a escala macroscópica y con el desarrollo de la tecnología adecuada, la cual podría adaptarse incluso a los equipos preinstalados, es decir no se requeriría comenzar desde el diseño y construcción de las plantas generadores de energía.

CONCLUSIONES

Sin duda, la combustión catalítica en cualquiera de sus modalidades (pre o postcombustión) es una tecnología conocida y de la cual se saben sus ventajas potenciales en la reducción de GEI al incrementar la eficiencia de la combustión; favoreciendo con ello el aumento en la temperatura de combustión, la reducción en el consumo de combustible y por consecuencia, la reducción en la emisiones de CO , CO_2 , NO_x e inquemados principalmente; sin embargo, el uso y optimización de los catalizadores con paladio y platino como materiales activos en la combustión catalítica tanto en los sectores industrial y automotriz son una área de oportunidad en México, considerando que hasta el momento se han ofertado pocas alternativas de solución al problema del cambio climático y en donde como Nación no se ha presentado en forma contundente qué es lo que en materia de investigación y desarrollo tecnológico se está haciendo en el tema y cuáles serían los resultados en corto a largo que puedan comprometerse ante los orga-

nismos internacionales; de tal manera que paralelamente es necesaria una política pública que regule y motive el uso de este tipo de tecnologías en la mitigación de los GEI.

BIBLIOGRAFÍA

- Abbasi R., Wu L., Wanke S.E., Hayes R.E. (2012). Kinetics of methane combustion over Pt and Pt-Pd catalysts: *Chemical Engineering Research & Design. Transactions of the Institution of Chemical Engineers Part A* (pp. 1930-1942). Vol. 90.
- Brabbs T.A., Merrit S.A. (1993). Fuel Rich Catalytic Combustion of a High Density Fuel. *NASA Technical Paper* (pp. 1-11). Washington: NASA.
- Bartholomew C.H., Farrauto R.J. (2006). *Fundamentals of industrial catalytic processes*. Segunda edición. New Jersey: Editorial Wiley-Interscience.
- Bychkov Y.V., Tyulenin Y.P., Gorenberg A.Y., Solokov S., Korchak Y.N. (2014). Evolution of Pd catalysis structure and activity during catalytic oxidation of methane and ethane. *Applied Catalysis* (pp. 1-9). Vol. 485. Issue 2014.
- Cerri I., Saracco G., Specchia V. (2002). Methane combustion over low emission catalytic foam burners. *Catalysis Today* (pp. 21-32). Vol. 60. Issue 2002.
- Chen-Bin W., Hsin-Gwo L., Tsao-Fa Y., Sung-ien H., Kuang-Shing C. (2003). Thermal characterization of titania-modified alumina-supported palladium and catalytic properties for methane combustion. *Thermochimica Acta* (pp. 209-216). Vol. 401. Issue 2.
- CFE (2016). Estadísticas del Sector Eléctrico e Indicadores de CFE. México: CFE.
- Dong L., Li D.J., Zhang S., Yan J.Y., Liu M.Y., Gao C.K., Wang N., Liu G.Q., Gu G., Wan R. X. (2012). Microstructure and mechanical properties of as-deposited and annealed TiB₂/BN superlattice coatings. *Thin Solid Films* (5328-5332). Vol. 520.
- Foot Print Network (2014). Huella de carbono, definiciones y cálculo de la huella de carbono. New York: FPN.

- Fau G., Gascoin N., Steelant J. (2014). Hydrocarbon pyrolysis with methane focus: A review on the catalytic effect and coke production. *Journal of analytical Applied Pyrolysis* (pp. 1-11). Vol. 108. Issue 2014.
- Galindo L.M. (2009). La economía del Cambio Climático en México. México: UNAM.
- Gobierno de la República (2017). Inventario de sustancias agotadoras de la capa de ozono. Consumo ponderado de sustancias agotadoras del ozono estratosférico. México: Gobierno de la República.
- González Santaló J.M. (2009). *Generación de energía a partir de combustibles fósiles*. México: INEEL.
- Hazan Özdemir M.A., Faruk Öksüzömer M., Gürkaynak A. (2014). Effect of the calcination temperature on Ni/MgAl₂O₄ catalyst structure and catalytic properties for partial oxidation of methane. *Fuel* (pp. 63-70). Vol. 116. Issue 2014.
- Hierso J.C., Feurer R., Poujardieu J., Kihn Y., Kalck P. (1998). Metal-organic chemical vapor deposition in a fluidized bed as a versatile method to prepare layered bimetallic nanoparticles. *Journal of Molecular Catalysis A* (pp.321-325). Vol. 135. Issue 1998.
- Hierso J.C., Feurer R., Poujardieu J., Kihn Y., Kalck P., Todd J., Alatorre C., Romo Z., Feng L. (2009). *Low-carbon development for Mexico*. USA: Conference Edition.
- INECC (2014). *Los costos del cambio climático*. México: INECC.
- INEGI (2015). *Estadísticas de consumo y Generación de Gases de efecto invernadero per cápita en México*. México: INEGI.
- Kinnunen N.M., Hirvi J.T., Suvanto M., Pakkanen T.A. (2012). Methane combustion activity of Pd-PdOx-Pt/Al₂O₃ catalyst: The role of platinum promoter. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical* (pp. 20-28). Vol. 356.
- Kohse-Höinghaus J.J.B. (2002). *Applied Combustion Diagnostics. Combustion: An international Series*. London: Taylor and Francis.
- Lee J.H., Trimm D.L. (1995). Catalytic combustion of methane. *Fuel*

- Processing Technology* (pp. 339-359). Vol. 42. Issue 1995.
- Liu W.Y., Qian T.T. (2014). Hong Jiang, Bimetallic Fe nanoparticles: recent advances in synthesis and application in catalytic elimination of environmental pollutants. *Chemical Engineering Journal* (pp. 448-463). Vol. 236. Issue 2014.
- Lefebvre A.H., Ballal Dilip R. (2011). *Gas Turbine Combustión. An Alternative fuels and Emissions*. London: CRC Taylor and Francis Group.
- Lombardo E.A., Ulla M.A. (2001). *Combustión Catalítica de gas natural a alta temperatura*. México: INCAPE.
- Pemex (2015). Productos. México: Pemex.
- Powers M.J. (2014). *Lecture Notes on Fundamentals of Combustion*. Notre Dame, Indiana, USA: Department of Aerospace and Mechanical Engineering University of Notre Dame.
- Sánchez B., Gross M.S., Dalla Costa B., Querini C.A. (2009). Coke analysis by temperatura-programmed oxidation: Morphology characterization. *Applied catalysis* (pp.35-41). Vol. 364.
- SEMARNAT (2014). *Plan Nacional de desarrollo, Programa Especial de Cambio Climático (2014-2018)*. México: SEMARNAT.
- Tomasic V. (2007). Application of the monoliths in DeNOx catalysis. *Catalysis Today* (pp. 106-113). Vol. 119. Issue 2007.
- Tomasic V., Gomzi Z. (2004). Experimental and theoretical study of NO decomposition in a catalytic monolith reactor. *Chemical Engineering and Processing* (pp. 765-774). Vol. 43. Issue 2004.
- Yasushi O., Tomoharu F., Mikio S., Takaaki K., Hitoshi I. (1999). Development of a catalytically assisted combustor for a gas turbine. *Catalysis Today* (pp. 399-405). Vol. 47 Issue 1999.
- Warnatz J., Maas U., Dibble R.W. (2009). *Combustion Physical and Chemical Fundamentals, Modeling and Simulation, Experiments, Pollutant Formation*. London: Springer.

CAPÍTULO 7

Quema de la caña de azúcar, carbono negro y cambio climático

Naxieli Santiago de la Rosa⁴⁰
Violeta Mugica Álvarez^{1*}

INTRODUCCIÓN

México es el sexto productor de caña de azúcar en el mundo por lo que esta actividad representa un importante ingreso económico equivalente al 0.4% del PIB. Sin embargo, durante el proceso agrícola de la caña (zafra) es común que se realicen dos quemas de biomasa; la primera para facilitar la cosecha de la vara dulce y la segunda para eliminar los residuos agrícolas. Estas prácticas agrícolas tienen como consecuencia un incremento del potencial de calentamiento de la atmósfera terrestre que acelera el cambio climático, ya que además de emitirse miles de toneladas de dióxido de carbono que es un gas invernadero, se emiten cientos de toneladas de partículas a la atmósfera que además de representar un riesgo para la salud contienen carbono negro que es un importante forzador radiativo de vida corta.

En este capítulo se presentan resultados que muestran que durante la época de zafra del 2012-2013 la emisión de CO₂ fue alrededor de 740 000 toneladas, mientras que el carbono negro atmosférico se incrementó hasta en 160% en comparación a la época en ausencia de zafra en la zona del Soconusco del estado de Chiapas.

40, 1* Profesoras-investigadoras de la Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco. Av. San Pablo 180 Col Reynosa, Azcapotzalco, CP 0220. Correo de contacto vma@correo.azc.uam.mx.

Asimismo, con el fin de mitigar la emisión de estas especies que contribuyen al calentamiento global y al cambio climático, se analizó la cuestión socioeconómica en los campos de cultivo de la caña de azúcar, con el objetivo de visualizar la perspectiva de la modificación del proceso agrícola convencional con quema a la cosecha en verde.

COSECHA DE LA CAÑA DE AZÚCAR Y QUEMA DE BIOMASA

En el proceso agrícola convencional de la caña de azúcar se realizan dos quemas de biomasa; la primera para facilitar la cosecha de la vara dulce, que elimina las hojas cortantes de la caña y la maleza además de ahuyentar insectos y serpientes, y la segunda para desechar los residuos que se originan durante la cosecha en los campos de cultivo eliminar los residuos agrícolas provenientes de la cosecha.

La combustión de biomasa utiliza como combustible la materia vegetal, debido a que todos los tejidos de las plantas son inflamables, dado que la materia vegetal está constituida por carbono (50%) y oxígeno (40-50%) (PNUMA, 2005). En su mayoría, estos dos elementos forman parte de la celulosa, hemicelulosa y lignina como parte de su composición química, sumado a su alto contenido de agua; la combustión de la materia vegetal en general no es un proceso químicamente eficiente ni siquiera en las condiciones más favorables (Kumar y Sharma, 2017), esto se debe a que el calor liberado es absorbido por el agua contenida en el combustible, reduciendo así la temperatura de la reacción de combustión; además, la circulación del aire dentro y alrededor del fuego no aporta suficiente oxígeno a la zona de combustión, y el aire aleja los gases parcialmente oxidados de las zonas de alta temperatura, lo que provoca la liberación de productos de una combustión incompleta a la atmósfera (PNUMA, 2005) causando problemas de contaminación ambiental y de efecto invernadero. Los principales contaminantes que se emiten por la combustión incompleta son; mo-

nóxido de carbono (CO_2), dióxido de carbono (CO), compuestos orgánicos volátiles, carbono orgánico y carbono negro (Bachman, 2009).

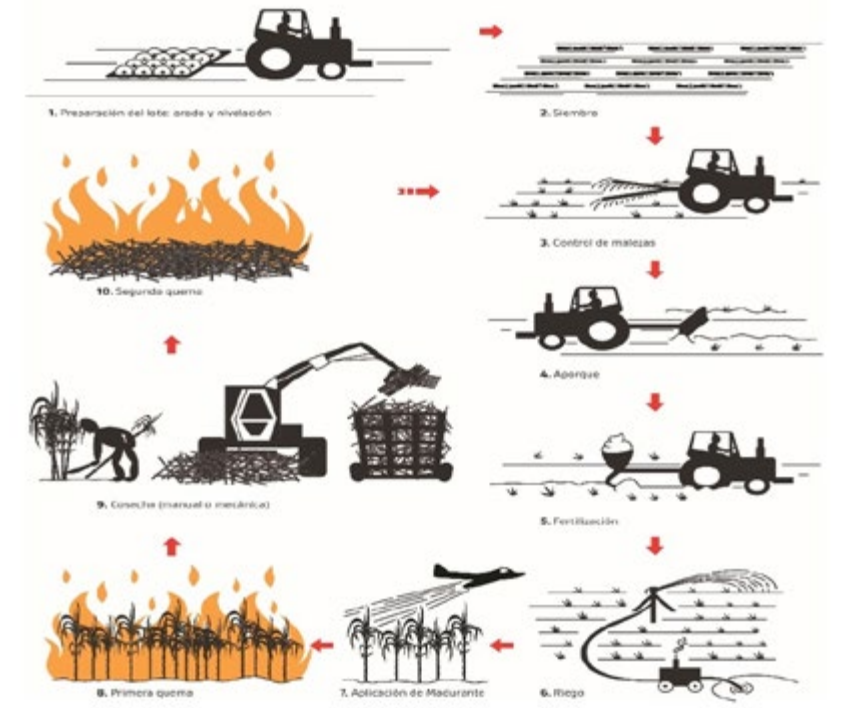
En la caña de azúcar, el tallo es el órgano de mayor importancia (desde el punto de vista económico), porque en él se almacenan los carbohidratos producto de la fotosíntesis de la planta. Posteriormente, por medio del proceso industrial se obtiene la sacarosa y otros derivados como la melaza, el bagazo y la cachaza. Los tallos están formados por nudos y entrenudos.

En cada nudo se inserta una hoja, cuando la caña está en crecimiento, las hojas más bajas se secan, caen y son reemplazadas por las que nacen en los nudos superiores. Después de la etapa de maduración, el cultivo alcanza los niveles óptimos de azúcar, la cual está en función de su peso (Subirós, 1995).

La cosecha consiste en cortar el tallo con machete o con cosechadoras mecánicas, desde su parte más baja, previo a esta actividad se realiza la primer quema de biomasa con el objetivo de eliminar la hojarasca de su tallo y facilitar el corte. Después del corte se separa el follaje que no es eliminado por la quema (hojas verdes y punta) y se forman pilas con los tallos, usualmente orientados perpendicularmente al sentido de los surcos siguiendo el frente de corte, lo que facilita su levante por un cargador mecánico que los deposita en una unidad de transporte para su traslado al ingenio (Eggeston *et al.*, 2001).

Todos los residuos orgánicos remanentes de la cosecha se quedan en el terreno por un periodo de 2 a 6 días para su secado, los cuales regularmente después de este tiempo se queman, ya que no es usual que los residuos se acomoden en los surcos de manera que se contribuya a mejorar las condiciones de estructura y contenido de materia orgánica, a través de su descomposición y lenta incorporación al suelo (Robertson y Thorburn, 2007; Beuchelt *et al.*, 2015). Después de estas actividades, inicia la preparación del terreno para el siguiente ciclo productivo (Figura 1).

Figura 1. Proceso agrícola convencional de la caña de azúcar



Fuente: Elaboración propia.

PRODUCCIÓN DE CAÑA DE AZÚCAR EN LA REGIÓN DEL SOCONUSCO DEL ESTADO DE CHIAPAS

En México se destinan 21.95 millones de ha para el cultivo de diversos productos agrícolas, de acuerdo con la Cámara Nacional de la Industria Azucarera y Alcohólica. México ocupa, a nivel mundial, el sexto lugar en la producción de azúcar. En la zafra 2012-2013, a nivel nacional, se cosecharon alrededor de 780,000 ha con una producción de 61 millones de toneladas y un rendimiento de 78.74 tonha⁻¹(CONADESUC, 2013).

La caña de azúcar se cultiva en 15 estados y 227 municipios, genera un valor de producción primaria de alrededor de 30 mil millones de pesos y más de dos millones de empleos, tanto en forma directa como indirecta (SAGARPA, 2012).

La caña de azúcar aporta el 13.5% del valor de la producción agrícola nacional y representa el 0.4% del PIB y el 7.3% del PIB agropecuario (Zafranet, 2016).

Chiapas utiliza una superficie de 1.4 millones de ha para fines agrícolas, lo que representa el 6% a nivel nacional (INEGI, 2010). La caña de azúcar en el estado de Chiapas ocupa el 8°. lugar de la producción estatal, siendo los principales cultivos: la palma africana, el café cereza y el cacao (INEGI, 2011), en el estado se destina una superficie de 30 mil ha solamente para el cultivo de la caña de azúcar, las cuales se gestionan a través de dos ingenios azucareros: Pujiltilic y Belisario Domínguez, ubicados en los municipios de Venustiano Carranza y Huixtla respectivamente, 16 mil ha corresponden al ingenio Pujiltilic y 14 mil ha al Ingenio Belisario Domínguez.

En ninguna de las dos zonas cañeras del estado se ha realizado algún estudio que analice el impacto de la quema de biomasa como parte del proceso agrícola de la caña de azúcar. Se estima que para el periodo de zafra del 2012-2013, comprendido del 16 de noviembre del 2012 al 13 de mayo del 2013, en la región del Soconusco, se cosecharon 1.29 millones de toneladas de caña de azúcar (vara dulce) en 14,250 ha con un rendimiento en campo de 90.55 tonha⁻¹ (CONADESUC, 2013); en promedio se queman al día 101 ha para abastecer las 7,600 toneladas de vara dulce, como mínimo, que el ingenio Belisario Domínguez requiere (CNC, 2013).

Lara *et al.* (2005) reportaron en Brasil que las emisiones de partículas atmosféricas provenientes de la quema de caña de azúcar se encuentran en la siguiente proporción: 60% de partículas finas (PM_{2.5}) y 25% de partículas gruesas (PM_{10-2.5}). Entre los constituyentes de las partículas se ha encontrado que más del 40% de las partículas finas

son aerosoles carbonáceos (Mugica *et al.*, 2009), lo que ocasiona serios problemas a la salud, ya que éstos se depositan fácilmente dentro del sistema respiratorio y permiten que compuestos tóxicos se adhieran, provocando que sea un posible compuesto cancerígeno.

Aerosoles de carbono negro

El Panel Intergubernamental de Cambio Climático, 2001 (IPCC por sus siglas en inglés), define a las partículas atmosféricas como partículas sólidas o líquidas transportadas por el aire, que poseen un tamaño entre 0.01 y 10 μm de diámetro aerodinámico; se observan asiduamente como polvo, humo y/o neblina y son de origen natural o antropogénico. Las partículas de origen natural son los polvos del desierto, montaña, sales de mar y aquellos que se producen durante las erupciones volcánicas, y los de origen antropogénico se forman a partir de actividades industriales y/o urbanas en las cuales se utilizan combustibles fósiles y biomasa (EPA, 2010).

En los últimos años se le ha dado mayor importancia a las partículas PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$, las cuales, son aquellas que poseen un diámetro aerodinámico menor a 10 y 2.5 μm respectivamente. De acuerdo con lo establecido por la Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés) ambos tamaños son capaces de interferir con uno o más mecanismos de defensa del aparato respiratorio, o actuar como un vehículo de sustancias tóxicas absorbidas o adheridas a la superficie de la partícula. Se ha demostrado que los aerosoles o partículas PM_{10} ocasionan enfermedades respiratorias, debido a que son capaces de atravesar las barreras de la nariz y conducirse por la garganta hasta llegar finalmente a los pulmones, por su parte, las $\text{PM}_{2.5}$ poseen un tamaño que penetra más profundamente al sistema respiratorio y torrente sanguíneo; asimismo, las partículas pueden tener adheridos compuestos tóxicos orgánicos y metales pesados, que afectan las vías respiratorias, cardiovasculares y en exposiciones prolongadas hasta la muerte (EPA, 2010).

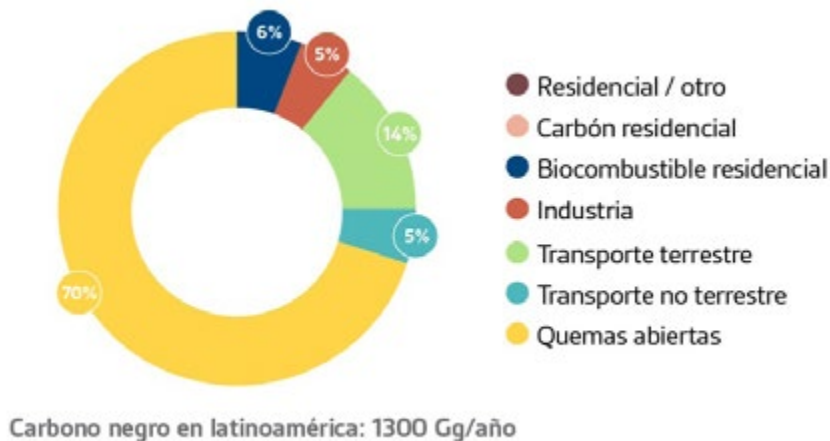
Dentro de las partículas atmosféricas se encuentran los aerosoles carbonáceos que contienen especies de carbono orgánico y elemental, denominado también carbono negro. El nombre utilizado suele estar en función al método de medición que se utilice, cuando se utiliza un método óptico para su determinación se le denomina carbono negro y cuando se utiliza un método químico se le denomina carbono elemental, sin embargo, en los reportes del IPCC se utiliza solamente el término de carbono negro sin importar el método de medición. Los aerosoles de carbono orgánico (OC, por sus siglas en inglés) están clasificados en primarios y secundarios, los primeros se generan durante la combustión incompleta, resuspensión de polvo y partículas biogénicas primarias, virus, bacterias, polen, esporas de hongos y desechos de tipo vegetal (Hildemann *et al.*, 1994); por otra parte, los aerosoles de carbono orgánico secundario son el producto de las reacciones atmosféricas entre compuestos orgánicos volátiles y trazas de gases atmosféricos (O_3 , $OH^\cdot$, NO^{-3} , NO^{-2}), seguidos por la nucleación y/o condensación de productos menos volátiles (Seinfeld y Pandis, 2006), lo que representa la mezcla de cientos de compuestos orgánicos, teniendo algunos de ellos características mutagénicas y/o cancerígenas, como es el caso de los hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAH's, por sus siglas en inglés), dibenzo-p-dioxinas policloradas y dibenzofuranos (Feng *et al.* y Hui *et al.*, 2008).

Los aerosoles de carbono negro o elemental (BC o EC, por sus siglas en inglés) provienen solamente de la combustión incompleta de combustibles fósiles (aceite, petróleo) y orgánicos (biomasa), esto se debe a que la temperatura de la flama es baja ($350-400^\circ C$), lo que ocasiona que el combustible se queme de forma incompleta. El carbono negro es la fracción de la combustión que es insoluble en disolventes polares y no-polares (Bergstrom *et al.*, 2002) y se genera cuando la reacción de combustión está limitada por el oxígeno, siendo el principal producto el hollín (Badanirath *et al.*, 2009), a diferencia de cuando ocurre una combustión completa en donde el CO_2 (dióxido de carbono) y vapor de agua, son los principales productos.

El BC es uno de los principales aerosoles antropogénicos presentes en la atmósfera (Banarinath *et al.*, 2009) y es un indicador de contaminación atmosférica; posee un tiempo de residencia menor a una semana en la atmósfera, específicamente en la tropósfera (Babu y Moorthy, 2001), por eso se le clasifica como un contaminante de vida corta. Debido a lo anterior, las mayores concentraciones se encuentran en países industrializados y en regiones en donde se practica comúnmente la combustión de biomasa (Das y Jayaraman, 2011; Jung *et al.*, 2014). Se ha estimado que la exposición intensa al humo doméstico a causa de la combustión de combustibles sólidos (madera, carbón, excrementos de animales o residuos agrícolas) provoca la inhalación de partículas de hollín y origina la muerte prematura de 2 millones de personas al año, el 44% por neumonía, 54% por enfermedades pulmonares crónicas y un 2% por cáncer de pulmón, sin embargo, no se ha determinado en ningún sitio un estándar mínimo permisible para el carbono negro (OMS, 2004).

El Programa de Ciencia del Cambio Climático (CCSP, 2009), por sus siglas en inglés) estimó que la emisión de carbono negro fue de 11 Tg en 2009. El 38% de estas emisiones se relacionan con combustibles fósiles, el 20% con biocombustibles y el 42% con quema de biomasa (Bond *et al.*, 2004). Debido a que la emisión de aerosoles de carbono provenientes de la combustión de biomasa está relacionada con la materia orgánica que se utiliza como combustible y la cantidad de humedad que posee, los inventarios de emisiones relacionados con estos aerosoles poseen alta incertidumbre (Sahu *et al.*, 2012). En Latinoamérica se estima que al año se emiten 1300 Gg de carbono negro, las cuales en su mayoría (70%) se deben a las quemas abiertas de biomasa, principalmente por incendios forestales y la combustión de residuos agrícolas (Figura 2) (AIDA, 2009).

Figura 2. Fuentes latinoamericanas de carbono negro según el sector de emisión.



Fuente. Modificado de AIDA, 2009.

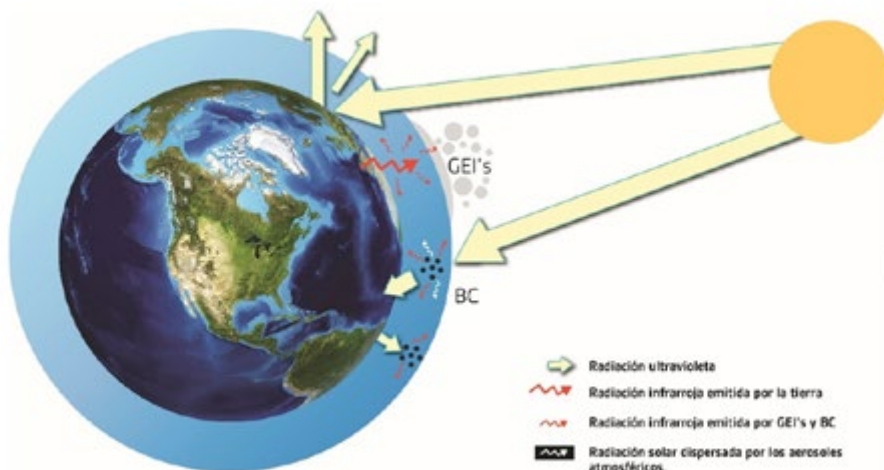
EFFECTOS DE LOS AEROSOLES DE CARBONO NEGRO SOBRE EL CALENTAMIENTO GLOBAL

Desde el primer informe de evaluación del IPCC, se mencionó que los gases de efecto invernadero GEI (CO_2 , metano, óxidos de nitrógeno, y CFC's) son los causantes del desequilibrio en el balance radiativo del planeta porque estos gases no permiten la salida de la radiación infrarroja que refleja la superficie de la tierra. Lo anterior ocasiona el incremento del efecto invernadero con un correspondiente aumento de la temperatura. La presencia de GEI en la atmósfera, impide la salida de una porción de la radiación infrarroja lo que ocasiona un aumento en la temperatura global (Bond *et al.*, 2013). Este efecto también se conoce como forzamiento radiativo y se define como la irradiación neta vertical (la descendente menos la ascendente, expresada en Wm^{-2} en la tropopausa sobre todas las longitudes de onda cuando existe la

ausencia y presencia de una sustancia. El forzamiento positivo indica que la sustancia fuerza a un incremento en la temperatura antes de que pueda ocurrir un retorno de la energía a causa de la superficie terrestre o tropósfera (IPCC, 2007; Jacobson, 2000). Se ha estimado que el forzamiento radiativo positivo a causa del aumento de las concentraciones de CO_2 , CH_4 y N_2O es de $2.3 (\pm 0.2) \text{ Wm}^{-2}$ (IPCC, 2007). Los aerosoles atmosféricos también modifican el forzamiento radiativo del planeta por su característica de absorber y disipar la radiación solar e infrarroja; las partículas de carbono negro absorben la radiación solar en todas las longitudes de onda desde las cortas (luz ultravioleta) hasta las largas (luz infrarroja), por eso, en combustiones incompletas se generan plumas de humo con tonalidades negras. Asimismo, transforman la luz ultravioleta a infrarroja, aumentando la capacidad de irradiación de energía a la atmósfera alrededor de las partículas, en contraste con los GEI que solamente absorben la energía infrarroja emitida por la superficie de la tierra (Figura 3). Se ha reportado que después del CO_2 el carbono negro es el principal causante del calentamiento global (Baron *et al.*, 2009).

El impacto en el forzamiento radiativo del carbono negro se ha calculado en regiones cercanas a las fuentes de emisión y se observó que su aportación es de 2 a 3 veces mayor en la atmósfera alta y de un orden mayor en la superficie en comparación con los GEI, esto se debe a que los aerosoles de carbono negro tienden a mezclarse con compuestos de carbono orgánico y sulfatos. Por ello, adoptar medidas en la mitigación del carbono negro llevaría a obtener mejores resultados para detener el aumento de la temperatura global que si únicamente se pone atención en reducir los GEI.

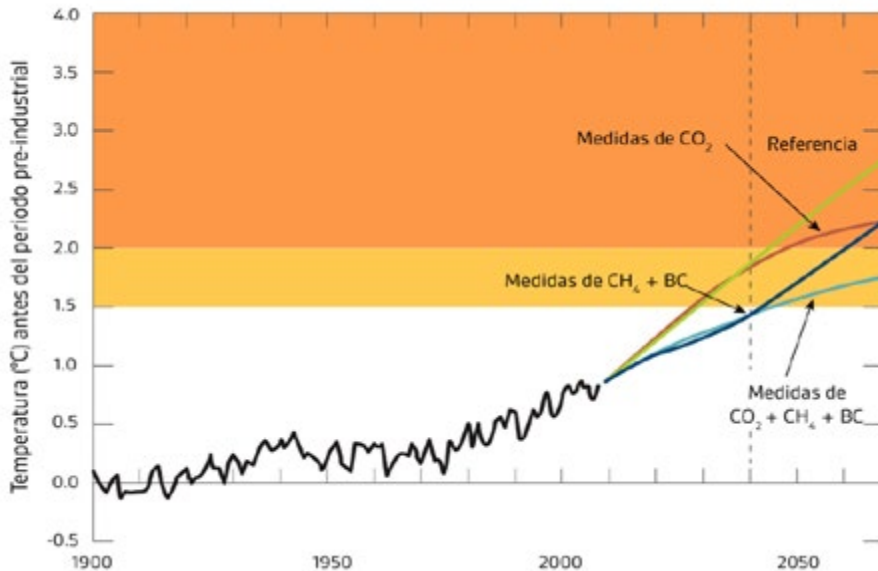
Figura 3. Balance radiativo del planeta con la presencia de aerosoles de carbono negro y gases de efecto invernadero (GEI).



Fuente: Modificado de Bachmann, 2009.

Disminuir solamente la concentración del CO_2 implicaría que para el año 2050 se rebasaría a nivel global la temperatura 2°C por encima de los niveles preindustriales, por lo que, si se controlan las emisiones de CO_2 y CH_4 el aumento de 2°C sería hasta el 2060; sin embargo, si las medidas toman en cuenta la reducción de emisiones en conjunto de CO_2 , CH_4 y carbono negro el límite de los 2°C sería excedido hasta el 2070 (Figura 4), por lo que la implementación de políticas que permitan reducir las concentraciones de carbono negro y CH_4 , en conjunto con el CO_2 , favorecería a detener el aumento de la temperatura del planeta (UNEP y WMO, 2011).

Figura 4. Observaciones desviadas de la temperatura en 2009 y proyecciones bajo diferentes escenarios



Fuente: Modificada de UNEP y WMO, 2011.

En esta investigación se analiza el impacto en la calidad del aire debido a la emisión de aerosoles de carbono negro durante el proceso agrícola de la caña de azúcar en la zona Soconusco del estado de Chiapas, en particular en el municipio de Huixtla. También se presenta una visión general de la situación socioeconómica dentro de los campos de cultivo y la perspectiva de trasladar el cultivo de la caña convencional a un proceso sin quema, es decir, cosecha en verde, considerando sus implicaciones ambientales y sociales.

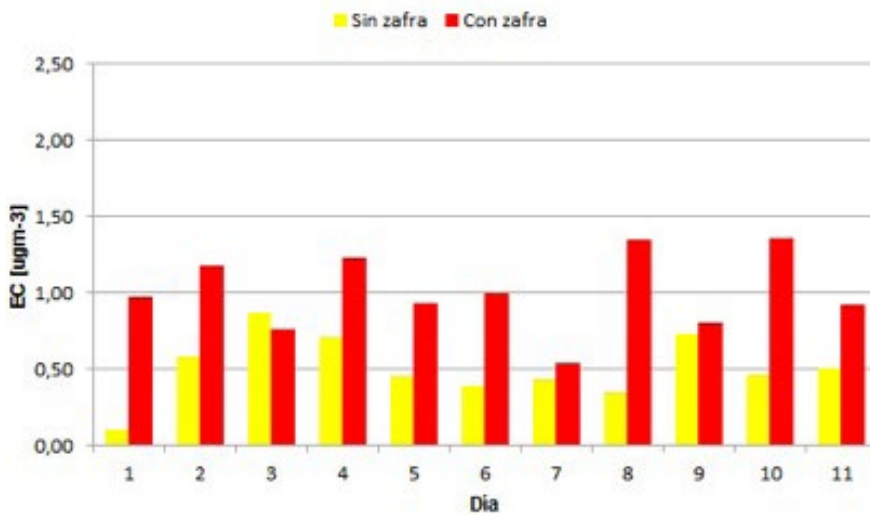
CUANTIFICACIÓN DE CARBONO NEGRO EN HUIXTLA, CHIAPAS.

El sitio de estudio fue en la ciudad de Huixtla, Chiapas (15°01'N y 92°32'E), la cual posee una población de 51,359 habitantes (INEGI, 2010) y su principal actividad económica es el cultivo de la caña de azúcar, a 10 km de la ciudad se encuentra el ingenio azucarero Belisario Domínguez. El primer periodo de estudio fue en octubre del 2012 antes de la temporada de cosecha de caña de azúcar (ausencia de zafra) y del en febrero de 2013 durante la temporada de cosecha (con zafra).

La colección de aerosoles de carbono elemental se realizó con muestreadores de alto volumen Hi-Vol para partículas $PM_{2.5}$ y PM_{10} , marca Tisch Environmental; se utilizaron filtros de cuarzo, el tiempo de muestreo fue de 24 horas con un flujo promedio de $66.26 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ y la cuantificación de los aerosoles de carbono elemental se realizó por medio de un análisis químico, utilizando el equipo OC/EC Laboratory Marca SUNSET Lab-Inc., a concentración de carbono elemental durante la época de no zafra fue de 0.48 y $0.59 \text{ } \mu\text{gm}^{-3}$ en $PM_{2.5}$ y PM_{10} respectivamente y de 0.88 y $1.55 \text{ } \mu\text{gm}^{-3}$ y durante la época de zafra de (Figuras 5 y 6). El aumento en la concentración de carbono negro en $PM_{2.5}$ durante la época de zafra fue del 83.33% y del 162.71% en PM_{10} , lo que indica que la quema de biomasa aumenta la cantidad de carbono negro en la zona cañera de la ciudad de Huixtla, Chiapas. En un estudio de $PM_{2.5}$ en Brasil (Lara *et al.*, 2005), se encontró un aumento del 100% durante la época de zafra en comparación con la época de no zafra; el monitoreo que se realizó en Huixtla, presentó un resultado similar, debido a que en esta región la única actividad industrial es durante la época de zafra, por lo que cuando no hay zafra los valores disminuyen notablemente, aunque no por completo porque al ser una zona agrícola todo el año se presenta la quema de residuos agrícolas. Esta situación, además de contribuir al cambio climático, re-

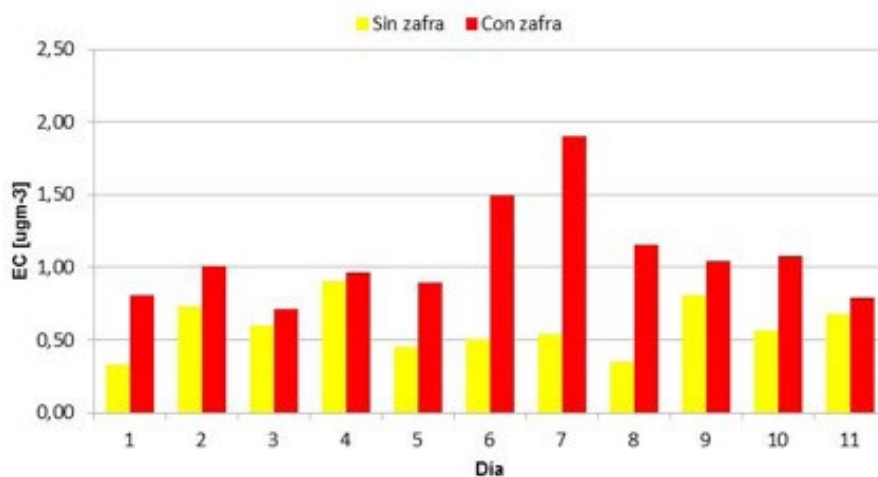
presenta un riesgo para la salud por lo que los tomadores de decisiones deben diseñar estrategias que mejoren de manera definitiva la calidad del aire como es la prohibición de las quemas.

Figura 5. Resultados de concentración de carbono negro en $PM_{2.5}$ con y sin zafra



Fuente. Elaboración propia.

Figura 6. Resultados de concentración de carbono negro en PM₁₀ con y sin zafra.



Fuente. Elaboración propia.

IMPACTO DEL PROCESO AGRÍCOLA CONVENCIONAL DE LA CAÑA DE AZÚCAR SOBRE EL CALENTAMIENTO GLOBAL

Para estimar el impacto del carbono negro sobre el calentamiento global durante la quema de la caña de azúcar, es necesario identificar los factores de emisión (FE) y el potencial de calentamiento global (GWP, por sus siglas en inglés) de este aerosol, así como la identificación de todos los contaminantes que se emiten durante las quemas que modifican el balance radiativo del planeta. Actualmente se carece de un factor de emisión avalado por el IPCC del carbono negro durante la quema de la caña de azúcar, por lo que, estimar su impacto a nivel global aún posee alta incertidumbre a diferencia de lo que sucede con los estudios realizados en torno de los gases de efecto invernadero.

A nivel internacional se han determinado FE's para $PM_{2.5}$, carbono orgánico (OC) y carbono negro en cultivos como son; trigo, arroz y pastos (Tabla 1). Aunque algunos investigadores (Hall *et al.*, 2012) han realizado estimaciones del FE de la caña de azúcar no han sido reconocidos por el IPCC o la EPA, puesto que la cantidad de carbono negro reportada es mayor que la de OC lo cual contradice a otros estudios (Bond *et al.*, 2004).

Tabla 1. Factores de emisión de BC, OC, y $PM_{2.5}$ para diferentes cultivos agrícolas

Cultivo	OC (g.Kg ⁻¹)	BC (g.Kg ⁻¹)	Reference
Caña de azúcar	0.16 ± 0.09	0.71 ± 0.22	Hall <i>et al.</i> , 2012
Pastos	1.9	0.35	Dhammapala <i>et al.</i> , 2007
Trigo	6.9	0.63	
Paja de arroz	1.23	0.17	Hays <i>et al.</i> , 2005
Trigo	8.94	0.52	

Fuente. Elaboración propia.

Como se mencionó anteriormente durante la quema de biomasa se emite CO₂, el cual es el GEI antropogénico más importante. Este contaminante posee un GWP igual a 1. Con relación al carbono negro se han reportado varios valores de GWP's (Tabla 2).

Tabla 2. GWP del carbono negro

Carbono negro		Referencia
20 años	100 años	
2200	680	Bond y Sun, 2005 ^a
2530	840-224	Jacobson, 2007 ^b
2900	830	Rypdahl <i>et al.</i> , 2009 ^c
~2000	~500	Hansen <i>et al.</i> , 2007 ^d
	900	Bond <i>et al.</i> , 2013 ^e
1600	460	IPCC, 2007

^a Para más detalles sobre el cálculo del GWP ver Bond (2007).

^b Estima el hollín de combustibles fósiles, incluye el carbono negro, carbono orgánico y sulfatos. El límite superior asume un tiempo de vida menor que el CO₂.

^c Rangos de carbono orgánico reflejado en diferentes regiones.

^d Usa el incremento de la temperatura, estima las emisiones desde mediciones de absorción.

Fuente: Tabla modificada de UNEP y WMO, 2011.

^e Métrica utilizada en México para los INDC's.

En la Tabla 3 se indica que el forzamiento radiativo del BC en un periodo de 20 años es aproximadamente de 2000, lo que significa que un gramo de carbono negro contribuye 2000 veces más al calentamiento global que un gramo de CO₂, por lo tanto, disminuir la emisión de una tonelada de carbono negro equivaldría a la reducción de 2000 y 600 toneladas de CO₂eq en un periodo de 20 y 100 años respectivamente. Se han estimado los FE's del CO₂ durante la quema de la caña de azúcar, los cuales nos permiten conocer el impacto de un gas de efecto invernadero en conjunto con un contaminante de vida corta como es el carbono negro.

Tabla 3. Factor de emisión de CO₂ de la quema de caña de azúcar

CO ₂ (gkg ⁻¹)	Referencia
1838	Yokelson <i>et al.</i> , 2008
1255	Hall <i>et al.</i> , 2012

Fuente. Elaboración propia.

Considerando las hectáreas y toneladas cosechadas y quemadas durante el proceso agrícola de la caña de azúcar en la región Soconusco del estado de Chiapas, se realizó una estimación de las toneladas de CO₂ emitidas en el año por la zafra de la caña y se realizó el ejercicio para determinar las toneladas equivalentes de CO₂eq emitidas por concepto de la emisión de carbono negro (cabe mencionar que ésta métrica aún no ha sido aprobada por la IPCC por su incertidumbre). El resultado fue que se emitieron a la atmósfera durante la temporada de zafra 636 384 ton de CO₂eq (Tabla 4), utilizando los factores de emisión de CO₂ y BC reportados por Hall *et al.*, 2012 (Tabla 3) y el potencial de calentamiento global GWP=900 para 100 años (Bond *et al.*, 2013), lo anterior implica que el BC aporta el 33.7% de forzamiento radiativo positivo a causa de la quema de la caña de azúcar solamente en la región Soconusco del estado de Chiapas. (Tabla 4).

Tabla 4. Estimación de la emisión de CO₂ equivalente de la quema de la caña de azúcar por CO₂ y BC durante la zafra en la región del Soconusco 2012-2013

Región		Soconusco
ha cosechadas		14 000
Ton cosechadas		1 120 000
Ton incineradas		336 000
Ton CO₂ emitido		421 680
Ton BC emitido		238.56
Ton CO₂eq por BC		214 704
Ton	CO₂[eq] a 20 años	636 384

Fuente. Elaboración propia.

COSECHA EN VERDE: EL RETO DE MITIGACIÓN EN LOS CAMPOS MEXICANOS

Una forma de mitigar las emisiones de CO₂ y carbono negro por las prácticas agrícolas mencionadas, es la aplicación de la cosecha en verde. La cosecha en verde, es el proceso agrícola de la caña de azúcar en donde se elimina la práctica de la quema de los residuos durante el proceso agrícola, la cual puede ser de forma mecanizada o manual; el desarrollar esta técnica agrícola permitiría reducir el impacto en problemas de contaminación atmosférica y calentamiento global a causa del carbono negro y los diversos contaminantes que se emiten en ciudades que realizan la quema de biomasa en la agricultura. La cosecha en verde implica cambios tecnológicos, y hasta el año 2017 aún no están desarrollados en su totalidad, porque romper con las prácticas

tradicionales implicaría capacitación e inversión de maquinaria específica. FIRA (Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura) realizó un estudio referente al impacto de la mecanización en los costos de producción y cosecha en verde de la caña de azúcar, y mencionó que entre los factores más importantes que deben tomarse para implantar la cosecha en verde en los campos mexicanos son los siguientes (FIRA, 2007):

- 1) Manejo de los residuos
- 2) Labranza reducida en la preparación de los terrenos
- 3) Fuentes y manejo de fertilizantes
- 4) Dinámica de la población de los insectos
- 5) Manejo del riego

Además, incluyó un análisis económico referente a los costos de la producción de forma tradicional de la caña (parcialmente mecanizado y quemando los residuos) en comparación a la cosecha en verde (totalmente mecanizada, tecnificada y sin quema de residuos), en donde se observa que la producción quemando la caña tiene un costo de \$44 659 por hectárea y evitando la quema el costo es de \$34,979, lo que indica una reducción del 22% por hectárea cuando se realiza la cosecha en verde mecanizada.

A pesar de que México incluyó en su Programa Especial de Cambio Climático 2009-2012 el fomento de la cosecha en verde de la caña de azúcar (Meta 58), de acuerdo con el informe de este documento solamente 162,000 ton de caña de azúcar se cosecharon en verde a nivel nacional en el 2012, lo cual representa el 0.36% de la producción anual. Se realizó la solicitud a la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) con el objetivo de dar seguimiento al cumplimiento de la meta 58 del Programa de Cambio Climático, la cual indica que tiene un avance del 84%. En el documento de respuesta se señaló que solamente a

los estados de Colima y Jalisco se les ha brindado apoyo económico para la compra de tres cosechadoras en verde, una en Colima y dos en Jalisco, con montos de \$562,500 y \$1,125,000 respectivamente. Además, se informa que cada máquina posee una capacidad de cosecha de 600 ha por año y para el periodo 2007-2012 se habían cosechado 166 000 hectáreas y producido 162 000 toneladas de caña de azúcar, tomando el rendimiento promedio de 90 ton/ha, para el año 2017 estas cifras no se han modificado y en su mayoría la caña se sigue cosechando utilizando la quema.

México presentó en marzo de 2015 su documento de “Contribución prevista y determinada a Nivel Nacional”, denominado también INDC por sus siglas en inglés (Intended Nationally Determined Contribution), donde se compromete a la reducción del 51% de emisiones de carbono negro para el año 2030 considerando una meta de reducción no condicionada de 10,000 toneladas de CN por actividades agropecuarias donde la cosecha de la caña de azúcar tendrá un papel preponderante ya que esta práctica representa el 7% de las emisiones totales de carbono negro del país (Gobierno de la República, 2015).

SITUACIÓN SOCIAL DE LOS CORTADORES DE CAÑA

En el proceso convencional de la caña de azúcar solamente en la zona Soconusco del estado de Chiapas se requieren mil jornaleros agrícolas para realizar la actividad del corte de caña después de su quema. Por su cercanía con los países de Guatemala, Honduras y El Salvador, la mayoría de los jornaleros proceden de estos países (aproximadamente el 90%). En la zafra 2012-2013 el arribo de jornaleros centroamericanos se realizó desde los primeros días de noviembre del 2012 con el objetivo de iniciar sus labores a mediados de ese mes y se quedaron en esta región hasta que la zafra concluyó (mayo del 2013). Por lo que, al eliminar el corte manual y realizarlo totalmente mecanizado se eliminaría esta fuente de trabajo. Sin embargo, pro-

ductores de esta región afirman que realizar el corte en verde mejora la calidad de la caña de azúcar ya que la sacarosa es integra, pero existe el problema de que para los cortadores es peligroso realizar el corte en verde, porque la hojarasca de la caña les ocasiona cortes en la piel y hay mayor presencia de insectos y animales como son las víboras, representando un riesgo para su salud. A pesar de que al realizar el corte en verde el pago por tonelada cortada es de 65 pesos, en comparación a los 32.5 pesos que se les paga al realizar el corte con quema.

Con respecto a que el corte se realice en verde en la región Soconusco del estado de Chiapas, las opiniones se encuentran divididas, debido a que los productores argumentan que el proceso se vuelve lento sin la quema y el período de zafra es corto. También debe considerarse que, en noviembre, en esta región, las lluvias desaparecen y en mayo se reanudan, por eso en un lapso de 5 meses se debe realizar la cosecha, la cual está en función del porcentaje de sacarosa en el tallo. De marzo a abril la sacarosa disminuye por la falta de humedad y el exceso de calor, propiciando que, en lugar de azúcar, el tallo produzca fibra, por lo que no es conveniente tener caña hasta el mes de mayo y al quemarla el proceso se agiliza.

Para cumplir el objetivo de cosechar de noviembre hasta mayo sin quemar la caña se requeriría más mano de obra y maquinaria, pero actualmente el campo tiene escasez de recursos y una cosechadora aproximadamente cuesta 6 millones de pesos y actualmente se carece de apoyos económicos por parte del gobierno.

Otro punto que exponen es que, aunque al ingenio le conviene que todo el proceso se realice sin quema puesto que la frescura de la caña es mejor, al realizarla en forma mecanizada la cosechadora se desgasta más y los gastos de mantenimiento aumentan, aunado a que según sus rendimientos se invierte el doble de *diesel* cuando se cosecha en verde, por lo que los costos de operación aumentan y es más lento. Al quemarla, la máquina se desplaza más rápido en el terreno propiciando mejores rendimientos y menos desgaste en las cuchillas.

En la región se puede realizar la cosecha en verde y mecanizada porque no existen piedras en los terrenos, pero se debe hacer un compromiso entre el ingenio, las asociaciones cañeras y productores con el objetivo de que el proceso se realice en forma adecuada y no solamente transferir tecnologías de Colombia, Brasil y Australia, ya que se tienen que generar tecnologías locales con base en las necesidades de la zona, y adaptarlas. Al cosechar en verde se tendrían muchas ventajas ya que se favorece el ambiente, se ahorra agua, se incrementa la materia orgánica en el suelo y se disminuyen las malezas (Beuchelet *et al.*, 2015). Las desventajas que se observan son solamente económicas ya que deben invertir en la maquinaria, realizar la nivelación por medio de láser en los terrenos con el objetivo de calibrar las cosechadoras y la capacitación de las personas que operan las máquinas para que éstas realicen el corte al ras y así evitar pérdidas en el peso del tallo y las impurezas de éste.

Finalmente es necesaria una política pública que a nivel federal evite la quema de los residuos agrícolas, lo cual se ha logrado en otros países, en los que se reporta una menor degradación del suelo al utilizar los residuos como composta, sin embargo, hay resistencia puesto que se favorece el aumento de roedores. A la fecha no hay normatividad que refuerce la agenda climática del país para evitar las quemas agrícolas, pero en un futuro cercano deberán formularse normas y reglamentos acordes al desarrollo sustentable en todas las regiones cañeras del país.

CONCLUSIONES

El cultivo de la caña tiene una gran importancia económica para el país. Sin embargo, en la cosecha de este producto se acostumbra realizar quemas precosecha y postcosecha, lo cual implica la emisión de gases y partículas que dañan a la salud, contribuyen al incremento del efecto invernadero y favorecen el cambio climático.

Se realizó por primera vez, en la región Soconusco del estado de Chiapas, un estudio referente a la calidad del aire por la contamina-

ción de aerosoles de carbono negro emitidos por la quema de la caña de azúcar como parte de su proceso agrícola.

Se concluyó que la quema de caña de azúcar aumenta significativamente la concentración de carbono negro o elemental en $PM_{2.5}$ y PM_{10} , en comparación con la temporada en que no se realiza esta actividad. Huixtla presentó un aumento del 83.33% de aerosoles de negro o carbono elemental en $PM_{2.5}$ y del 162.71% en PM_{10} . Estos datos deben alertar a las autoridades ambientales y de salud.

En la región Soconusco del estado de Chiapas se emitieron 636 384 ton CO_2eq en la zafra 2012-2013 por la quema de la caña de azúcar, por lo que, si se elimina esta práctica se favorecería la disminución de CO_2 equivalente en el país, para el año 2017 la situación no se ha modificado y se sigue realizando la cosecha con quema.

Se concluye que en los campos de cultivo de caña de azúcar se presentan diversas problemáticas sociales y económicas, las cuales afectan el desarrollo del cultivo y no permite que sea competitivo a nivel mundial. Asimismo, se observa que para la transición exitosa de la cosecha de la caña de azúcar con quema de biomasa a la cosecha en verde se debe de tomar en cuenta el aspecto social, principalmente de los cortadores de caña que requieren equipo de protección personal.

Jornaleros y productores involucrados en el proceso del cultivo de la caña de azúcar concuerdan en que la quema de ésta propicia problemas ambientales que afectan la calidad de la salud de la población y la desertificación del suelo, lo que provoca un menor rendimiento en la producción de los campos de cultivo, por lo que es necesario que el proceso agrícola se modifique, con base en un desarrollo tecnológico adecuado a la región.

BIBLIOGRAFÍA

- AIDA (2009). *El Carbono Negro: Concepto, Efectos Climáticos y Oportunidades en su Control*. México: Asociación Interamericana para la Defensa del Ambiente.
- Babu S.S., Moorthy K.K. (2001). Anthropogenic impact on aerosol black carbon mass concentration at a tropical coastal station: A case study. *CURRENT SCIENCE* (pp. 1208-1214). Vol. 81.
- Bachmann J. (2009). *BLACK CARBON: A Science/Policy Primer*. London: Pew Center on Global Climate Change.
- Badarinath K.V.S., Kharol S.K., Sharma A.R. (2009). Long-range transport of aerosols from agriculture crop residue burning in Indo-Gangetic plains a study using LIDAR, ground measurements and satellite data. *Journal of the Atmospheric and Solar Terrestrial Physics* (pp. 112-120). Vol. 71.
- Baron R.E., Montgomery W.D., Tuladhar S.D. (2009). *An Analysis of Black Carbon Mitigation as a Response to Climate Change*. Washington: CRA International Washington DC for Copenhagen Consensus Center.
- Bergstrom R.W., Russell P.B., Hignett, P. (2002). Wavelength Dependence of the Absorption of Black Carbon Particles: Predictions and Results from the TARFOX Experiment and Implications for the Aerosol Single Scattering Albedo. *Journal of the Atmospheric Sciences* (pp. 567-577). Vol. 59.
- Beuchelt T.D., Camacho Villa C.T., Göhring L., Hernández Rodríguez V.M., Hellin J., Sonder K., Erenstein O. (2015). Social and income trade-offs of conservation agriculture practices on crop residue use in Mexico's central highlands. *Biomass Use Trade- Cereal Crop. Syst. Implic. Dev. World* (pp. 61-75). Vol.134.
- Bond T.M., Streets D.G, Yarber K.F., Nelson S.B., Woo J., Klimont Z. (2004). A technology-based global inventory of black and or-

- ganic carbon emissions from combustion. *Journal of Geophysical Research* (pp. 1-43), Vol. 108.
- Bond T.C., Sun H. (2005). Can Reducing Black Carbon Emissions Counteract Global Warming? *Environmental Science and Technology* (pp. 5291-5296). Vol. 39.
- Bond T. C., Doherty S.J., Fahey D.W., Forster P.M., Berntsen T., DeAngelo B.J., Zender C.S. (2013). Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (pp. 5380-5552). Vol. 118. Issue 11.
- CCSP (2009). *U.S. Climate Change Science Program, Atmospheric Aerosol Properties and Climate Impacts*. Washington: CCSP.
- CONADESUCA (2013). Reportes de cierre, sistema INFOR-Caña. México: CONADESUCA.
- CNC (2013). Producción de caña de azúcar región Soconusco, Chiapas, zafra 2012-213. México: *Unión Local de Productores de Caña de Azúcar CNC del Ingenio Huixtla AC*.
- Das S.K., Jayaraman A. (2011). Role of black carbon in aerosol properties and radiative forcing over western India during premonsoon period. *Atmospheric Research* (pp. 320-334). Vol.102.
- Dhammapala R., Claiborn C., Jimenez J., Corkill J., Gullett B., Simpson C., Paulsen M. (2007). Emission factors of PAHs, methoxyphenols, levoglucosan, elemental carbon and organic carbon from simulated wheat and Kentucky bluegrass stubble burns. *Atmospheric Environment* (pp. 2660-2669). Vol. 41.
- Egginston G., Legendre B., Richard C. (2001). Effect of harvest method and storage time on sugarcane deterioration: cane quality changes. *International Sugar Journal* (pp. 331-338). Vol. 103. Issue 1232.
- US EPA (2010). Quantitative Health Risk Assessment for Particulate Matter. Washington: US EPA.

- FIRA (2007). Impacto de la mecanización en los costos de producción y cosecha en verde (no quema) de caña de azúcar. México: FIRA.
- Gobierno de la República (2015). Contribución prevista y determinada a Nivel Nacional. México: Gobierno de la República.
- Hall D., Wu, , Hsu C.Y., Stormer J., Engling G., Capeto K., Yu, K.M. (2012). PAHs, carbonyls, VOCs and PM2.5 emission factors for pre-harvest burning of Florida sugarcane. *Atmospheric Environment* (pp. 164-172). Vol. 55.
- Hansen J., Sato M., Kharecha P., Rusell G., Lea D.W., Siddall M. (2007). Climate change and trace gases. *The Royal Society* (pp.1925-1954). Vol. 365.
- Hays M.D., Fine P.M., Geron C.D., Kleeman M.J., Gullett B.K. (2005). Open burning of agricultural biomass: physical and chemical properties of particle-phase emissions. *Atmospheric Environment* (pp. 6747-6764). Vol. 39.
- Hildemann L.M., Klinedinst D.B., Klouda G.A., Currie L.A., Cass G.R. (1994). Sources of urban contemporary carbon aerosol. *Environmental Science and Technology* (pp. 1565-1576). Vol. 28. Issue 9.
- Hui L., Jialiang F., Guoying S., Senlin L., Jiamo F., Pingan P., Ren M. (2008). The PCDD/F and PBDD/F pollution in the ambient atmosphere of Shanghai, China. *Chemosphere* (pp. 576-583). Vol. 40. Issue 4.
- INEGI (2011). *El Sector Alimentario en México*. México: INEGI.
- INEGI (2010). *Información nacional, por entidad federativa y municipios*. México: INEGI.
- IPCC (1990). *First Assessment Report: Climate Change*. Cambridge: IPPC and University of Cambridge Press.
- IPCC (2001). *Third Assessment Report Climate Change 2001*. Appendix I. Glossary. Cambridge: IPPC and University of Cambridge Press.
- IPCC (2007). *Fourth Assessment Report: Climate Change*. Cambridge: IPPC and University of Cambridge Press.

- Jacobson M.Z. (2000). A physically-based treatment of elemental carbon optics: Implications for global direct forcing of aerosols. *Geophysical Research Letters* (pp. 217-220). Vol. 27,
- Jacobson M.Z. (2007). *Testimony for the Hearing on Black Carbon and Arctic*. House Committee on Oversight and Government Reform.
- Jung, J., Lee, S., Kim, H., Kim, D., Lee, H., Oh, S. (2014). Quantitative determination of the biomass-burning contribution to atmospheric carbonaceous aerosols in Daejeon, Korea, during the rice-harvest period. *Atmos. Environ* (pp. 624-650). Vol. 89.
- Kumar, A.K., Sharma, S. (2017). Recent updates on different methods of pretreatment of lignocellulosic feedstocks: a review. *Bioresour. Bioprocess.* 4, 7.
- Lara L.L., Artaxo P., Martinelli L.A., Camargo P.B., Victoria R.L., Ferraz E.S.B. (2005). Properties of aerosols from sugar-cane burning emissions in Southeastern Brazil. *Atmospheric Environment* (pp. 4627-4637). Vol. 39.
- Mugica V., Ortiz E., Molina L., De Vizcaya A., Nebot A., R. Quintana, Aguilar J., Alcántara E. (2009). PM Composition and Source Reconciliation in Mexico City. *Atmospheric Environment*. (pp. 5068-5074). Vol. 43. Issue 32.
- OMS. [2004]. Contaminación del aire de interiores y salud. *Nota Descriptiva N°292*.
- PNUMA (2005). Emisiones de dioxinas y furanos por quema incontrolada de biomasa. *Programa Interinstitucional para El Manejo Adecuado de Los Productos Químicos [IOMC]*. New York: PNUMA.
- Robertson F.A., Thorburn, P. (2007). Decomposition of sugarcane residue in different climatic zones. *Soil Research* (pp. 1-11). Vol. 45. Issue 1.
- SAGARPA (2012). Importancia de la agroindustria de la caña de azúcar. México: SAGARPA.
- Sahu, L.K., Kondo, Y., Moteki, N., Takegawa, N., Zhao, Y., Cubison, M.J., Knapp, D.J. (2012). Emission characteristics of black carbon in

- anthropogenic and biomass burning plumes over California during ARCTAS-CARB 2008. *Journal of Geophysical Research* (pp. 1-20). Vol. 117.
- Seinfeld J.H., Pandis S.N. (2006). *Atmospheric Chemistry and Physics From Air Pollution to Climate Change*. London: John Wiley y Sons.
- Subirós R.F. (1995). *El cultivo de la caña de azúcar*. San José, Costa Rica: Universidad Estatal a Distancia.
- UNEP, WMO (2011). *Integrated Assessment of Black Carbon and Tropospheric Ozone Summary for Decision Makers*. Paris: UNEP, WHO.
- Yokelson R.J., Christian T.J., Karl T.G., Guenther A. (2008). The tropical forest and fire emissions experiment: laboratory fire measurements and synthesis of campaign data. *Atmospheric Chemistry and Physics* (pp. 3509-3527). Vol. 8.
- ZAFRANET (2012). *Información corporativa*. México: ZAFRANET.

SECCIÓN III

COMPROMISOS AMBIENTALES
ACTUALES

CAPÍTULO 8

La gestión del agua en la Ciudad de México ante el cambio climático

Fabiola S. Sosa-Rodríguez⁴¹

Jorge G. Vázquez-Arenas¹

INTRODUCCIÓN

Nuestro tiempo se caracteriza por permanentes y sistemáticos cambios; quizás la incertidumbre que vivimos hoy en día sea mayor en comparación con otras épocas en la historia humana. Con los avances en la ciencia y la tecnología, la velocidad de los cambios que enfrenta la humanidad ha aumentado, y junto con ello, la dificultad para predecir los impactos que las acciones humanas causarán sobre el medio ambiente, la población y sus ciudades.

Las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), resultado del desarrollo económico y la expansión urbana a lo largo del siglo XX, han provocado que los parámetros climáticos varíen en todos los rincones del mundo. No se sabe con certeza la velocidad ni la intensidad de estos cambios o sus impactos, lo cual incrementa la exposición de los grupos más vulnerables y los sectores económicos con menores capacidades de adaptación.

⁴¹ Profesora-Investigadora del Área de Crecimiento y Medio Ambiente, Departamento de Economía, Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco. Correo de contacto fssosa@gmail.com

¹ Profesor-Investigador del Centro Mexicano para la Producción más Limpia (CMPL), Instituto Politécnico Nacional (IPN).

El periodo de 30 años, que abarca de 1983 a 2012, es probablemente el periodo de tiempo más cálida de los últimos 1400 años en el hemisferio norte (IPCC, 2014b), mientras que se proyecta que la temperatura media mundial aumentará entre 2.6 y 4.8°C para el año 2100 si las emisiones de GEI se mantienen al ritmo actual (considerando el escenario de emisiones más altas del IPCC) (CDKN y ODI, 2014). Sin embargo, aunque las emisiones se estabilicen, la temperatura global podría aumentar en 0.9°C para el año 2100, trayendo consigo severas consecuencias negativas en todo el mundo (IPCC, 2007).

Debido a que las variaciones en los parámetros climáticos pueden tener impactos negativos sobre la escasez del agua, el deterioro de su calidad y su desigual distribución es indispensable desarrollar nuevas formas de gestión que tomen en cuenta los efectos del cambio climático sobre los recursos hídricos y el suministro de agua a la población. Dicha gestión, al tener en cuenta la incertidumbre y planear diversos cursos de acción bajo diferentes escenarios (climáticos, demográficos, económicos y políticos), podrá consolidar las capacidades de adaptación, reducir la vulnerabilidad de la población, así como promover un manejo sustentable de los recursos hídricos.

México es susceptible de ser afectado por el aumento de las temperaturas y las variaciones en la precipitación. Los impactos de estos cambios se espera que se distribuyan de manera desigual tanto territorial como socialmente, debido a diferencias en la ubicación geográfica, presión demográfica, especialización económica, niveles de pobreza y dependencia de los recursos naturales (Sosa-Rodríguez, 2013a; Margrin *et al.*, 2007; IPCC, 2007).

Dada la complejidad actual y la creciente incertidumbre sobre el futuro de la disponibilidad y calidad de las fuentes de agua en México, es vital que la política del agua incluya medidas de adaptación —estructurales y no-estructurales— que permitan tanto a las autoridades como a la población hacer frente a las variaciones esperadas en este recurso (Sosa-Rodríguez, 2013c). El PECC (Programa Especial

de Cambio Climático, 2014-2018) identificó a la Ciudad de México como la configuración regional que será más afectada por los mayores impactos del cambio climático a nivel nacional, debido básicamente a su mayor concentración demográfica y urbana y a sus problemas ambientales y urbanos preexistentes. Cabe destacar, que la ciudad ha estado expuesta a los riesgos climáticos desde su fundación en tiempos precolombinos y fue destruida en varias ocasiones por catastróficas inundaciones y sequías prolongadas (Sosa-Rodríguez, 2010a).

Como resultado del cambio climático, la ciudad podría enfrentar serios desafíos para abastecer con agua suficiente y segura a sus habitantes. Evidentemente, estos desafíos no solo se atribuyen a los impactos que las variaciones climáticas pudieran tener en materia de suministro, calidad del agua, disposición y tratamiento; también incluyen el crecimiento urbano desordenado, la elevada concentración demográfica y urbana, los cambios de uso de suelo, los patrones de consumo de agua dispendiosos y la falta de tratamiento de las aguas residuales, entre otros.

Existe evidencia que las temperaturas medias, máximas y mínimas en la ciudad han aumentado en las últimas décadas. Los cambios más importantes se han registrado en las temperaturas máximas, que han aumentado hasta en 5.0°C desde la década de 1950. De manera similar, las temperaturas mínimas han aumentado en el mismo período en hasta 3.0°C y la temperatura media en 1.5°C (Sosa-Rodríguez, 2013b).

De acuerdo con los resultados de los Modelos de Circulación General (GCMs), se proyecta que la temperatura media anual en la Ciudad de México aumentará hasta en 2.8°C para las décadas de los 2070s. Cabe mencionar, que la temperatura media podría aumentar en los años más calurosos en más de 2°C entre los 2020s y los 2070s y para fines de siglo en hasta 4.2°C—valor que supera los 2°C de aumento definidos como límite para que el calentamiento global sea irreversible (Sosa-Rodríguez 2013b). En términos de la precipitación anual, ésta se proyecta que disminuirá en promedio en hasta 10.4% para las décadas

de los 2070s; aunque los modelos IPSL-CM4 SRA1B y SRA2⁴² proyectan una disminución de hasta un 50% de la precipitación total.

Bajo este contexto, este capítulo tiene como fin describir cómo las variaciones climáticas afectarán la calidad y cantidad del agua que recibe la población, qué impactos enfrentara este sector, qué medidas de adaptación se han implementado para reducir la vulnerabilidad de la ciudad a problemas relacionados con el agua y cuáles se requieren llevar a cabo. Este análisis forma parte de una investigación en curso, por ende, los resultados que se pudieran generar de esta primera fase serán un insumo para determinar qué grupos y zonas de la Ciudad de México son los más vulnerables a estas variaciones, además de apoyar la construcción de un modelo de toma de decisiones que guíe la gestión y la política del agua.

VULNERABILIDAD DE LA CIUDAD DE MÉXICO A LOS IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO

Con base en el IPCC (2007, 2014a), la vulnerabilidad se refiere al grado de susceptibilidad y a las limitaciones que enfrenta un sistema para hacer frente a los efectos de la variación del clima. En el caso de la Ciudad de México, su vulnerabilidad se ha visto agravada por la urbanización no planificada, el rápido crecimiento poblacional y los cambios de uso del suelo. Por lo tanto, las variaciones climáticas son presiones adicionales a los riesgos existentes, los cuales no se distribuyen de manera uniforme entre los grupos sociales, unidades espaciales o con el tiempo. Los factores que aumentan la vulnerabilidad de la ciudad al cambio climático se describen a continuación.

42 IPSL-CM4 es un modelo climático global, propuesto por el Institut Pierre Simon Laplace, que combina cuatro componentes del sistema terrestre y que se calcula con dos (de tres posibles) escenarios, el SRA1B y SRA2 (Institut Pierre Simon Laplace, 1995).

a. Concentración demográfica y económica

En la actualidad, 8.8 millones de personas viven en la Ciudad de México, produciéndose en esta entidad casi 20% del PIB del país (INEGI, 2010). La concentración de la población y las actividades económicas se ha traducido en elevadas demandas de vivienda, suelo y servicios básicos (incluidos el suministro de agua y el saneamiento). Al igual que en muchos países en desarrollo en todo el mundo (por ejemplo, Egipto, Brasil, Corea e India), la urbanización acelerada y la industrialización han cambiado el balance de energía de la ciudad. La temperatura en la región ha aumentado en casi 4°C desde la década de 1920 y en cerca de 2°C desde mediados de los años setenta (SMA, 2008a). Esta tendencia se explica tanto por el efecto de la isla de calor como por el cambio climático. El efecto de la isla de calor se explica por las emisiones antropogénicas directas y los cambios en la morfología de la superficie de la ciudad; eventos que han modificado el flujo de aire de la ciudad, la velocidad del viento, la radiación y la refracción.

Las temperaturas más cálidas y las precipitaciones más intensas sugieren que el clima local está cambiando, por ende, los impactos del cambio climático probablemente intensificarán los riesgos ya existentes (Sosa-Rodríguez, 2013b).

El aumento de las temperaturas máximas puede afectar a toda la población de la ciudad, debido a que la mayoría de los hogares no cuentan con sistemas de aire acondicionado. Los ancianos son particularmente vulnerables a riesgos a la salud asociados a la insolación y deshidratación. Se supone que este grupo seguirá creciendo en las próximas décadas, incrementándose el número de personas vulnerables.

Los pobres también podrían ser dañados por los cambios de temperatura, ya que sus casas están generalmente construidas con materiales que no puedan soportar condiciones climáticas extremas. Además, las zonas verdes existentes (que sirven como sumideros de carbono) ya enfrentan una mayor presión como resultado de la urbanización irre-

gular y las prácticas agrícolas extensivas. La rápida pérdida de zonas verdes en la Ciudad de México es un problema grave que promoverá cambios climáticos más radicales y efectos negativos sobre la biodiversidad. La concentración demográfica y económica en la capital del país ha ido acompañada de una creciente demanda de vehículos automotores, que representan uno de los factores generadores de los GEI. Este elevado número de vehículos (4.8 millones), generan el 44% de las emisiones de gases de efecto invernadero en la Ciudad de México, lo que ha contribuido al efecto de la isla de calor.

Los vehículos son la principal fuente de contaminación del aire, dado que 52% de la flota vehicular está constituida por modelos anteriores a 1990, mientras que el 48% restante corresponde a modelos de 1991 a nuestros días. Hasta el momento, el uso de vehículos privados (que representan 72% de la flota total de vehículos en la ciudad) se ha visto favorecido por un transporte público deficiente e incómodo. En 2020, se espera que el número de vehículos aumentara hasta 4 millones, y con ello, también se incrementaran los GEI (Sosa-Rodríguez, 2013b).

b. Inundaciones

Las características hidrogeológicas de la Ciudad de México como una cuenca natural cerrada, donde alguna una vez hubo seis lagos interconectados, la hacen muy vulnerable a ser afectada por inundaciones. Antes de la construcción del sistema de drenaje profundo de la segunda mitad del siglo XX, la ciudad fue destruida en varias ocasiones por las inundaciones catastróficas (Sosa-Rodríguez, 2010b). Esta vulnerabilidad se ha agravado por la urbanización no planificada y el crecimiento de los asentamientos irregulares. Precipitaciones más intensas pueden aumentar la exposición de la ciudad, a la lluvia y las inundaciones de aguas residuales. Las inundaciones no sólo afectarán las zonas urbanas y rurales, sino también las carreteras y el transporte de bienes y personas.

Hasta la fecha, la Secretaría de Gobernación (Segob) ha identificado 376 sitios en riesgo. De acuerdo con el programa “Unidad Tormen-ta”, más de 3 millones de habitantes de la ciudad (un tercio de la población total) y más de 200 carreteras se verán afectadas regularmente por fuertes lluvias (SPCDF, 2010).

c. Escasez de agua y dependencia a fuente externas

La reducción de la precipitación aumentará la dependencia de la ciudad a fuentes externas de agua cada vez más lejanas. Hoy en día, la Ciudad de México recibe un volumen de 31.7 m³/segundo, siendo la fuente principal de abastecimiento el acuífero Valle de México que proporciona 43.5% de la oferta total. La segunda fuente de agua más importante son el Sistema Lerma y el Cutzamala, que juntos suministran 42.9% del volumen total. El agua de estas fuentes debe ser transportada por al menos 127 kilómetros y bombearse a casi 1,100 m de altura (Sosa-Rodríguez, 2010b). De hecho, en 2011, la escasez de agua de la ciudad fue de 132.6%, lo que evidencia que la ciudad no puede abastecer a sus habitantes mediante el uso de sus propios recursos (Conagua, 2011).

La sobreexplotación del acuífero ha acelerado el hundimiento del suelo de la ciudad en hasta 10 cm/año. Este problema ha causado que las tuberías que transportan el agua potable y las aguas residuales se disloquen o se rompan, favoreciendo la ocurrencia de inundaciones además de aumentar el riesgo de contaminación del acuífero por infiltración (Sosa-Rodríguez, 2010b). El cambio climático ha reducido la disponibilidad natural de agua, por lo que, sequías más prolongadas y más intensas son más probables de ocurrir.

Evidentemente, la prestación de estos servicios no se circunscribe a la Ciudad de México, sino que trascienden sus límites político-administrativos más allá de su Zona Metropolitana y de la Cuenca de México, no sólo por la existencia de una infraestructura hidráulica

compartida entre varias entidades, sino también por la ubicación tanto de las fuentes externas de donde se obtiene el agua para abastecer a los habitantes de la capital como de los cuerpos de agua utilizados para extraer y disponer sus aguas residuales.

Asimismo, la gestión del agua en la ciudad se sujeta a las disposiciones y acuerdos definidos por diversas dependencias, como el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACM), el Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México (OCVM), el Consejo de Cuenca Valle de México (CCVM), la Comisión de Agua y Drenaje del Área Metropolitana (CADAM) y el Fideicomiso 1928, ya que junto con otras demarcaciones forma parte de la Cuenca de México, del Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México y Sistema Cutzamala (Región XIII), y de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM).

LOS RECURSOS HÍDRICOS Y EL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CIUDAD DE MÉXICO

En México, el agua es un recurso estratégico para el desarrollo de las ciudades, por ende, las variaciones en su disponibilidad y calidad tienen grandes impactos negativos sobre la salud y bienestar de la población, así como sobre la productividad y realización de las diversas actividades económicas. Aunado a ello, México es considerado como un país con una baja disponibilidad natural de agua y actualmente carece de un acceso sustentable a este recurso que permita garantizar un consumo humano seguro—tanto en cantidad como en calidad. Mientras que la zona norte y centro del país se pronostica enfrentará un drástico periodo de escasez; el sur y sureste podrían verse afectados por su exceso, todo ello consecuencia del cambio climático (SEMARNAT, 2009).

En las zonas en donde la disponibilidad del agua se reduzca, la competencia entre sus usuarios por garantizar su acceso podría incremen-

tarse. De manera contraria, las zonas en donde la disponibilidad del agua aumente, podrían estar expuestas a inundaciones y a brotes epidémicos de enfermedades de origen hídrico. Pero la problemática de la escasez y/o abundancia del agua en las distintas regiones del país no es sólo resultado de las extremas alteraciones climatológicas que han impactado de manera negativa el ciclo hidrológico, sino también de las erradas decisiones que en materia de gestión se han implementado (Sosa-Rodríguez, 2010b, 2013a, 2013b).

Aunque el cambio climático puede afectar directamente el ciclo del agua y modificar la cantidad y calidad de los recursos hídricos, al igual que la frecuencia e intensidad de los eventos hidrometeorológicos extremos (IPCC, 2007; Charron *et al.*, 2004; Atherholt *et al.*, 1998); este fenómeno también puede tener impactos indirectos que se ven retroalimentados por las fallas en la gestión del agua. La conjunción del cambio climático con una pobre gestión del agua podría: 1) poner en riesgo la infraestructura, los asentamientos humanos y los ecosistemas ante la ocurrencia de inundaciones y eventos hidrometeorológicos extremos; 2) restringir la producción de alimentos e incrementar los riesgos de malnutrición; 3) intensificar las olas de calor y los brotes de enfermedades de origen hídrico; y 4) promover la migración masiva tanto de personas y especies animales en búsqueda de agua y alimentos (Sosa-Rodríguez, 2013c; WWAP, 2009; IPCC, 2007; Nielson *et al.*, 2005; Parmesan & Yohe, 2003).

Los mecanismos hasta el momento utilizados para hacer frente a las variaciones regulares en la cantidad y calidad del agua pueden ya no ser eficaces ante la creciente incertidumbre climática, de ahí la necesidad de analizar las interrelaciones entre la gestión del agua y el cambio climático, con el fin de desarrollar nuevas formas de gestión que tomen en cuenta la incertidumbre en los parámetros climáticos y que permita consolidar mejores capacidades de adaptación para reducir la vulnerabilidad de la población y promover un manejo sustentable de los recursos hídricos.

Bajo este contexto, la Ciudad de México enfrentará serios desafíos para proveer con agua suficiente y segura a sus habitantes. Evidentemente, estos desafíos no se reducen a los impactos que las variaciones climáticas pudieran tener en materia de suministro, calidad del agua, y disposición y tratamiento de las aguas residuales; también incluyen el crecimiento urbano desordenado, la elevada concentración demográfica y urbana, y los cambios de uso de suelo.

a. Proyecciones climáticas

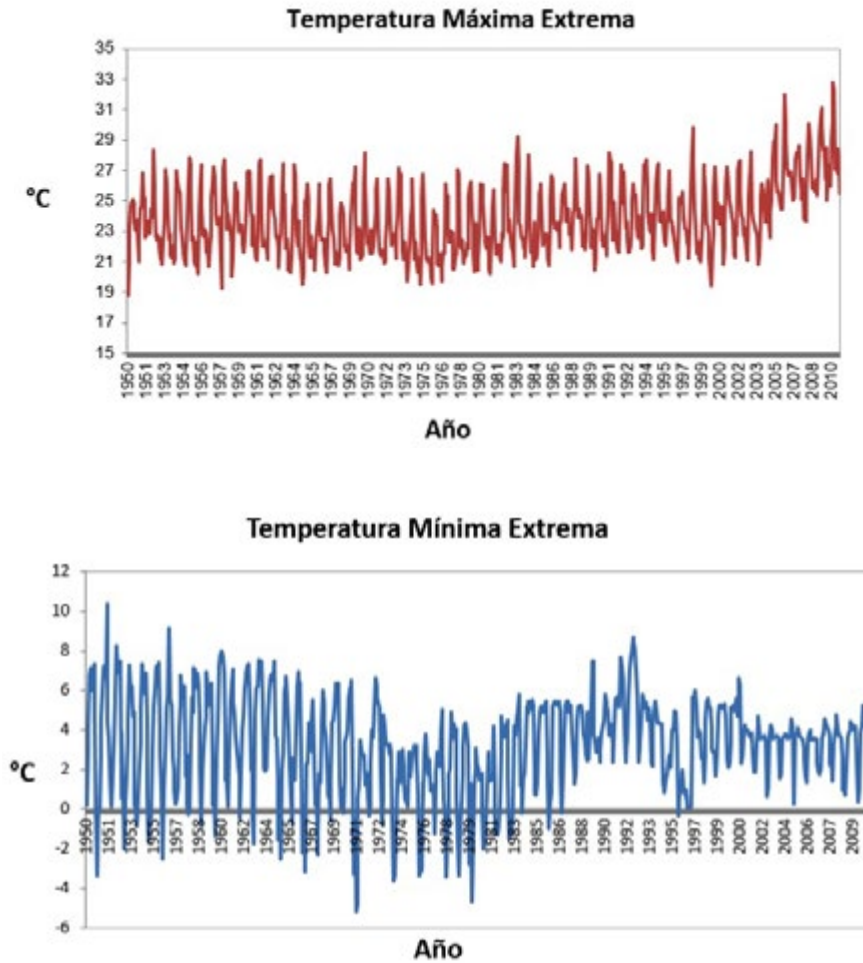
Por lo pronto, existen evidencias que las temperaturas medias, máximas y mínimas en la ciudad han aumentado en las últimas décadas. La temperatura media mensual de la Ciudad de México ha variado desde 1950 hasta nuestros días entre 10.0 y 20.6°C, con un valor máximo de 33.5°C durante la primavera y un valor mínimo de 1°C en el invierno de 1950 a nuestros días. Los años más cálidos ocurrieron en 2005 y 2006, con temperaturas máximas superiores a 30°C. En general, las temperaturas medias, máximas y mínimas han aumentado en las últimas décadas. Sin embargo, los cambios más importantes se han registrado en las temperaturas máximas extremas, las cuales han aumentado en aproximadamente 5.0°C desde la década de 1950. Las temperaturas mínimas extremas han aumentado en el mismo período en hasta 3.0°C, y la temperatura media en 1.5°C. En la actualidad, temperaturas por debajo de 0°C rara vez se registran y el número de días fríos se ha reducido (Figura 1).

Al igual que la temperatura, la precipitación es variable en la ciudad: la zona urbana (ubicada al centro) recibe una precipitación media de 500 mm, mientras que las áreas naturales protegidas de hasta 1,100 mm. Una atmósfera más cálida ha reducido la precipitación, pero aumentado el número de eventos de lluvia extrema en la última década (Figura 2). Por ejemplo, en 2004 hubo 107 días de lluvia superior a 10 mm y en 2006, 98 días (Conagua, 2011).

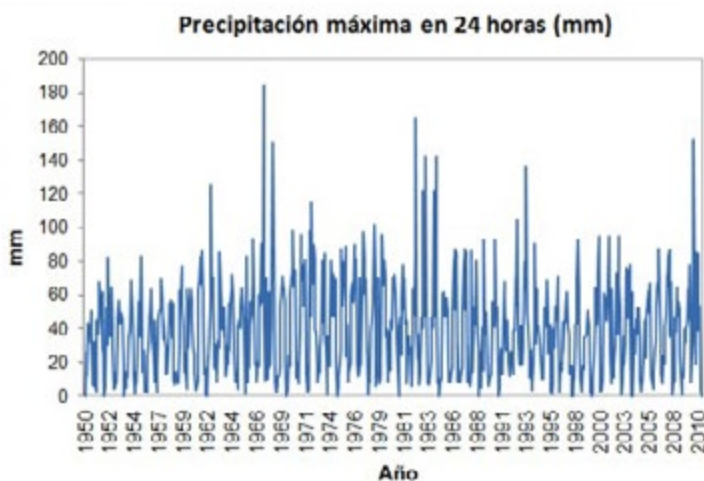
Sin embargo, la infraestructura de drenaje de la ciudad no fue construida para hacer frente a eventos extremos, por ende, tiene una capacidad limitada para evacuar el exceso de agua. Asimismo, las características hidrogeológicas de la ciudad, que es una cuenca naturalmente cerrada formada por seis lagos conectados entre sí que fueron desecados a lo largo de su historia, la hacen muy vulnerable a las inundaciones ante la ocurrencia de lluvias intensas (Sosa-Rodríguez, 2010a, 2010b).

La Figura 1 describe las variaciones en °C de las temperaturas máximas y mínimas extremas con base en los datos de 1950. Mientras que, la Figura 2 detalla la precipitación máxima registrada en 24 horas, a partir de 1950 a la actualidad.

Figura 1. Variaciones en las temperaturas máximas y mínimas extremas



Fuente: Servicio Meteorológico Nacional, Conagua, México.

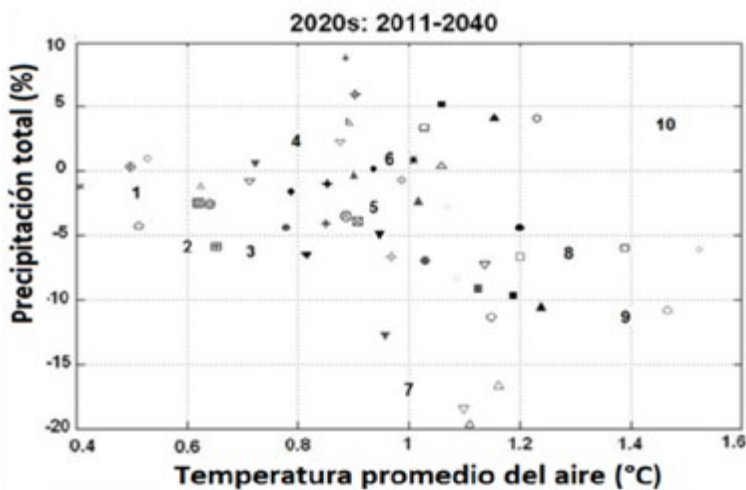
Figura 2. Precipitación máxima registrada en 24 horas

Fuente: Servicio Meteorológico Nacional, Conagua, México.

A partir de 67 Modelos de Circulación General (MCG) y tres escenarios de emisiones (SRES A2, A1B y B2), se seleccionaron trece MCG con el método Percentil (PM), con el fin de analizar las proyecciones en las variaciones en la temperatura media anual (en $^{\circ}$ C) y en la precipitación (en%) para las décadas 2020s, 2050s y 2070s (Figuras 3, 4 y 5). Con base en los resultados de estos modelos, se proyecta que la temperatura media anual podría incrementar en 0.9 $^{\circ}$ C en la década de los 2020s (Tabla 1), en 1.8 $^{\circ}$ C en la década de los 2050sm (Tabla 2), y en 2.8 $^{\circ}$ C en la década de los 2070s (Tabla 3); pasando de 16.5 a 19.3 $^{\circ}$ C en promedio en este periodo. De hecho, en los años más cálidos, entre los 2020s y 2050s, la temperatura podría aumentar en más de 2 $^{\circ}$ C y para finales de este siglo en hasta 4.2 $^{\circ}$ C, valor que supera los 2 $^{\circ}$ C de aumento definidos como límite para que el calentamiento global sea irreversible y catastrófico (Sosa-Rodríguez, 2013b).

Aunque se espera que las lluvias intensas también aumenten en el mismo período, es probable que la precipitación total disminuya en promedio en 5.8% para la década de los 2020s, en 7.0% en la década de los 2050s y en 10.4% en la década de los 2070s. Sin embargo, dos MCG (el IPSL-CM4 SRA1B y SRA2) proyectan que se podría presentar una disminución en la precipitación total en hasta 50%. Aunque este evento es muy poco probable que ocurra, si lo hace, no habrá suficiente agua para satisfacer las necesidades básicas de la población que reside en la capital del país y tampoco se podrán atender los requerimientos de las actividades económicas (Sosa-Rodríguez, 2013b).

Figura 3. Proyecciones climáticas para las décadas 2020s



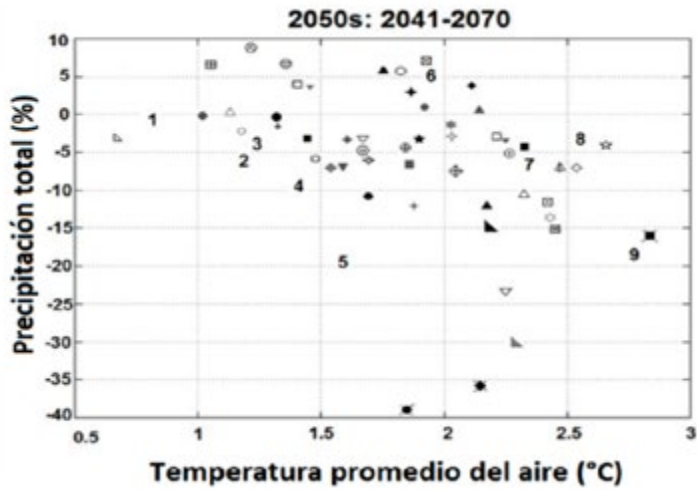
Fuente: Environment and Climate Change Canada, 2013.

Tabla 1. Modelos climáticos seleccionados en las décadas 2020s

ID	Centro	2020s MCG	Temperatura promedio del aire (°C)	Precipitación total (%)
1	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL), USA	GISS-AOM(M)-SR-B1	0.5090	-1.5432
2	Meteorological Research Institute (MRI) and Meteorological Agency, Japan	MRI-CGCM2.3.2a(M)-SR-B1	0.6026	-5.6877
3	<i>Center for Climate System Research, University of Tokyo, Japan</i>	FGOALS-g1.0(M)-SR-B1	0.7164	-6.1614
4	Commonwealth Scientific & Industrial Research Organization (CSIRO), Australia	CSIROMk3.0(R1)-SR-A2	0.8016	2.3760
5	Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM), France	CNRMCM3(R1)-SR-B1	0.9291	-2.6822
6	Hadley Centre for Climate Prediction and Research (HCCPR), UK	HADGEM1(R1)-SR-A2	0.9678	0.5686
7	Institut Pierre Simon Laplace (IPSL), France	IPSLCM4(R1)-SR-B1	0.9984	-16.9368
8	National Center for Atmospheric Research (NCAR), USA	NCARCCSM3(M)-SR-A1B	1.2927	-5.9638
9	National Institute for Environmental Studies, Japan	MIROC3.2 medres(M)-SR-A2	1.3964	-11.2315
10	National Institute for Environmental Studies, Japan	MIROC3.2 hires(R1)-SR-A1B	1.4451	4.7447
		Promedio	0.9659	-4.2517

Fuente: Environment and Climate Change Canada, 2013.

Figura 4. Proyecciones climáticas para las décadas 2050s



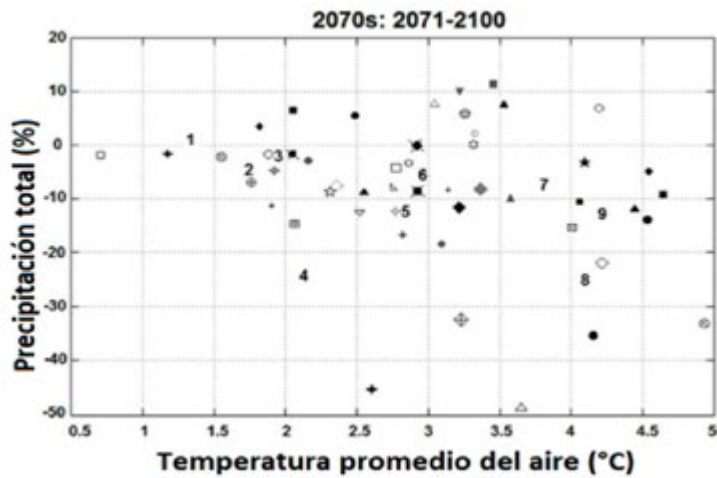
Fuente: Environment and Climate Change Canada, 2013.

Tabla 2. Modelos climáticos seleccionados en las décadas 2050s

ID	Centro	2050sMCG	Temperatura prom. del aire(°C)	Precipitación total (%)
1	Commonwealth Scientific & Industrial Research Org. (CSIRO), Australia	CSIROMk3.0(R1)-SR-B1	0.8179	-0.1660
2	Meteorological Research Institute (MRI) and Meteorological Agency, Japan	MRI CGCM2.3.2a(M)-SR-B1	1.1861	-5.8098
3	Bjerknes Centre for Climate (BCM), Norway	BCM2.0(R1)-SR-B1	1.2362	-4.5691
4	Center for Climate System Research, University of Tokyo, Japan	FGOALS-g1.0(M)-SR-B1	1.4169	-9.8576
5	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (CCCma), Canada	CGCM3T63(R1)-SR-B1	1.5763	-19.6242
6	Meteorological Institute of the University of Bonn & Meteorological Research Institute of KMA, Germany	ECHO-G(M)-SR-A2	1.9532	5.0576
7	Centre National de Recherches Meteorologiques (CNRM), France	CNRMCM3(R1)-SR-A1B	2.3402	-6.4529
8	Hadley Centre for Climate Prediction and Research (HCCPR), UK	HADCM3(R1)-SR-A2	2.5470	-3.6100
9	National Institute for Environmental Studies, Japan	MIROC3.2 medres(M)-SR-A2	2.7594	-18.3204
		Promedio	1.7592	-7.0392

Fuente: Environment and Climate Change Canada, 2013.

Figura 5. Proyecciones climáticas para las décadas 2070s



Fuente: Environment and Climate Change Canada, 2013.

Tabla 3. Modelos climáticos seleccionados en las décadas 2070s

ID	Centro	2070s MCG	Temperatura prom., del aire (°C)	Precipitación total (%)
1	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL), USA	GISS-AOM(M)-SR-B1	1.3514	0.5004
2	National Center for Atmospheric Research (NCAR), USA	NCARCCSM3(M)-SR-B1	1.7648	-6.6137
3	National Center for Atmospheric Research (NCAR), USA	NCARPCM(M)-SR-A2	1.9341	-1.0416
4	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (CCCma), Canada	CGCM3T63(R1)-SR-B1	2.1436	-24.2392
5	Meteorological Research Institute (MRI) and Meteorological Agency, Japan	MRI CGCM2.3.2a(M) - SR-A2	2.7743	-12.0397
6	Bjerknes Centre for Climate, Norway	BCM2.0(R1)-SR-A2	2.9791	-5.6598
7	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL), USA	GFDLCM2.1(R1)-SR-A2	3.7875	-7.2252
8	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (CCCma), Canada	CGCM3T47(M)-SR-A2	4.0807	-24.9554
9	Max Planck Institute für Meteorologie, Denmark	ECHAM5OM(M)-SR-A1B	4.1984	-12.2303
		Promedio	2.7793	-10.3894

Fuente: Environment and Climate Change Canada, 2013.

Dada la creciente demanda de agua, la reducción de su disponibilidad relativa y el deterioro en su calidad cada día es más complejo proporcionar a los capitalinos con un suministro de agua suficiente para atender sus requerimientos mínimos y que cumpla con los estándares de calidad; situación que pone en riesgo la viabilidad y el funcionamiento de la Ciudad de México, al igual que la salud y el bienestar tanto de la población como de su entorno. Los cambios previstos en la temperatura y las precipitaciones pueden aumentar la escasez de agua (e incluso provocar sequías), causando situaciones de emergencia como la que enfrentó la Ciudad de México en 2009. Durante este evento, se redujo la capacidad de las represas del Sistema Cutzamala a menos del 38.9% como consecuencia de una sequía; este sistema proporciona 28.7% del suministro total de agua a la ciudad. Las altas temperaturas afectarán en particular a los ancianos y niños menores de cinco años, que son más propensos a sufrir enfermedades gastrointestinales y deshidratación aguda. Las zonas pobres serán más vulnerables a estos aumentos, ya que el acceso al agua potable es a menudo limitado (Sosa-Rodríguez, 2012). Estas zonas se ubican al sur y este de la ciudad, las cuales han experimentado en reiteradas ocasiones la escasez y/o mala calidad del agua por décadas (Sosa-Rodríguez, 2010b).

Estos eventos incrementarán aún más la vulnerabilidad de las personas, sobre todo al sur y este de la ciudad, donde algunos habitantes ya tienen experiencia, ante la escasa o mala calidad del agua que durante décadas se ha manifestado. De hecho, algunas personas que viven en estas áreas consumen menos de 20 litros/día; cantidad que es insuficiente para satisfacer sus necesidades mínimas (Sosa-Rodríguez, 2012). Debido a que algunas de las tendencias mencionadas no se pueden revertir con rapidez para evitar los impactos esperados, es esencial para promover las medidas de adaptación. Más largas y más intensas sequías pueden aumentar la dependencia de la Ciudad de México en fuentes externas, ya que, por razones de seguridad, el volumen de agua extraída del acuífero Valle de México se debe reducir para frenar el

hundimiento diferencial de la ciudad. Hasta la fecha, esta fuente de agua proporciona el 43.5% del volumen total suministrado a la ciudad. Sin embargo, la cantidad de agua extraída (507.36 hm³/año) casi duplica su capacidad de recarga natural (279.1 hm³/año) (SEMARNAT, 2000; Sosa-Rodríguez, 2010b). Dadas las evidencias que la temperatura y la precipitación en la Ciudad de México están cambiando, el gobierno de la ciudad ha puesto en marcha diversas acciones en materia de Mitigación y Adaptación (M&A) desde finales de los años noventa. Las respuestas implementadas en la capital del país para hacer frente a este fenómeno se analizarán en la siguiente sección.

RESPUESTAS EN EL SECTOR AGUA PARA HACER FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO

Las autoridades de la Ciudad de México han implementado diversas acciones para responder al cambio climático, las cuales han estado orientadas principalmente a la mitigación. Un esfuerzo inicial fue la aprobación de la Estrategia Local de Acción Climática (ELAC) en 2004, que establece las directrices a cumplir para reducir los efectos de la M&A. Asimismo, la Ciudad de México fue el primer gobierno local en América Latina que puso en práctica un Programa de Acción Climática Local (PACL) en 2008, compuesto por 26 estrategias de mitigación para reducir las emisiones en 7 MtCO₂e entre 2008 y 2012, así como 12 estrategias de adaptación cuyo objetivo es identificar los peligros hidrometeorológicos y el desarrollo de mecanismos de respuesta. Este programa también integra las estrategias del Programa General de Desarrollo (2006-2012) y del Plan Verde (2006-2012) que pueden apoyar la M&A en la ciudad.

El agua forma parte de las cinco áreas prioritarias con objetivos cuantitativos específicos para la reducción de las emisiones. Ejemplos de las estrategias de mitigación ejecutadas en el sector agua en la Ciudad de México incluyen el desarrollo de tecnologías limpias, el tratamiento de las aguas residuales, y la reducción del consumo de este recurso para disminuir los requerimientos de energía en materia de extracción, distribución y disposición. Con estas acciones, el sector agua reducirá 11.7% de los 4.4 MtCO₂e/año, definidos como el objetivo de emisiones de GEI a reducir (SMA, 2008a).

En el caso de las medidas de adaptación, éstas se centran en el fortalecimiento de los sistemas de alerta temprana y mecanismos de respuesta, así como la evaluación de la vulnerabilidad, de los diferentes sectores, al cambio climático para fortalecer sus capacidades de adaptación. Por ejemplo, los esfuerzos de adaptación a corto plazo para mejorar los sistemas de alerta temprana incluyen la vigilancia de los eventos hidrometeorológicos, de brotes epidemiológicos asociados a variaciones climáticas y para la predicción del clima. El PACL fomenta la comunicación y educación sobre el cambio climático como una de sus acciones más importantes para influir en el comportamiento, los hábitos y actitudes de los habitantes para promover la M&A, promoviendo en el caso particular del agua, una cultura para el ahorro y conservación de este recurso. La Tabla 4 sintetiza las respuestas de mitigación y adaptación implementadas en la Ciudad de México en el sector agua.

Algunas de las estrategias de adaptación promovidas por el PECC para su ejecución a nivel nacional todavía no son parte de las medidas de adaptación en la ciudad, a pesar de su relevancia para consolidar las capacidades de adaptación de la ciudad en materia de agua; entre estas acciones destacan:

- 1) incorporar información sobre el clima en la gestión del agua; incorporar información sobre el clima en la gestión del agua;

- 2) promover el uso de seguros contra eventos hidrometeorológicos extremos e inundaciones;
- 3) establecer multas y/o sanciones para los contaminadores de las aguas superficiales y subterráneas;
- 4) recuperar cuerpos de agua contaminados;
- 5) modificar los códigos de construcción para evitar que los desarrollos inmobiliarios y los asentamientos irregulares no sean permitidos ni regularizados en zonas de recarga de acuíferos;
- 6) mejorar los sistemas de alerta temprana para el diagnóstico de la sequía; y
- 7) modificar los hábitos de consumo de agua de las personas.

Hasta el momento, los avances en materia de mitigación y adaptación han sido positivos en la Ciudad de México, con una reducción de las emisiones totales de GEI entre 2000 y 2008 de 3.76 MtCO₂e (Sosa-Rodríguez, 2013b). Esto se explica por un consumo más eficiente de la energía en todos los sectores, el uso de fuentes de energía menos contaminantes y la introducción de sistemas de transporte más limpios y de alta capacidad (e.g., el Metro, Metrobus y Ecobus). Otros avances incluyen la mejora de los sistemas de bombeo para el suministro de agua, la rehabilitación de la red de agua de la ciudad para reducir las pérdidas de agua, la instalación de dispositivos ahorradoras de agua y energía en las viviendas y edificios. Se espera que la infraestructura en curso para mejorar el sistema de transporte público, la captura de biogas, la producción de composta y el tratamiento de aguas residuales reduzca las emisiones de GEI en al menos 7 MtCO₂e, cumpliéndose con los objetivos planteados en el PACL.

Tabla 4. Respuestas gubernamentales para la M&A en la Ciudad de México

Estrategias implementadas	Estrategias en progreso
• Construir infraestructura para la prevención de deslizamientos • Ajustar los precios del agua para promover un consumo racional • Instalar dispositivos ahorradores de agua para un uso eficiente • Construir infraestructura para reducir el consumo de energía durante el bombeo, transporte y distribución del agua • Recuperar ríos y canales de agua • Mejorar la predicción de eventos hidrometeorológicos, así como los sistemas de alerta temprana • Modificar los códigos de construcción para incrementar la captura del agua de lluvia y su reutilización en tanques de aguas grises • Implementar programas de prevención y respuesta ante emergencias • Reducir las emisiones de los sistemas sépticos y plantas de tratamiento de aguas residuales	• Garantizar el balance entre las tasas de extracción y recarga del acuífero • Conservar el suelo en zonas de recarga del acuífero para incrementar la infiltración del agua de lluvia en hasta 2.5 m³/segundo • Medir el consumo de agua en toda la ciudad con la instalación de medidores • Ampliar las redes de pozos y la rehabilitación de 892 km de tuberías para reducir las pérdidas de agua • Aumentar la reutilización de las aguas residuales y su tratamiento en hasta 7.2 m³/segundos con la construcción de una planta de tratamiento que tratará 60% del total de las aguas residuales generadas • Tratar 125 litros/segundo de aguas residuales para la recarga del acuífero • Construir el Sistema de Drenaje Emisor Oriente y los colectores Río Magdalena y Eslava • Elaborar un Atlas de Riesgos Hidrometeorológicos y Climáticos

Fuente: SMA, 2008a, 2008b, 2008c, 2009a, 2009b y 2012.

Los avances en materia de adaptación incluyen la creación del Programa de Contingencia Climatológica para ayudar a los agricultores en situaciones de eventos climáticos extremos; el Programa de Protección del Maíz Nativo; el Programa de Recuperación de Suelos Rurales, y el Programa de Prevención de Incendios Forestales, todos ellos implementados en 2008. Ya que los grupos marginados se ven obligados a ubicarse en zonas de alto riesgo que a menudo carecen de acceso a los servicios básicos que los hacen más vulnerables a los riesgos climáticos, una estrategia esencial para hacer frente al cambio climático es la reducción de la pobreza. Lamentablemente, los aumentos de temperatura, inundaciones, sequías y brotes de enfermedades afectarán principalmente a estos grupos.

CONCLUSIONES

En la actualidad, uno de los principales desafíos que enfrenta la Ciudad de México es el cambio climático. La ciudad ha estado expuesta a los riesgos climáticos desde su fundación en la época precolombina, siendo destruida varias veces por inundaciones catastróficas o largas sequías, por ende, las variaciones climáticas proyectadas representan una presión adicional a los problemas urbanos, sociales y ambientales preexistentes en esta entidad.

Se proyectan aumentos en la temperatura y reducciones en la precipitación que podrían provocar situaciones de emergencia en la capital del país ante lluvias intensas o sequías. Estos eventos afectarán principalmente a los habitantes que residen al sur y este de la ciudad; estos grupos han enfrentado de manera crónica problemas de escasez o mala calidad a lo largo de varias décadas, teniendo que encontrar formas alternativas de acceso al agua que no necesariamente cumplen con los estándares de calidad para garantizar un consumo seguro y que además suelen ser más costosas. Adicionalmente, más largas e intensas

sequías pueden intensificar o generar más conflictos entre los usuarios de este recurso por garantizar su uso.

Existen importantes avances en materia de M&A en el sector agua entre los que destacan las acciones emprendidas para promover las mejoras en los sistemas de bombeo, distribución y disposición del agua en la ciudad, así como los sistemas de alerta temprana. Otras acciones que complementan estos esfuerzos son las reducciones en el consumo de agua y la mejora en la gestión de las aguas residuales. La mitigación es una prioridad para todos los niveles de gobierno, pero dada la falta de recursos financieros y humanos para el desarrollo de tecnologías que reduzcan las emisiones de GEI y debido a la irreversibilidad de algunos de los impactos del cambio climático, la adaptación está recibiendo una mayor atención. Desafortunadamente, los impactos del cambio climático afectarán principalmente a los grupos más marginados. La participación activa e informada de la sociedad debe ser promovida para crear y fortalecer las capacidades de M&A en la ciudad, teniendo en cuenta el lenguaje, la forma y los medios más eficaces para informar tanto a los tomadores de decisiones como a la sociedad sobre los impactos del cambio climático, sus niveles de vulnerabilidad y las acciones que se pueden implementar para hacer frente a este fenómeno.

Los principales obstáculos que han limitado el éxito de la M&A en la Ciudad de México destacan: (1) la falta de participación y concientización de la sociedad sobre el cambio climático; (2) el desconocimiento sobre las causas y consecuencias de este fenómeno, así como de las medidas que pueden reducir sus impactos y la generación de GEI; (3) los malentendidos acerca de los objetivos, procesos y resultados de estas acciones entre las agencias gubernamentales; y (4) la falta de coordinación y colaboración entre diversos sectores (e.g., gubernamentales, económicos, sociales y académicos).

BIBLIOGRAFÍA

- Atherholt T.B., Le Chevallier M.W., Norton W.D., Rosen, J. (1998). Effects of rainfall on giardia and cryptosporidium. *Journal of the American Waterworks Association*, 90(1998), 66–80.
- Charron, D.F., Thomas, M.K., Waltner-Toews, D., Aramini J.J., Edge, T., Kent R.A., Maarouf A.R., Wilson J. (2004). Vulnerability of waterborne diseases to climate change in Canada: a review. *Journal of Toxicology and Environmental Health* (pp. 1667–1697). Vol. 67. Issue 2004.
- CDKN, ODI (2014). *El Quinto Reporte de Evaluación del IPCC ¿Qué implica para Latinoamérica?* Alianza Clima y Desarrollo y Overseas Development Institute. New York: Alianza Clima y Desarrollo y Overseas Development Institute.
- Conagua (2011). Variables climáticas 1921–2010. México: SMN, Conagua.
- Canadian Climate Change Scenarios Network (CCCSN). *Environment and Climate Change Canada*. Ottawa: CCCSN.
- INEGI (2010). *XIII Censo General de Población y Vivienda*. México: INEGI.
- Institut Pierre Simon Laplace (1995). IPSL Climate Modelling Centre (ICMC). Paris: IPSL.
- IPCC (2014a). *Cambio climático 2014. Impactos, adaptación y vulnerabilidad*. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Suiza: IPCC, University of Cambridge Press
- IPCC (2014b). *Cambio climático 2014. Informe de síntesis*. IPCC. Ginebra, Suiza: IPCC, University of Cambridge Press.
- IPCC (2007). Summary for Policymakers. In: S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor & H.L. Miller (Eds.). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis* (pp. 1–7). Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate

- Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY: Cambridge University Press.
- Magrin G., Gay García C., Cruz Choque D., Giménez J.C., Moreno A.R., Nagy G.J., Nobre C., Villamizar A. (2007). Latin America. En M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden, & C.E. Hanson (Ed.). *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 581-615). Cambridge: Cambridge University Press.
- Neilson R.P., Pitelka L.F., Solomon A.M., Nathan R., Midgley G.F., Fragoso H.J., Lischke M.V., Thompson K. (2005). Forecasting regional to global plant migration in response to climate change. *BioScience* (pp.749-759). Vol. 55. Issue 2005.
- Parmesan C., Yohe G. (2003). A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature* (pp. 37-42). Vol. 421. Issue 2003.
- SEMARNAT (2009). *Programa Especial de Cambio Climático 2008-2012 (PECC)*. México: CICC.
- Servicio Meteorológico Nacional (2016). *Información climática*. México: SMN, CONAGUA.
- SMA (2012). *Informe de Avances 2011. Programa de Acción Climática de la Ciudad de México 2008-2012*. México: SMA, GDF.
- (2009a). Avances reportados con respecto a las acciones del Programa de Acción Climática. México: SMA-GDF.
- (2009b). Avances en el Plan Verde de la Ciudad de México. México: SMA-GDF.
- (2008a). *Programa de Acción Climática de la Ciudad de México, 2008-2012*. México: SMA-GDF.
- (2008b). *Inventario de emisiones de contaminantes criterio de la ZMVM, 2008*. México: SMA-GDF.
- (2008c). *Inventario de emisiones de gases de efecto invernadero de la ZMVM, 2008*. México: SMA-GDF.

- Sosa-Rodríguez F.S. (2013a). El futuro de la disponibilidad del agua en México y las medidas de adaptación utilizadas en el contexto internacional. *Revista Internacional de Ciencias Sociales y Humanidades. SocioTam* (pp. 165-188). XXII. N.2 (Jul-Dic 2012).
- Sosa-Rodríguez F.S. (2013b). From Federal to City Mitigation and Adaptation: Climate Change Policy in Mexico City. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change Journal* (pp. 969-996). Springer Netherlands. Vol 19.
- Sosa-Rodríguez F.S. (2013c). La política del cambio climático en México: avances, obstáculos y retos. *Revista Internacional de Estadística y Geografía* (pp. 4-23). Vol. 6, Núm. 2, mayo-agosto de 2015.
- Sosa-Rodríguez F.S. (2012). Assessing water quality in the developing world: an index for Mexico City. En K. Voudouris & D. Voutsas (Comp.). *Water Quality Monitoring and Assessment* (pp. 495-508). Croacia: InTech.
- Sosa-Rodríguez F.S. (2010a). Impacts of Water-management Decisions on the Survival of a City: From Ancient Tenochtitlan to Modern Mexico City. *Water Resources Development* (pp. 675-687), 26 (2010).
- Sosa-Rodríguez F.S. (2010b). Exploring the risks of ineffective water supply and sewage disposal: A case study of Mexico City. *Environmental Hazards* (pp. 135-146), 9 (2010).
- SPCDF (2010). *Programa Unidad Tormenta*. México, SPCDF.
- WWAP (2009). *Water and Climate Change*. World Water Development Report 3: *Water in a Changing World*. Paris: UNESCO.

CAPÍTULO 9

Impactos del cambio climático en lagunas costeras mexicanas: evidencias, vulnerabilidad, adaptación y mitigación

Ofelia Castañeda López⁴³

Alfonso Vázquez Botello⁴⁴

Raquel Segura Aguilar⁴⁵

INTRODUCCIÓN

El cambio climático es el principal problema ambiental de nuestros tiempos y el mayor desafío que enfrenta la humanidad, no solo por la evidencia científica de ello, sino porque se ha visto y vivido como el clima está cambiando. El calentamiento global y el cambio climático son conceptos estrechamente interrelacionados que en ocasiones son confundidos o utilizados como sinónimos. Son fenómenos provocados total o parcialmente por el aumento en la concentración de gases de invernadero en la atmósfera, principalmente CO₂ relacionado directa o indirectamente con actividades humanas como el uso de combustibles fósiles y deforestación. Estudios científicos indican que el cambio climático ya está teniendo efectos sobre la biósfera (González *et al.*, 2003).

Los sucesos de grandes magnitudes son: modificación de los patrones climáticos a escala global debido al aumento de la temperatura de los océanos; cambios en cantidades e intensidades de precipitación; aumento en la frecuencia y severidad de eventos extremos e; incremento en el nivel medio del mar (Hernández, 2007). Los cambios del clima afectarán a los sistemas costeros debido al aumento del nivel del

43 Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa.

44 Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM.

45 Consultora en Desarrollo Sustentable y Manejo de Recursos Naturales.

mar, a un mayor riesgo de mareas de tempestades y aun posible cambio en la frecuencia y/o intensidad de los fenómenos meteorológicos. Es así que, los efectos del cambio climático se verán reflejados en que tan vulnerables pueden ser los ecosistemas a dicho cambio y por otro lado a su poder de adaptación ante dichos cambios.

En el V Informe de Evaluación del Panel Internacional sobre el Cambio Climático (IPPC), se hace hincapié en la evaluación de los aspectos socioeconómicos del cambio climático y sus consecuencias para el desarrollo sostenible, los aspectos regionales, la gestión de riesgos y la elaboración de una respuesta mediante la adaptación y la mitigación (IPCC, 2013). Se debe de entender que este fenómeno es debido a múltiples interacciones: procesos naturales, sociales, políticos y económicos, no solo a escalas locales o regionales, sino más bien a escala global y cuyos impactos en los ecosistemas, las economías y las sociedades están siendo afectadas, tanto en el continente, los océanos y la zona costera.

El cúmulo de acciones ante el cambio climático es un desafío a largo plazo, pero requiere acción urgente debido al ritmo y escala de la acumulación de los gases de invernadero en la atmósfera y a los riesgos de que la temperatura aumente en más de dos grados Celsius. Hoy debemos centrarnos en los elementos fundamentales y en las acciones, de lo contrario, los riesgos que corremos irán en aumento año con año (IPCC, 2013).

No cabe duda, las señales de cambio climático son inequívocas: sube la temperatura promedio mundial, desciende el volumen global de hielo y aumenta el nivel del mar. Esto afecta a todo el planeta, pero en especial, a algunos de sus ecosistemas más sensibles, como es el caso de las zonas costeras, caracterizadas por su amplia diversidad de ambientes y recursos; cuando existe un balance en las interacciones se originan ecosistemas con características ambientales únicas, regidos, a su vez, por procesos físicos, químicos y biológicos dinámicos (Maltby *et al.*, 1992; Mitsch y Gosselink, 2000; Dugan, 2005).

México posee 11,122 km de litoral continental y 5,127 km² de superficie insular. Destaca que nuestro país cuenta con cerca de

3'149,920 km² de zona económica exclusiva y 231,813 km² de mar territorial (De la Lanza-Espino, 2004). Este último ocupa una franja marina de 22.2 km del litoral continental, 68% corresponde a las costas e islas del Océano Pacífico y del Golfo de California, y 32% a las costas, islas y cayos del Golfo de México y del Mar Caribe. Además, esta zona marítima cuenta con 500,000 km² de plataforma continental, 16,000 km² de superficie estuarina y más de 12,000 km² de lagunas costeras (Lara-Lara, 2008), lo que da a México un lugar destacado en el potencial de diversidad que resguardan sus ecosistemas, tanto costeros como marinos e insulares.

HACIA UNA MEJOR VISIÓN DE LA PROBLEMÁTICA: LA VULNERABILIDAD DE LAS LAGUNAS COSTERAS

La planicie costera se caracteriza por la heterogeneidad de humedales que presenta. Entre los humedales más representativos se encuentran los pastos sumergidos, los manglares, los bajos de mareas, llanuras de inundación deltaicas, estuarios, lagunas, selva baja inundable, entre otros. En todos ellos se refleja una mezcla de suelo, agua, plantas, animales y microorganismos, con intensas interacciones biológicas y físico químicas (Maltby *et al.*, 1992; Mitsch y Gosselink, 2000; Dugan, 2005). La combinación de estas funciones y productos, junto con el valor de diversidad biológica y cultural, otorgan a estos ambientes enorme importancia para el desarrollo social y económico.

Las lagunas costeras y estuarios son ecosistemas altamente productivos, por la disponibilidad de nutrientes que aportan los ríos y escurrimientos terrestres (Mee, 1978; Nixon, 1981). Por otra parte, la gran diversidad de productores primarios, tiene un efecto combinado que mantiene un flujo elevado y constante de energía en el ecosistema lagunar-estuarino y algunas veces, se exporta hacia la zona costera adyacente (Flores-Verdugo *et al.*, 1995). México cuenta con aproximadamente 125 lagunas costeras, que abarcan 33% de sus litorales

(Lankford, 1977). Estos ecosistemas presentan una gran diversidad de hábitats que constituyen áreas de reproducción, crianza y refugio para una gran cantidad de especies marinas. La elevada fertilidad de las lagunas costeras, mantiene una rica y compleja cadena alimenticia caracterizada por una gran producción pesquera (Day *et al.*, 1973). Se estima que más del 60% de las especies marinas de importancia comercial, dependen en algún momento de su ciclo de vida de los ecosistemas lagunares-estuarinos. Adicionalmente, funcionan como un verdadero filtro de la contaminación por fuentes terrestres y como protección contra inundaciones, ante eventos hidrometeorológicos extremos (Yáñez-Arancibia y Day, 1988; Contreras, 1988 y 2005; Botello *et al.*, 2005).

Se define la vulnerabilidad como el grado en que un ecosistema natural podría resultar afectado por el cambio climático. La vulnerabilidad está en función de la sensibilidad de un sistema a los cambios del clima y de su capacidad de adaptarse a dichos cambios, es decir, los efectos de cambio climático en las lagunas costeras se ven reflejados en qué tan vulnerable son y a su poder de adaptación (Botello y Villanueva, 2011). En este contexto, un sistema muy vulnerable sería aquel que fuera muy sensible a pequeños cambios en el clima, incluyéndose en el concepto de sensibilidad, la posibilidad de sufrir efectos muy perjudiciales, o aquel cuya capacidad de adaptación resultara seriamente limitada.

Los procesos y los ambientes costeros están sujetos a cambios que varían ampliamente en la escala geográfica, el tiempo y su duración. Al combinarse, crean sistemas biológicamente muy productivos, pero también sensibles a las presiones ambientales provenientes de las diversas actividades humanas: contaminación, eutrofización, industrialización, asentamientos humanos, cambio de uso del suelo, sobrepesca, etc. Si tomamos en cuenta que cerca de 3,200 millones de personas, es decir la mitad de la población del planeta, viven en las costas o a menos de 200 km del litoral, podemos imaginarnos el impacto que de

manera continua se está haciendo a la sustentabilidad de los ambientes costeros; aunado a que las costas son los ambientes que serán más afectados por el cambio climático, debido al incremento en el nivel medio del mar, así como a los huracanes con vientos fuertes y grandes cantidades de agua, cuya frecuencia ha ido en aumento en las últimas décadas (Botello y Villanueva, 2011).

Uno de los ecosistemas más sensibles y que han sufrido una mayor pérdida son los humedales costeros, cuyos servicios ambientales no han sido estimados en toda su potencia, al actuar como amortiguadores de zonas contaminadas, estos se encuentran amenazados en principio por la alteración del sistema hidrológico, alterando dinámicas y procesos ecológicos.

Las evaluaciones de la vulnerabilidad de recursos costeros a los impactos del cambio climático deben poder distinguir entre *vulnerabilidad natural del sistema* y *vulnerabilidad socioeconómica del sistema*, aunque claramente ambos están relacionados y son interdependientes. Ambos son dependientes en sensibilidad, exposición y capacidad de adaptación (Smith *et al.*, 2001). Un análisis apropiado de vulnerabilidad socioeconómica a la elevación del nivel del mar, requiere de una comprensión previa de cómo el sistema natural será afectado. Partiendo de esta base, el análisis de vulnerabilidad costera comienza con la respuesta del sistema natural. Además, otras presiones climáticas y no climáticas deben ser reconocidas en un análisis de vulnerabilidad, porque el aumento del nivel del mar no ocurre aisladamente y los sistemas costeros evolucionarán a causa de otros factores distintos a dicho aumento (Botello, 2008).

El riesgo o probabilidad de que ocurra una determinada pérdida o daño, está en función de dos factores: la probabilidad de que se manifieste una amenaza o peligro, y la vulnerabilidad de los objetos expuestos a tal amenaza o peligro, pudiendo distinguirse en este segundo término: (1) el grado de exposición de los elementos a una determinada amenaza y (2) el factor interno de selectividad, o predisposición

intrínseca, que determina el grado de afectación. La creciente necesidad social de intervenir en la disminución del riesgo ha extendido el uso del término vulnerabilidad para abarcar: (a) objetos expuestos tangibles (es decir, con expresión espacial concreta sobre el terreno) y (b) aspectos sociales, sin expresión espacial concreta, pero vinculados a conductas públicas o privadas que contribuyen a la construcción social de la vulnerabilidad (Escofet *et al.*, 2010).

Así, se habla de una vulnerabilidad física, ecológica y/o natural, cuando se refiere a objetos expuestos tangibles, con expresión espacial concreta sobre el terreno y de vulnerabilidad económica, social, política, técnica, ideológica, cultural, educativa, institucional, cuando se refiere a políticas públicas, actitudes y otras componentes sociales que inciden en el proceso de gestión (Wilches-Chaux, 1993; Cardona, 2001).

Con base en lo anterior y sumando los diversos factores interrelacionados estudiados por expertos en el tema, se han generado diferentes tipos de vulnerabilidad. Por mencionar algunos:

1. **Vulnerabilidad Hidrodinámica**, García y Rosales (2011), estudiaron la vulnerabilidad del sistema lagunar Carmen-Pajonal-Machona, realizando una modelación numérica hidrodinámica de toda la cuenca, a partir de aportes de lluvias y las variaciones de la marea en la costa, así como un análisis geomorfológico espacio temporal de la boca de Panteones, observando que el sistema lagunar sufre impactos por el decremento de aportes fluviales y un aumento en el aporte marino basado en la variación de la marea, aumento en las velocidades de corrientes y de su frecuencia en las bocas, con el riesgo de un mayor inestabilidad costera por un aumento en el transporte de sedimentos. Por otro lado, Arcos Espinosa *et al.* (2010), estimaron la situación que guardan los recursos hídricos en las desembocaduras al Golfo

de México y con las proyecciones del IPCC (2008), sobre el posible impacto sobre estos recursos. Para la situación actual, la descarga total de estos afluentes al Golfo de México es de 5,382.33 m³/s. Aplicando las proyecciones del IPCC (2008) en la desembocadura para fines del siglo XXI, estos recursos hídricos se verían reducidos a 4,630.26 m³/s. Esta considerable disminución de caudales y el aumento de las temperaturas, afectarían propiedades físicas, químicas y biológicas de estos afluentes. También, al disminuir los caudales y con el aumento del nivel del mar, la cuña salina penetraría aún más dentro de los estuarios y con mayor tiempo de permanencia en éstos, afectando a numerosas especies y comunidades que viven en su entorno.

2. **Vulnerabilidad Física**, Ortiz *et al.* (2010), se abocaron a la selección y desarrollo de variables y criterios específicos para evaluar la vulnerabilidad física, en el caso de las costas protegidas por barreras, las cuales confieren un albergue y protección muy efectivo en contra de los impactos de los agentes meteorológicos, tales como vientos y oleajes de marea, específicamente durante los eventos en que se despliega mayor energía, tales como huracanes, tormentas e incluso los cambios inducidos por las elevaciones del nivel del mar. Su trabajo es especialmente importante cuando se trata de litorales en los que abundan este tipo de estructuras, como es el caso del Golfo de México. Por otro lado, los estudios de Bolangaro *et al.* (2011), estudiaron cambios morfológicos, particularmente erosión de las playas y disminución de las dunas, a medida que la costa se ajusta a las nuevas condiciones ambientales; evaluaron el impacto de la erosión de las playas y aumento del nivel del mar en las costas de Campeche sobre la anidación de las tortugas marinas, mencionando que se acelera el proceso de erosión, por el aumento de fenómenos hidrometeorológicos extremos y por

el aumento del nivel del mar. Ahora más que nunca, resulta fundamental realizar monitoreos continuos a lo largo de los litorales mexicanos, al menos en las áreas más industrializadas, turísticas y pobladas. Paralelamente, con este monitoreo, es muy recomendable que las nuevas obras de infraestructura en regiones costeras realicen pronósticos erosivos a corto, mediano y largo plazo y establecer líneas de retroceso costero, en función de esos plazos (Carranza-Edwards *et al.*, 2010).

3. **Vulnerabilidad fisicoquímica**, determinada por la calidad del agua y definida ésta por la salinidad, oxígeno, nitrógeno, fósforo, clorofila y la bacteriología. Uno de los fenómenos que la establecen son la salinización, reflejada en una alteración en el contenido de gases disueltos como el oxígeno, variando desde la sobresaturación, hasta la hipoxia o anoxia; otro es la eutrofización, coadyuvada por las descargas urbanas o industriales, modificando también la bacteriología constituida por los organismos coliformes (De la Lanza *et al.*, 2011). De la Lanza *et al.* (2010), realizaron un estudio holístico del humedal Marismas Nacionales, el cual padece de un deterioro muy evidente desencadenado físicamente por la interrupción de los flujos de agua, sedimentos y nutrientes del río Santiago (80% de la aportación de agua-sedimentos), y la apertura artificial del canal de Cuautla (inició con 200 m y actualmente mide >3 km de ancho, aproximadamente). Este deterioro se refleja en la hipersalinización del sistema que ha ocasionado grandes pérdidas de manglar (>20,000 ha), la baja de la productividad pesquera y del ecosistema en general. Se registran áreas y canales (entre los cordones de playa), con fuerte erosión y otras con un significativo azolvamiento. Antes de la apertura del canal de Cuautla (construido en 1976, según Álvarez-Rubio *et al.*, 1986), existían condiciones desde oligohalinas hasta mesohalinas (0.5 ups a 10 ups en otoño) y marina-polihalinas

(23-38 ups en el resto del año), entre Teacapán y Agua Brava. Después de la apertura, Islas-García (2008) refiere niveles de 38 ups en lluvias en la laguna del Valle que se comunica con la de Agua Brava, y en fechas recientes se han registrado en el interior de Agua Brava hasta 120 ups, a finales de la época de sequía (junio) (Flores-Verdugo, com. per.). Se han registrado niveles amplios en el contenido de oxígeno disuelto (2 a 7 ml/L, aproximadamente), resultado de la dinámica de circulación, morfología, de características biológicas (fotosíntesis y respiración) e influencia antropogénica.

4. **Vulnerabilidad biológica**, definida como el conjunto de factores relacionados con la historia de vida de la unidad taxonómica o taxón determinada, que lo hacen frágil o vulnerable y se dividen en tres categorías (alta 3, media 2 y baja 1), de igual forma el impacto que pueden tener las actividades humanas sobre los organismos también ha sido categorizado como alto (4), medio (3) y bajo (2) (Ponce-Vélez *et al.*, 2011).
5. **Vulnerabilidad ecológica**, puede conceptualizarse al incluir aspectos integrales de los ecosistemas, como son la diversidad biológica, la abundancia de los recursos naturales, las tramas ecológicas complejas que le confieren características únicas para el desarrollo y reproducción de especies claves, por lo que la valoración de este tipo de vulnerabilidad puede hacerse en dos niveles: 1) tomando en cuenta ecosistemas relevantes y 2) incluyendo categorías ecológicas generales que alberguen o integren a los anteriores (Ponce-Vélez *et al.*, 2011). El trabajo de Escofet *et al.* (2010), contribuyó a la identificación de la vulnerabilidad de los objetos naturales y sociales del espacio litoral, se indagó la predicción de que los especialistas de hábitat serían más vulnerables que los generalistas, frente a un disturbio como la elevación del nivel medio del mar. La hipótesis fue que, la vulnerabilidad diagnosticada en términos

ecológicos puede ser traducida a los términos operativos que plantea la gestión del riesgo, e incorporarse al proceso de gestión del espacio litoral. Se llevaron a cabo estudios sobre uso de hábitat por parte de 22 especies de aves playeras, a lo largo de 400 km de costa entre Tijuana y El Rosario (Baja California, México) y se identificó una vulnerabilidad natural o intrínseca en las playas marinas, una vulnerabilidad ecológica en los playeros y una potencial vulnerabilidad institucional en el proceso de gestión.

6. **Vulnerabilidad socioeconómica.** La degradación de los ecosistemas costeros se debe a que no se han valorado lo suficiente y de manera correcta, los servicios ambientales que ofrecen, como su biodiversidad, filtrar contaminantes, estabilizar las condiciones climáticas locales, recursos pesqueros, etc., y se transforman o muchas veces se destruyen con el propósito de obtener beneficios inmediatos. Estos beneficios están siendo afectados y repercuten en la vida social y económica de las poblaciones ribereñas, debido a que se está afectando su biodiversidad y por consiguiente, a las actividades productivas (pesquerías y acuacultura), que dependen de la salud de estos ecosistemas, debido a que son hábitats de especies comerciales que llevan a cabo diversas funciones de su ciclo de vida, como alimentación, tránsito, reproducción, refugio, crianza, protección, etc. (Guzmán-Amaya *et al.*, 2011).
7. **Vulnerabilidad social.** En un estudio sobre la vulnerabilidad social al cambio climático en las costas del Golfo y el Pacífico Mexicano, Rodríguez y Bozada (2010), elaboraron un índice compuesto de vulnerabilidad social considerando 11 variables, que comprenden desde el producto interno *per cápita*, el porcentaje de población femenina que participa en la población económicamente activa, el de población mayor de 15 años alfabetizada, hasta el porcentaje de población bajo pobreza ali-

mentaria, índice de sobrevivencia infantil, hogares con acceso a servicio de salud, hogares que no cuentan con agua potable, localidades rurales dentro del municipio y grado de acceso a infraestructuras de comunicación.

8. **Vulnerabilidad socioambiental:** Seingier *et al.* (2010), calcularon un índice de vulnerabilidad de los 17 estados costeros mexicanos, que al relacionarlo con la peligrosidad natural de las planicies costeras, representa un índice de riesgo costero. La peligrosidad consideró dos conceptos: peligrosidad física, la cual se midió sumando la longitud de la línea de costa, el número de cuerpos de agua marinas interiores (bahías y lagunas), la proporción de la planicie en el municipio y la peligrosidad climática que se basó en la frecuencia de los eventos meteorológicos. Incluyeron tres tipos de vulnerabilidad socioambiental: demográfica, socioeconómica y pérdida de vegetación natural.

Si los impactos del hombre en las cuencas hidrológicas cambian la calidad del agua y sedimentos que entran al sistema, las consecuencias serán severas para el medio ambiente costero. A nivel de ecosistema biocomplejo, las lagunas costeras y estuarios presentan las siguientes características generales: son altamente productivos, ecológicamente complejos, ecológicamente estables coexistiendo en un medio físicamente variable y tienen diversas fronteras abiertas e intensas interacciones con ecosistemas vecinos. Se presenta un resumen de la vulnerabilidad natural e inducida por el cambio climático en lagunas costeras y estuarios (Yáñez-Arancibia *et al.*, 2010):

- 1) Los mecanismos que propician una eficiente trampa de nutrientes, también contribuyen con éxito como trampa de contaminantes. Estos mecanismos son alterados por impacto antrópico o eventos climático-meteorológicos; la turbulencia provocada reincorpora contaminantes a la columna de agua.
- 2) La destrucción de macrofitas como pastos de pantanos o bosques de manglar, disminuye dramáticamente la productividad natural, la fuente de alimento, la biomasa pesquera, la integridad del hábitat y magnifica el efecto destructivo de los eventos de tormenta.
- 3) Las cadenas tróficas en aguas someras, son muy susceptibles de interferencia por el hombre y por el cambio climático. Generalmente hay una preferencia por los niveles tróficos superiores (carnívoros), que dependen de algunas especies claves de niveles tróficos inferiores consumidores de detritus orgánico y restos vegetales.
- 4) La mayoría de las especies (animales y vegetales), están viviendo al límite de sus rangos de tolerancia. Estos organismos pueden ser excluidos del sistema por estrés adicional, como el causado por contaminación, anoxia, sobreexplotación pesquera, impacto ambiental antrópico o por el cambio climático.
- 5) Los ambientes sedimentarios estabilizados son importantes por favorecer el ciclo natural de los nutrientes, como áreas de crecimiento de humedales, prevenir exceso de turbidez en la columna de agua y como hábitats de organismos bentónicos. Eventos climático-meteorológicos severos inducen erosión en estos ambientes.
- 6) La condición somera provoca un estado natural de eutrofización. Razón que los hace vulnerables a cualquier proceso natural o inducido, que contribuya a incrementar la demanda química o bioquímica de oxígeno.
- 7) La zona más valiosa y productiva de estos sistemas es la región intermareal y somera de los humedales costeros. Esta región de

frontera es altamente impactada por el cambio de uso de suelo (como construcción de bordos, dragados, rellenos, reconversión en agricultura) y por el cambio climático (como fuerte oleaje, vientos, erosión litoral).

- 8) Las lagunas costeras y estuarios, son un usuario más de agua dulce y sedimentos y lo requieren para su óptimo funcionamiento. La zona de baja salinidad es importante para alimentación, reproducción y protección de muchas especies vegetales, de peces y macro invertebrados. La presencia de un gradiente de salinidad es esencial para el ciclo de vida de numerosas especies que utilizan estos sistemas, desde el mar o desde aguas continentales. El cambio climático está desarticulando estacionalmente los gradientes de parámetros físicos químicos.

EVIDENCIA: SEÑALES QUE SE ADVIERTEN EN LAGUNAS COSTERAS

Los impactos más obvios y directos se notan ya en algunos ecosistemas costeros mexicanos, en particular en los bosques de manglar y los arrecifes coralinos, ambos ya bajo fuerte presión por el crecimiento explosivo de nuevos desarrollos costeros durante las pasadas décadas. Los factores más significativos que afectan la estructura y función de manglares y arrecifes, y que están ya transformándose como resultado del cambio climático global, son la temperatura media del agua, el nivel medio de las mareas, el flujo y la disponibilidad de agua dulce en estuarios y humedales costeros, y la frecuencia creciente de tormentas y eventos extremos (Ecurra, 2010). El impacto de los fenómenos climáticos (fenómenos hidrometeorológicos extremos como son las tormentas, huracanes, ciclones e inundaciones), es uno de los principales eventos que influyen en el estado de salud de la zona costera (Ponce-Vélez *et al.*, 2011).

El ascenso del nivel del mar, por ejemplo, es un fenómeno que está ya claramente ocurriendo y continuará a tasas cada vez más aceleradas en el futuro. Este efecto continuará impactando lagunas costeras y manglares, de manera gradual, pero irrefrenable, como ya lo viene haciendo desde hace años.

Las tormentas y eventos extremos serán también cada vez más frecuentes, con el relacionado efecto sobre nuestras costas y sus habitantes. Definitivamente, si las oscilaciones en las corrientes oceánicas aumentan en su intensidad como parecen haberlo hecho en las últimas décadas, es posible que los ciclos de sequía y precipitaciones extremas también aumenten. A su vez, esto tiene un efecto negativo sobre los estuarios, lagunas y humedales costeros, que reciben cada vez menos agua dulce, en detrimento de la fauna costera y las pesquerías artesanales.

Los efectos del cambio climático y sus consecuencias en la zona costera, lo asociamos a un efecto macro: el aumento en el nivel del mar, las inundaciones de la ciudades costeras y en su caso, hasta su desaparición, sin embargo, con esta visión a largo plazo, muchas veces se olvida el efecto a corto plazo, esos efectos que están sucediendo día con día, a una escala local en ecosistemas con una gran fragilidad, como son las lagunas costeras. Algunos de los impactos claves del cambio climático en estos ecosistemas son:

(Hernández, 2007; Estrada-Porrúa, 2001; Scahallenber *et al.*, 2003; Sanchez-Arcilla *et al.*, 2008; De la Lanza *et al.*, 2011; Botello, 2008):

- 1) Inundación de tierras bajas.
- 2) Desplazamiento de humedales.
- 3) Intrusión salina en estuarios y acuíferos.
- 4) Desbalance en el ciclo de nutrientes.
- 5) Cambio en la composición y productividad de los ecosistemas.
- 6) Pérdida de biodiversidad.
- 7) Alteración del régimen de mareas.

- 8) Cambio en patrones de sedimentación.
- 9) Erosión de línea de costa.
- 10) Disminución de la penetración de luz para organismos bentónicos.
- 11) Impactos socioeconómicos como el daño a la infraestructura costera.
- 12) Detrimento de pesquerías artesanales.
- 13) Pérdida directa de valores económicos, ecológicos, culturales y de subsistencia a causa de la pérdida de tierras, infraestructura y hábitats costeros.
- 14) Aumento del riesgo de inundación para personas, tierras e infraestructura.
- 15) Impactos socioeconómicos directos e indirectos muy diversos sobre el turismo, asentamientos humanos, agricultura, suministro, la cantidad y la calidad de agua dulce, pesquerías y acuacultura.

A la incesante actividad industrial, el intenso incremento de las áreas portuario-industriales, a los actuales y futuros centros turísticos levantados sin planeación efectiva, así como al incremento de los asentamientos humanos en las zonas costeras del país, se suman ahora los efectos del cambio climático. Todo este conjunto de elementos constituye un factor de presión para los ecosistemas que allí existen, principalmente para los humedales y manglares, corales, pastos marinos, islas de barrera, dunas y playas, estuarios, deltas y lagunas costeras.

Del correcto funcionamiento de todos ellos, depende que se tenga una alta productividad y la sobrevivencia de miles de especies de flora y fauna marinas. Su alteración y/o destrucción, solamente conducirá a cancelar múltiples usos y beneficios que se obtienen de la zona costera mexicana. Y originará problemas ecológicos, sociales y económicos, especialmente para los habitantes de estas importantes áreas.

Todo indica que el aumento del nivel del mar será un fenómeno que obliga a establecer políticas de adaptación en la zona costera de corto, mediano y largo alcance. Esas políticas deben ser parte de estra-

tegias de Estado permanentes, de seguridad nacional. La adaptación planificada al aumento del nivel del mar, por lo tanto, debe incluir toda una estrategia establecida al más alto nivel oficial, a fin de revertir las tendencias de la no adaptación natural, para aumentar la capacidad de resiliencia de la costa y contar con una mayor capacidad de adaptación autónoma (Magaña, 2004).

Los sistemas estudiados son muy variados, y también las técnicas utilizadas para su estudio. Pero todos coinciden en que los impactos que causará el cambio climático en nuestras zonas costeras son cada vez más claros. No se trata de saber cuándo ocurrirán, pues ya ocurren, sino qué intensidad tendrán y cuánto nos costará adaptarnos y mitigar aquellos campos en que somos vulnerables (Botello, 2008).

INCREMENTANDO ESFUERZOS: NATURALES Y ANTROPOGÉNICOS (RESILIENCIA, MITIGACIÓN Y ADAPTACIÓN)

El cambio climático y las estrategias a adoptar no sólo son responsabilidad de los gobiernos, sino de la sociedad en general. Por ello, todos podemos contribuir con acciones que incidirán en mejorar las condiciones de nuestra vida. Según el IPCC (2007), la sociedad puede adecuarse al cambio climático y sus impactos por medio de estrategias de adaptación y mitigación. Las medidas propuestas son de diversa índole y van encaminadas a la protección de los bienes, los recursos naturales y la vida humana. Algunas de estas medidas están enmarcadas en iniciativas más amplias de planificación del desarrollo y territorio, como la planificación del uso de los recursos hídricos, la protección de las costas, las estrategias de reducción de riesgos de desastre y el uso y desarrollo de fuentes de energía renovable.

En mitigación, adaptación y costos, la estrategia para reducir el riesgo del cambio climático debe estar orientada a disminuir la magnitud del calentamiento global por medio de la mitigación. Es decir,

reduciendo lo más posible las emisiones de gases GEI, o incrementando su captura. Es necesario estar preparados para las variaciones de todo tipo que traerá un nuevo clima. Y una de las mejores formas de lograrlo es por medio de la adaptación, es decir de la reducción de la vulnerabilidad (Botello, 2008).

La conservación y restauración de ecosistemas que brindan servicios de protección ante eventos climáticos, es una de las estrategias de mitigación encaminadas a la reducción de la vulnerabilidad y que además, contribuye a la captura de carbono. Según el PNUMA (2009), cerca del 20% del carbono liberado a la atmósfera proviene de ecosistemas deforestados (quema y clareo). Por ello, el conservar estos ecosistemas podría reducir significativamente los gases de efecto invernadero en la tierra. Los bosques, los humedales y las selvas son los principales sistemas que funcionan como sumidero de carbono, además de proveer bienes materiales y servicios de protección. Las estrategias propuestas son, mantener el carbono atrapado en estos sistemas por medio de la conservación para bosques, selvas y humedales.

Conscientes de los efectos del cambio climático en las lagunas costeras, diversos actores sociales, académicos, gobierno, sector privado, han emprendido acciones para la protección de dichos ecosistemas y quienes han compartido los éxitos y fracasos de estas acciones, pero lo más importante, han compartido sus lecciones aprendidas y con ello, han contribuido a la conservación y preservación de las lagunas costeras mexicanas. En las costas existen ecosistemas que de forma natural, sirven como protección ante este tipo de eventos climáticos. Los arrecifes de coral, los manglares, las lagunas costeras y los sistemas de dunas son importantes sistemas que absorben parte de la energía, que de otra forma impactaría directamente sobre la infraestructura humana. Sin embargo, estos sistemas han sido fuertemente impactados por las actividades humanas, donde el cambio del uso de suelo figura como la principal causa de su pérdida. Por ende, la protección, conservación y restauración de

lagunas, manglares, arrecifes de coral, pastizales y sistemas de dunas, podría aminorar el impacto de tormenta y huracanes, al mismo tiempo que su funcionamiento contribuya a la eficiente captura de carbono.

Por ejemplo, los manglares capturan el carbono de forma más eficiente que los bosques terrestres, debido a que continuamente agregan sedimentos ricos en carbono orgánicos para posteriormente ser enterrados (Chmura *et al.*, 2003). Por ello, las políticas y estrategias de mitigación de impactos deberán considerar la conservación de estos ecosistemas, existiendo una necesidad urgente de generar programas que permitan planear y disminuir la vulnerabilidad costera, una de estas estrategias es la restauración y conservación de los ecosistemas que ofrecen este tipo de protección a la sociedad.

Las proyecciones del cambio climático señalan que las zonas costeras mexicanas serán seriamente afectadas, en sitios de altas montañas cerca de la costa y que forman cañadas con bosques, que han servido como refugio importante de la alta biodiversidad, que caracteriza a México y que brindan servicios ambientales, como la reducción en la vulnerabilidad a los desastres naturales. Debido a esto, se debe promover el manejo integral de cuencas costeras para conservar su biodiversidad, contribuir a la mitigación del cambio climático y fortalecer el uso sustentable de los recursos naturales, permitiendo la recuperación de la funcionalidad de las cuencas y la provisión de servicios ecosistémicos, a través de las siguientes acciones:

- 1) Fortalecer áreas naturales protegidas en las cuencas.
- 2) Apoyar a los dueños de los bosques a conservar corredores biológicos por medio del pago de servicios ambientales,
- 3) Apoyar a organizaciones de la sociedad civil u otros actores locales legalmente constituidos, para implementar proyectos que fortalezcan el tejido social que requiere un mejor uso de agroecosistemas y bosques de estos sitios, que unen a las ANP de la montaña al mar.
- 4) Asegurar una visión de cuenca y llevar a cabo actividades de monitoreo.

Es importante agregar que la estrategia para mitigar los efectos del cambio climático global, debe formar parte de los planes de desarrollo de las 17 entidades federales con franja litoral, pues los costos sociales y económicos de un desastre siempre son muy grandes y en ocasiones impagables. En este sentido, bueno es recordar que siempre es mejor una política de prevención que miles que busquen paliar las tragedias que dejan los desastres, naturales o no (Botello, 2008). Las políticas públicas orientadas a la gestión integral de la zona costera, que consideren en el largo plazo los efectos potenciales del cambio climático, requieren estudios de carácter regional, que permitan evidenciar y cuantificar los fenómenos que se manifiestan en la región litoral, con el fin de proponer estrategias de mitigación o adaptación. En los procesos de adaptación al cambio climático, los gestores marino/costeros y en general, los tomadores de decisiones, deberán tener presente la variabilidad de largo plazo de las temperaturas oceánicas y atmosféricas y su impacto sobre: los procesos productivos, los asentamientos humanos, la salud y seguridad de los pobladores, los procesos ecológicos y la diversidad biológica marina, costera y terrestre (Azuz, 2010).

RECOMENDACIONES

Como se ha mencionado con anterioridad, hemos representado de forma macro y con una perspectiva a largo plazo, los efectos del cambio climático y sus consecuencias en la zona costera, relegando muchas veces el resultado a corto plazo, es así que, el manejo tradicional de los recursos debe evolucionar hacia un esquema de manejo adaptativo que pueda responder a los cambios con rapidez, lo que implica cambios administrativos y legales, y la participación de la sociedad, autoridades, usuarios, académicos e investigadores. De ahí la importancia y premura de implementar y difundir el concepto de manejo ecosistémico costero, como una estrategia integral de manejo del suelo, agua y recursos naturales, promoviendo la conservación y uso sustentable

de manera equitativa (socialmente incluyente, económicamente viable y ambientalmente sustentable). Así, el mayor reto que enfrenta la humanidad ahora es administrar correctamente el uso de la franja costera, de tal manera que las actuales, y muchas más futuras generaciones, puedan también disfrutar de sus recursos visuales, culturales, ambientales, energéticos y alimentarios.

No es posible ser optimista sobre el futuro de los mares y las costas de México desde la perspectiva del cambio climático global. En muchos casos, el daño ya está ocurriendo, lentamente, casi imperceptible, pero está avanzando día con día. Es urgente desarrollar una agenda de conservación para nuestros mares, con particular énfasis en los ecosistemas más frágiles: arrecifes coralinos, lagunas costeras y manglares, montes submarinos, y zonas de agregaciones reproductivas. Es necesario de la misma forma, desarrollar un programa de mitigación de impactos para las comunidades costeras que ya están sufriendo el impacto complejo del deterioro de sus pesquerías. Se requiere urgentemente iniciar –como país y como comunidad planetaria– un programa para reducir la emisión de gases de efecto invernadero. Finalmente, ¿por qué no?, demandamos repensar nuestro futuro común. La vida de los océanos ha podido sobrevivir más de tres mil millones de años sin nosotros, los humanos, pero nosotros no podríamos sobrevivir sin ella, esa es la magnitud del reto (Escurrea, 2010).

El impacto de los fenómenos climáticos (fenómenos hidrometeorológicos extremos como son las tormentas, huracanes, ciclones e inundaciones), es uno de los principales eventos que influyen en el estado de salud de una zona costera (Ponce-Vélez *et al.*, 2011).

La integración dinámica del gradiente que se extiende desde la planicie costera y hasta la pluma estuarina sobre la plataforma continental, es el concepto clave para un manejo-ecosistémico comprensivo, basado en la integridad ecológica como elemento base para el desarrollo social y económico sustentable, y el referente para contender con los impactos que induce el cambio climático sobre la zona costera

(Mann, 2000; Yáñez-Arancibia *et al.*, 2009a). Si no se comprende la estructura ecosistémica de la zona costera, el manejo-ecosistémico parece una utopía y serán incomprensidos los efectos del impacto por el cambio climático (Yáñez-Arancibia *et al.*, 2010).

Los ecosistemas y las actividades productivas son sensibles a las variaciones del clima, especialmente en la magnitud y frecuencia que traza el cambio climático y los eventos meteorológicos extremos, que se prevé aumentarán en frecuencia e intensidad como el fenómeno del Niño. Estos contribuyen a un factor de presión adicional al desgaste de los ecosistemas, afectados por la contaminación, el aumento de la población humana, la creciente demanda de recursos y las prácticas de gestión insostenibles.

El reto que tenemos como País será reducir la vulnerabilidad de nuestros ecosistemas, de los recursos, de la población y de la propia actividad pesquera y acuícola, frente a los impactos causados por el cambio climático, en el marco de un desarrollo sustentable, mediante el impulso de políticas que fortalezcan los sectores más susceptibles a dichos impactos, especialmente relacionados con la producción de alimentos, que es una actividad de seguridad nacional (Guzmán-Amaya *et al.*, 2011; IPCC, 1997).

CONCLUSIONES

El cambio climático y sus efectos sobre la zona costera está normando fuertemente el manejo-ecosistémico, los conceptos avanzan progresivamente y actualmente, éste, enfatiza principios comunes destacando que un manejo efectivo debe:

- 1) Integrar los componentes estructurales y funcionales del ecosistema, los usos, los recursos y los usuarios,
- 2) Guiar soluciones sustentables,
- 3) Ser precavido evitando acciones deletéreas,

- 4) Ser adaptativo buscando enfoques efectivos basados en experiencias,
- 5) Ser actualizado al aplicar ciencia y tecnología para restaurar/rehabilitar humedales costeros y,
- 6) Internalizar los impactos de la crisis alimentaria, energética y climática sobre la zona costera (Yáñez- Arancibia *et al.*, 2010).

El uso intenso de lagunas costeras y estuarios, acoplado con los impactos que provoca el cambio climático y los efectos sinérgicos residuales, han provocado un deterioro y desintegración ambiental, que complica el manejo-ecosistémico y el desarrollo costero óptimo hacia el futuro. La consecuencia de este uso intenso y los impactos adicionales por el cambio climático, han alterado directamente la estructura y el funcionamiento de estos ecosistemas (Day *et al.*, 2008; Yáñez-Arancibia *et al.*, 2009a, 2009b).

BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez R.M., Amezcua L.F., Yáñez-Arancibia A. (1986). *Ecología y estructura de las comunidades de peces en el sistema lagunar Teacapán-Agua Brava*, Nayarit, México. Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología (pp. 185-242). Vol. 13. Núm. 1.
- Arcos E.G., Jiménez H.S.B., Padilla H.R. (2010). Esguerramiento medio anual y disponibilidad de agua en la vertiente del Golfo de México (pp. 61-72). En: E. Rivera-Arriaga, I. Azuz-Adeath, L. Alpuche Gual, G.J. Villalobos-Zapata (Eds.). *Cambio Climático en México un Enfoque Costero-Marino*. Campeche: Universidad Autónoma de Campeche Cetys, Universidad, Gobierno del Estado de Campeche.
- Azuz A.I. (2010). Evidencias de cambios de largo plazo en algunas variables climáticas de los estados costeros de México (p. 33-60). En: E. Rivera-Arriaga, I. Azuz-Adeath, L. Alpuche Gual, G.J. Villalobos-Zapata (Eds.). *Cambio Climático en México un Enfoque Costero-Marino*. Campeche: Universidad Autónoma de Campeche Cetys-Universidad, Gobierno del Estado de Campeche.
- Bolangaro C.R., García V.A., Torres R.V., Márquez G.A.Z., Guzmán H.V. (2011). Vulnerabilidad de sitios de anidación de tortugas marinas por efectos de erosión costera eb ek estado de Campeche (pp. 93-116). En: A.V. Botello, S. Villanueva-Fragoso, J. Gutiérrez, J.L. Rojas Galaviz (Eds). *Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático (segunda edición)*. México: Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, UNAM-ICMyL, Universidad Autónoma de Campeche.
- Botello A.V., Rendón von Osten J., Gold-Bouchot G., Agraz H.C. (2005). *Golfo de México, Contaminación e Impacto Ambiental: Diagnóstico y tendencias. 2a Edición*. Campeche: Universidad Autónoma de Campeche, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto Nacional de Ecología.

- Botello A.V. (2008). *Evaluación regional de la vulnerabilidad actual y futura de la zona costera mexicana y los deltas más impactados ante el incremento del nivel del mar debido al cambio climático y fenómenos hidrometeorológicos extremos*. México: INE, SEMARNAT, UNAM.
- Botello A.V., Villanueva F.S. (2011). Introducción (pp.1-14). En: A.V. Botello, S. Villanueva-Fragoso, J. Gutiérrez, J.L. Rojas Galaviz (Eds.). *Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático* (segunda edición). México: Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, UNAM-ICMyL, Universidad Autónoma de Campeche.
- Cardona O.D. (2001). *La necesidad de repensar de manera holística los conceptos de vulnerabilidad y riesgo*. México: CIESAS.
- Carranza-Edwards A., Marín G.A.P., Rosales-Hoz L. (2010). Problemática ambiental en la gestión costera-marina (pp. 89-100). En: E. Rivera-Arriaga, I. Azuz-Adeath, L. Alpuche Gual, G.J. Villalobos-Zapata (Eds.). *Cambio Climático en México un Enfoque Costero-Marino*. Campeche: Universidad Autónoma de Campeche Cetys-Universidad, Gobierno del Estado de Campeche.
- Chmura G.C., Anisfeld S.C., Cahoon D.R., Lynch J.C. (2003.) Global carbon sequestration in tidal, saline wetland soils, *Global Biogeochemical Cycles* (pp.1-22). Vol. 17. Issue 4.
- Contreras E.F. (1988). *Las lagunas costeras mexicanas*. Centro de Eco-desarrollo. México: Secretaría de Pesca.
- Contreras E.F. (2005). Humedales costeros mexicanos. En: F.J. Abarca y M. Herzig (Eds.), *Manual para el manejo y la conservación de los humedales en México*. México: Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, U.S. Fish & Wildlife Service, Arizona Game and Fish Department y North American Wetlands Conservation Council, México.
- Day J.W., Smith W.G., Hopkinson C.S. (1973). *Some trophic relationships of marsh and estuarine areas*. In: Chabreck R. H. Procee-

- ding of the Coastal Marsh and Estuary Management Symposium. Louisiana: Louisiana State University, Baton Rouge.
- Day J.W., Christian R.R. Boesch D.M., Yáñez-Arancibia A., Morris J., Twilley R.R., Naylor L., Schaffner L., Stevenson C. (2008). *Consequences of climate change on the ecogeomorphology of coastal wetlands*. Estuaries and Coasts (pp. 477-491). Vol. 31.
- De la Lanza E.G. (2004). Gran escenario de la zona costera y oceánica de México. *Ciencias* (pp.4-13). Vol.76. Issue 2004.
- De la Lanza E.G., Gómez R.J.C., Blanco C.M., Flores-Verdugo F., Hernández P.S. (2010). Vulnerabilidad costera: caso de estudio del sistema de humedales Marismas Nacionales (pp. 205-230). En: E. Rivera-Arriaga, I. Azuz-Adeath, L. Alpuche Gual, G.J. Villalobos-Zapata (Eds.). *Cambio Climático en México un Enfoque Costero-Marino*. Campeche: Universidad Autónoma de Campeche Cetys-Universidad, Gobierno del Estado de Campeche.
- De la Lanza E.G.J.C., Gómez R.S., Hernández P. (2011). Vulnerabilidad de la zona costera. *Fisicoquímica* (pp.15-36). En: A.V. Botello, S. Villanueva-Fragoso, J. Gutiérrez, J.L. Rojas Galaviz (Eds.). *Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático* (segunda edición). Campeche: Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, UNAM-ICMyL, Universidad Autónoma de Campeche.
- Dugan P. (Ed.). (2005). *Guide to Wetlands*. Ontario, Canada: A Firefly Book, Ltd.
- Escofet A., Contreras R., Monti A. (2010). Análisis de vulnerabilidad orientado a la gestión litoral a partir del uso de hábitat (pp. 159-180). En: E. Rivera-Arriaga, I. Azuz-Adeath, L. Alpuche Gual, G.J. Villalobos-Zapata (Eds.). *Cambio Climático en México un Enfoque Costero-Marino*. Campeche: Universidad Autónoma de Campeche Cetys-Universidad, Gobierno del Estado de Campeche.
- Escurra E. (2010). Impactos del cambio climático en los ecosistemas marinos P 12-18. En: *México ante el cambio climático. Evidencias,*

- impactos, vulnerabilidad y adaptación*. México: Greenpeace.
- Estrada P.M. (2001). *Cambio climático global: causas y consecuencias*. México: INEGI.
- Flores-Verdugo F.J., Briseño D.R., González F.F., Calvario M. O. (1995). Balance de carbono en un ecosistema lagunar-estuarino de boca efímera de la costa noroccidental de México (Estero Verde, Sin.) En: González Farías F., De la Rosa J. (Eds.) *Temas de Oceanografía Biológica en México. Vol. II*. Ensenada, B.C.: Universidad Autónoma de Baja California.
- García G.C., Rosales S.V. (2011). Análisis de la vulnerabilidad del sistema lagunar Carmen-Pajonal-Machona (pp. 485-512). En: A.V. Botello, S. Villanueva-Fragoso, J. Gutiérrez, J.L. Rojas Galaviz (Eds). *Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático (segunda edición)*. Campeche: Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, UNAM-ICMyL, Universidad Autónoma de Campeche.
- González M., Jurado E., González S., Aguirre O., Jiménez J., Navar J. (2003). Cambio climático mundial: origen y consecuencias. *Ciencia* (377-385). Vol. 6. Issue 3.
- Guzmán A.P., Rojas C.P.M., Morales G.G.Z., Espino B.E. (2011). Retos para el sector pesquero y acuícola ante el cambio climático (pp.133-204). En: A.V. Botello, S. Villanueva-Fragoso, J. Gutiérrez, J.L. Rojas Galaviz (Eds.). *Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático (segunda edición)*. Campeche: Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, UNAM-ICMyL, Universidad Autónoma de Campeche.
- Hernández A.H.A. (2007). Calentamiento global y zonas costeras: peligrosa combinación. *Ecofronteras* (pp.10-13). Vol. 31.
- Islas G.A. (2008). *Distribución de plaguicidas organoclorados en agua y sedimento durante la época de secas y lluvias en la Laguna de Agua Brava, Nayarit*. Tesis de Maestría. México: Instituto de Ciencias del Mar y Limnología. UNAM.

- IPCC (1997). *The Regional Impacts of Climate Change: An Assessment of Vulnerability*. (Including Summary for Policymakers). A special Report of IPCC Working Group II. Geneva, Switzerland: University of Cambridge Press, IPCC.
- IPCC (2007). *Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III*. Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland: University of Cambridge Press, IPCC
- IPCC (2008). *Climate Change, 2007. Synthesis Report. Summary for policymakers*. Geneva, Switzerland: University of Cambridge Press, IPCC
- IPCC (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. En: T.F.D. Stocker, G.K. Qin, M. Plattner, S.K. Tignor, J. Allen, A. Boschung, Y. Nauels, V. Xia, P.M. Midgley (Eds.). Cambridge, United Kingdom and New York: Cambridge University Press.
- Lankford R.R. (1977). *Coast and Lagoons of Mexico. Their origin and classification in Estuarine processes*. New York: Academic Press.
- Lara-Lara J. (2008). Los ecosistemas costeros, insulares y epicontinentales. En: J. Soberón, G. Halffter, J. Llorente (Eds.). *Capital natural de México, Vol. I: Conocimiento actual de la biodiversidad*. México: CONABIO.
- Magaña V. (2004). Cambio climático global (pp. 17-27). En: Martínez J., Fernández, A. *Cambio climático: Una visión desde México*. México: INECC, SEMARNAT.
- Maltby E., Dugan P.J., Lefeuve J.C. (Eds.) (1992). *Conservation and Development: The Sustainable use of Wetland Resources*. Proceedings of the. Rennes, France: Third International Wetlands Conference.
- Mann K.H. (2000). *Ecology of Coastal Waters with Implications for Management*. Massachusetts: Blackwell Science.

- Mee L.D. (1978). Coastal Lagoons. En: Riley J.P., R.Chester (Eds.). *Chemical Oceanography*. Nueva York: Academic Press.
- Mitsch W.J., Gosselink J.G. (2000). *Wetlands*. Third Edition. New York: John Wiley.
- Nixon S.W. (1981). Remineralization and nutrient cycling in coastal marine ecosystems. En: Nelson B.J., L.E. Cronin (Eds.). *Estuaries and Nutrients*. Nueva Jersey: Human Press.
- Ortiz P.M.A., Sommer C.I., Oropeza O.O. (2010). Criterios para estimar la vulnerabilidad física de las costas de barrera ante los impactos hidrometeorológicos (pp.101-124). En: E. Rivera-Arriaga, I. Azuz-Adeath, L. Alpuche Gual, G.J. Villalobos-Zapata (Eds.). *Cambio Climático en México un Enfoque Costero-Marino*. Campeche: Universidad Autónoma de Campeche Cetys-Universidad, Gobierno del Estado de Campeche.
- PNUMA (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente) (2009) *¿La solución natural?: El papel de los ecosistemas naturales en la mitigación del cambio climático*. Cambridge: PNUMA.
- Ponce V.G., Villanueva F.S., García R.C. (2011). Vulnerabilidad de la zona costera. Ecosistemas costeros del Golfo y Caribe Mexicanos (pp. 37-72). En: A. V. Botello, S. Villanueva-Fragoso, J. Gutiérrez, J.L. Rojas Galaviz (Eds.). *Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático* (segunda edición). Campeche: Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, UNAM-ICMyL, Universidad Autónoma de Campeche.
- Rodríguez H.H., Bozada R.L. (2010). Vulnerabilidad social al cambio climático en las costas del Golfo de México: un estudio exploratorio (pp. 427-468). En: A.V. Botello, S. Villanueva-Fragoso, J. Gutiérrez, J.L. Rojas Galaviz (Eds.). *Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el Cambio Climático*. Campeche: SEMARNAT, INE, UNAM, ICMyl, Universidad Autónoma de Campeche.

- Sánchez A.A., Guimenez J.A., Valdemono A.I., García V. (2008). Implications of climatic change on Spanish Mediterranean low-living cost: the Ebro delta case. *Journal of Costal Research* (pp. 306-316). Vol. 24. Issue 2.
- Schallenberg M., Hall C.J., Carolyn, W.B.C (2003). Consequences of climate-induced salinity increases on zooplankton abundance in diversity in costal lakes. *Marine Ecology Progress Series* (pp. 181-189). Vol. 251.
- Seingier G., Espejel I., Fermán J.L., Delgado O. (2010). Vulnerabilidad de las poblaciones costeras ante la peligrosidad natural, enfoque estatal y municipal (pp. 669-688). En: E. Rivera-Arriaga, I. Azuz-Adeath, L. Alpuche Gual, G.J. Villalobos-Zapata (Eds.). *Cambio Climático en México un Enfoque Costero-Marino*. Campeche: Universidad Autónoma de Campeche, Cety's-Universidad, Gobierno del Estado de Campeche.
- Smith J.B., Schellnhuber H.J., Mirza M.M.Q. (2001). Vulnerability to climate change and reasons for concern: a synthesis (pp. 914-967). In: McCarthy J.J., Canziani, O., Leary N.A., Dokken D.J., White K.S. (Eds.). *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. IPCC Working Group II. Cambridge: Cambridge University Press.
- Yáñez-Arancibia A., Day J.W.J. (Eds.). (1988). *Ecología de los ecosistemas costeros en el sur del Golfo de México. La región de la Laguna de Términos*. México: UNAM-OEA.
- Yáñez-Arancibia A., Ramírez G.J.J., Day J.W., Yoskowitz D. (2009a). Environmental sustainability of economic trends in the Gulf of Mexico: What is the limit for Mexican coastal development? (pp. 82-104). In: J. Cato (Ed.). *Ocean and Coastal Economy of the Gulf of Mexico*. Harte Research Institute for Gulf of Mexico Studies. Texas: Texas A & M University Press.

- Yáñez-Arancibia A., Day J.W., Knoppers B.A., Jiménez J.A. (2009b). Coastal lagoons and estuaries: ecosystem-based management. In: L. M. Fanning, R. Mahon (Eds.). *Marine Ecosystem Based Management in the Caribbean*. Nova Scotia Canada: The University of Dalhousie.
- Yáñez-Arancibia A., Day J.W. (2010). La zona costera frente al cambio climático: vulnerabilidad de un sistema biocomplejo e implicaciones en el manejo costero (pp. 3-22). En: E. Rivera-Arriaga, I. Azuz-Adeath, L. Alpuche Gual, G.J. Villalobo-Zapata (Eds.). *Cambio Climático en México un Enfoque Costero-Marino*. Campeche: Universidad Autónoma de Campeche Cetys-Universidad, Gobierno del Estado de Campeche.
- Yáñez-Arancibia A.J.W., Day R.R., Twilley R., Day R.H. (2010). Manglares frente al cambio climático ¿tropicalización global del Golfo de México? (pp. 231-262). In: E. Rivera-Arriaga, I. Azuz-Adeath, L. Alpuche-Gual, G.J. Villalobo-Zapata (Eds.). *Cambio Climático en México un Enfoque Costero y Marino*. Campeche: Universidad Autónoma de Campeche, Instituto EPO-MEX, Gobierno del Estado de Campeche.
- Wilches-Chaux G. (1993). La vulnerabilidad global (pp. 9-50). En: A. Maskrey (comp.). *Los Desastres no son Naturales*. Colombia: La Red.

CAPÍTULO 10

Políticas públicas, manglares y protección costera frente al cambio climático.⁴⁶ El caso de La Encrucijada, Chiapas

Ludger Brenner⁴⁷

INTRODUCCIÓN

El proceso general de deterioro de los manglares en México ha sido extensamente estudiado y documentado por la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), mediante el mapeo de cambios de su extensión y distribución espacial (CONABIO, 2008; 2009; 2013). Sin embargo, hasta la fecha se ha puesto poca atención en los factores y contextos (políticos, económicos, culturales, etc.) que dieron origen a la definición e implementación de las políticas públicas; tampoco se han identificado sistemáticamente los espacios concretos que fueron afectados directa o indirectamente por las políticas públicas (Brenner, 2015). Además, hay poca claridad acerca de los actores políticos e instituciones involucrados, así como de las actividades y acciones concretas que se llevaron a cabo —y siguen llevándose a

46 El autor agradece el apoyo financiero otorgado por la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO/Convenio FB 1673/KE010/13) para la realización del presente trabajo. En particular, desea expresar su agradecimiento a los comentarios útiles de Rainer Ressler y de Verónica Aguilar Sierra, así como de sus respectivos grupos de trabajo. Asimismo, reconoce el apoyo de Abel Vargas durante la construcción de la cartografía digitalizada. Sin embargo, el contenido del mismo es responsabilidad exclusiva del autor y no refleja el punto de vista de la CONABIO.

47 Profesor-Investigador del Departamento de Sociología, División de Ciencias Sociales y Humanidades. Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa. Correo de contacto bren@xanum.uam.mx

cabo— en las distintas regiones costeras del país (Martínez *et al.*, 2015). En este sentido, varios autores señalan una escasa integración de las políticas públicas ambientales en México (Fernández Vázquez, 2014) y otros países en vías de desarrollo (Jordan y Lenschow, 2010); lo cual merma considerablemente su efectividad (Nunan *et al.*, 2012). Así, se puede afirmar que la abrumadora mayoría de los estudios, al fin y al cabo, se limita a analizar la expansión espacial de ciertas actividades de ciertas económicas sobre las zonas de manglares (véase por ejemplo Alonso-Pérez *et al.*, 2003; Hirales Cota *et al.*, 2010; Mendoza González *et al.*, 2012; Ortiz Lozano *et al.*, 2005; Ruiz Luna *et al.*, 2010). Asimismo, se considera la planeación ecológica-territorial centralizada poco eficaz (López Medellín *et al.*, 2011; Riemann *et al.*, 2014; Vázquez García, 2003), o bien la falta de una implementación más rigurosa de la normatividad ambiental por parte de las instituciones públicas (Fernández Vázquez, 2014; Yañez Arancibo *et al.*, 1999), la principal causa del deterioro ambiental en los humedales costeros.

En este contexto, se puede evidenciar que aún no han recibido la debida atención los siguientes aspectos: a) no se hace ninguna referencia al papel de las instituciones gubernamentales que impulsaron, intencionalmente o no, los procesos antes señalados; b) tampoco se aborda el contexto político socioeconómico, ó institucional en el cual se desarrollaron las políticas públicas de fomento a ciertas actividades económicas; y c) no se identifican espacios concretos afectados específicamente por las actividades realizadas por instituciones gubernamentales; dónde se puede manifestar una disminución considerable de la capacidad de mitigar los probables efectos del cambio climático.

Por otro lado, cabe mencionar que los pocos estudios cualitativos que trataron de indagar las consecuencias ambientales de las políticas públicas en ecosistemas carecen de una georeferenciación; es decir, no identifican los espacios concretos que fueron afectados (Brown y Weber, 2011). En consecuencia, independientemente de su rigor científico, resultan incompatibles con los análisis de cambios de uso de suelo

antes mencionados, simplemente por no referirse a ningún territorio precisamente delimitado (ibíd.). Así, muchos estudios cualitativos no permiten una aplicación práctica, puesto que una evaluación de la afectación de cualquier ecosistema por las políticas públicas requiere de una georeferenciación, aunque solamente para identificar su magnitud y extensión (CONABIO, 2009; 2013). En resumen, los estudios sociales cualitativos con una dimensión espacial concreta serían relevantes también fuera del ámbito académico.

Para tratar de superar algunas de las limitaciones antes señaladas, los objetivos de la investigación son: a) presentar, con base en el ejemplo de un estudio realizado en una de las zonas más importantes de manglares de México, es decir, “La Encrucijada” ubicada en la costa chiapaneca, una metodología para identificar adecuadamente tanto las causas e efectos de las políticas públicas en los manglares que tienden a afectar su capacidad de mitigar los probables impactos el cambio climático y de prestar servicios ecosistémicos cruciales; b) georeferenciar los efectos ambientales de las políticas públicas identificados; y c) reflexionar sobre las posibilidades de una mejor integración de la investigación cualitativa generada por las ciencias sociales con los estudios del análisis espacial y de percepción remota; con el afán de analizar las consecuencias de la políticas públicas en los manglares desde una perspectiva más amplia.

Primeramente, se presentará la metodología aplicada para obtener la información cualitativa para determinar, con base en entrevistas semi-estructuradas con expertos, las causas inmediatas de las consecuencias ambientales de las políticas públicas; que afectan la capacidad de los manglares para mitigar los impactos del cambio climático y de prestar servicios ecosistémicos en la zona de estudio. En seguida, se explicará la técnica del mapeo participativo para georeferenciar los efectos de las políticas públicas, tal como fueron identificados por los expertos entrevistados. Después de una breve descripción de las características geográficas y socioeconómicas de la zona de estudio, se pre-

sentan y discuten los resultados cualitativos y cartográficos del trabajo de campo realizado en los meses de mayo y junio de 2013. Finalmente, se plantean varias propuestas para proporcionar una dimensión explícitamente espacial a la investigación cualitativa en las ciencias sociales; en el afán de complementar los datos biofísicos “duros” con percepciones y valoraciones humanas.

METODOLOGÍAS APLICADAS

Se aplicó una triangulación entre entrevistas cualitativas dirigidas a expertos,⁴⁸ con un mapeo participativo de los distintos efectos ambientales provocados directa e indirectamente por las políticas públicas, con apoyo del sistema de información geográfica ArcGIS. Para obtener información cualitativa detallada acerca de las causas y efectos de las políticas públicas, se realizaron un total de 16 entrevistas de profundidad con expertos, radicados en el estado de Chiapas; quienes fueron capaces de proporcionar información detallada acerca de las diversas actividades de las instituciones públicas y sus efectos específicos en los manglares de la zona de estudio. Éstos fueron seleccionados sucesivamente con base en la técnica de “bola de nieve”⁴⁹: Seis pertenecen a

48 Se consideran “expertos” los funcionarios de diversas instituciones dentro de los tres órdenes de gobierno, miembros de organizaciones no gubernamentales, y académicos que tienen, por su experiencia laboral o personal, conocimientos especializados acerca de los factores y procesos que impactan en los manglares de la zona de estudio. En este sentido, se coincide con Gläser y Laudel (2010,) quienes definen “experto” como “una fuente de conocimiento especializado, relacionado con el fenómeno por investigar” (traducción por el autor). En el contexto del estudio presente, se analizaron únicamente las entrevistas con personas considerados por otros entrevistados como expertos, de acuerdo con la definición arriba mencionada.

49 La técnica de “bola de nieve” consiste en entrevistar primero a los expertos fácilmente identificables (por ejemplo, funcionarios de la CONANP o la SEMARNAT), y pedir después recomendaciones para contactar a otros expertos en la materia. Este proceso se puede dar por concluido cuando los entrevistados ya no mencionan nue-

instituciones federales (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP)/Reserva de la Biosfera La Encrucijada, Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA)/Delegación Chiapas, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales/Delegación Chiapas, Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA)/Delegación Chiapas, Comisión Nacional del Agua y Comisión Nacional de Acuacultura y Pesca (CONAPESCA)/Delegación Chiapas), dos instituciones estatales (Secretaría de Campo (SECAM)/Chiapas, Secretaría de Medio Ambiente e Historia Natural SEMAH/Chiapas), cuatro administraciones municipales cuyo territorio se ubica la zona de estudio (municipios de Mapastepec, Pijijiapan, Villa Mazatlán y Villa Comatitlán). Además, se realizaron entrevistas con tres académicos (El Colegio de la Frontera Sur, Universidad Autónoma de Chiapas, Instituto Tecnológico de Tapachula) y un representante de una organización no gubernamental encargada de promover valores culturales relacionados con la conservación ambiental (A.C. Acción Cultural Madre Tierra). Como resultado, se transcribieron las entrevistas grabadas. Con base en dichas transcripciones, se creó una base de datos con apoyo del programa *Atlas ti*, para proceder con la asignación de códigos. Después, se llevó a cabo un análisis de contenido según la propuesta de Mayring (2010).

Por otra parte, la identificación de los espacios afectados por las consecuencias de las políticas públicas, se basa en la técnica del mapeo de atributos espaciales, en nuestro caso los efectos ambientales de las políticas públicas, con la participación directa de los expertos entrevistados.

vos informantes. En el caso de nuestro estudio, contactamos a todas las personas recomendadas por los entrevistados. Sin embargo, algunas de dichas personas indicaron no tener los conocimientos necesarios para contestar las preguntas del guión. Cabe mencionar que el propósito de la técnica de bola de nieve es precisamente incluir una amplia gama de expertos provenientes de diferentes ámbitos laborales e institucionales; con el afán de identificar también percepciones y posturas divergentes (véase Gläser y Laudel, 2010).

Este método ha sido desarrollado recientemente por investigadores anglosajones (véase por ejemplo Beverly *et al.*, 2008; Brown, 2004; Brown y Weber, 2011), con la finalidad de identificar y localizar ciertos atributos espaciales; así como para capturar y aprovechar conocimientos locales acerca de múltiples aspectos relacionados con la gestión ambiental, en un formato espacialmente referenciado (Beverly *et al.*, 2008; Brown y Weber, 2011). En este contexto, Brown (2004) señala que la planeación ambiental, realizada por diversas instituciones públicas, tradicionalmente se centra en la medición y la georeferenciación de atributos “objetivos” con base en datos biofísicos y de percepción remota; mientras que existen pocos trabajos enfocados en el análisis de las percepciones y valoraciones humanas. De esa manera, el objetivo del mapeo de atributos espaciales consiste en una integración de perspectivas humanas compartidas del espacio con la información biofísica (*ibíd.*).

Se decidió usar mapas bases con cuadrantes integrados, es decir, se pidió a los entrevistados identificar los atributos espaciales a nivel de cuadrantes predefinidos (un kilómetro cuadrado), con apoyo de un guion de preguntas. Se usaron mapas impresos con ciertos atributos topográficos básicos (zona de cobertura de manglares, cuerpos de agua, asentamientos humanos, vías de comunicación, etc.), que contaron con una capa de cuadrantes de un kilómetro cuadrado. Las categorías de dichos atributos se definieron de manera inductiva durante las entrevistas, conforme a las respuestas de los entrevistados. Después, se digitalizaron los cuadrantes mediante el programa de ArcGIS para construir mapas digitales, organizados por los factores de deterioro y el número de los expertos que identificaron los cuadrantes afectados (véanse Figuras 2 y 4).

Cabe mencionar que no todos los entrevistados fueron capaces de identificar los factores de deterioro en los mapas. Sin embargo, los nueve (de un total de 16) expertos dispuestos a identificar atributos espaciales muestran una coincidencia notable con respecto a la ubicación de los cuadrantes asociados con ciertos atributos espaciales. Después de digitalizar los atributos espaciales indicados y localizados

por cada uno de los entrevistados, se elaboraron mapas con las coincidencias entre todos los entrevistados; es decir, se marcaron (a nivel de los cuadrantes) los atributos espaciales, identificados por más de un experto. Como lo muestra la figura 1, los expertos mostraron diversos grados de coincidencias entre los entrevistados en cuanto a ubicación de los cuadrantes asociados con el atributo “Incremento de sedimentación”: el mayor número de coincidencias fue nueve, es decir, nueve entrevistados identificaron el mismo atributo en el mismo cuadrante; mientras que el valor mínimo generalmente fue de tres. De esa manera, una coincidencia espacial alta de los cuadrantes indica un consenso entre los entrevistados en cuanto a la recepción de la ubicación espacial de un atributo determinado.

Para llevar a cabo una triangulación entre los atributos espaciales y los resultados de las entrevistas con expertos, se combinaron el método del mapeo participativo de atributos espaciales y el método de las entrevistas cualitativas con expertos. De esa manera, resultó factible complementar los resultados del mapeo de atributos espaciales –que constituyen datos georeferenciados, pero poco detallados (Brown, 2012; Lowery y Morse, 2013)– con los resultados de las entrevistas cualitativas, que proporcionan fuentes de información “no georeferenciable”, pero muy detallada (Gläser y Laudel, 2010).⁵⁰

ZONA DE ESTUDIO: LA ENCRUCIJADA, CHIAPAS

La zona de estudio corresponde al “Sitio de manglar con relevancia biológica y con necesidad de rehabilitación biológica La Encrucijada” (en lo sucesivo denominado “La Encrucijada”), de acuerdo con la zonificación realizada por la CONABIO (2013). Al mismo tiempo, abar-

50 Cabe mencionar que generalmente se suele combinar el mapeo de atributos con encuestas cuantitativas (véase, por ejemplo, Brown, 2004). En cambio, su combinación con métodos cualitativos resulta ser menos común (Lowery y Morse, 2013).

ca la cobertura de manglar del área natural protegida federal “Reserva de la Biosfera La Encrucijada”, así declarada en el año 2000 y administrada por la CONANP. Aunque ambas delimitaciones no coinciden completamente en términos territoriales, las diferencias en cuanto a la cobertura forestal son mínimas (CONABIO, 2013). *La Encrucijada* se ubica en la planicie costera chiapaneca a unos 80 kilómetros al norte de la frontera con Guatemala, y abarca una superficie de aproximadamente 145,000 hectáreas, conformando una zona de transición costera entre las dos grandes regiones biogeográficas del continente americano, es decir, el neártico y el neotrópico. El clima corresponde al trópico húmedo con una temperatura anual promedio de 28°C y con precipitaciones anuales entre 1,300 y 3,000 milímetros.

Su relevancia para la conservación ambiental se debe a la diversidad biológica, a saber: manglares, tulares, zapontonales, matorral costero, vegetación subacuática y residuos de selva alta perennifolia. En consecuencia, es hábitat de múltiples especies, entre otras las cinco especies de manglar existentes en México.⁵¹ Cuenta con un total de unos 275 km² de manglares con distintos grados de perturbación. Esta zona proporciona una serie de servicios ambientales para mitigar los probables impactos del cambio climático en la costa chiapaneca; puesto que los humedales absorben exceso de escurrimientos en caso de eventos meteorológicos extremos como tormentas tropicales huracanes. De esta manera, aseguran que la superficie de campos de cultivos, pastizales y asentamientos humanos afectada por inundaciones sea menor (Kaplowitz, 2000; CONABIO, 2008). Este servicio ecosistémico seguramente cobrará más importancia en caso de una

51 En estos ecosistemas se han registrado 294 especies de aves, 239 especies de flora, 61 especies de reptiles y anfibios, 73 especies de mamíferos y 58 especies de peces (CONANP, 2009). En cuanto a los manglares, la zona de estudio cuenta con mangle rojo (*Rhizophora mangle*), mangle amarillo (*Rhizophora harrisonii*), mangle negro (*Avicennia germinans*), mangle blanco (*Laguncularia racemosa*) y mangle botón (*Conocarpus erectus*) (INE, 1999).

mayor frecuencia e intensidad de precipitaciones; tal como lo prevén los estudios acerca de las amenazas hidroclimáticas originadas por cambio climático en Chiapas (INEGI, 2015). En cuanto a los servicios ecosistémicos con relevancia económica directa, los manglares constituyen espacios para la crianza de camarones y varias especies de peces de alto valor comercial (Sanjurjo *et al.*, 2005); que puede resultar afectada por un probable incremento de la temperatura del agua en los humedales a causa del cambio climático (CONABIO, 2013). Vale la pena mencionar que la población residente en el área de manglar asciende a 1,725 personas distribuidas en 12 localidades y a unos 20,000 en su zona de influencia (CONABIO, 2009). Las actividades económicas principales de la población residente son la pesca artesanal de camarón y de escama, la ganadería, la agricultura, así como, en menor medida la cacería, acuicultura y turismo regional de fin de semana (ibíd.).

Sin embargo, los impactos ambientales considerados más serios no se originaron de las actividades desarrolladas por los lugareños, sino en primer lugar del incremento de sedimentación que acumulan los principales afluentes en las franjas de los manglares, observado a partir de los finales de los años de 1990 (INE, 1999); así como de la expansión del cultivo de la palma africana (*Elaeis guineensis*) después del año 2000 (CONABIO, 2009).

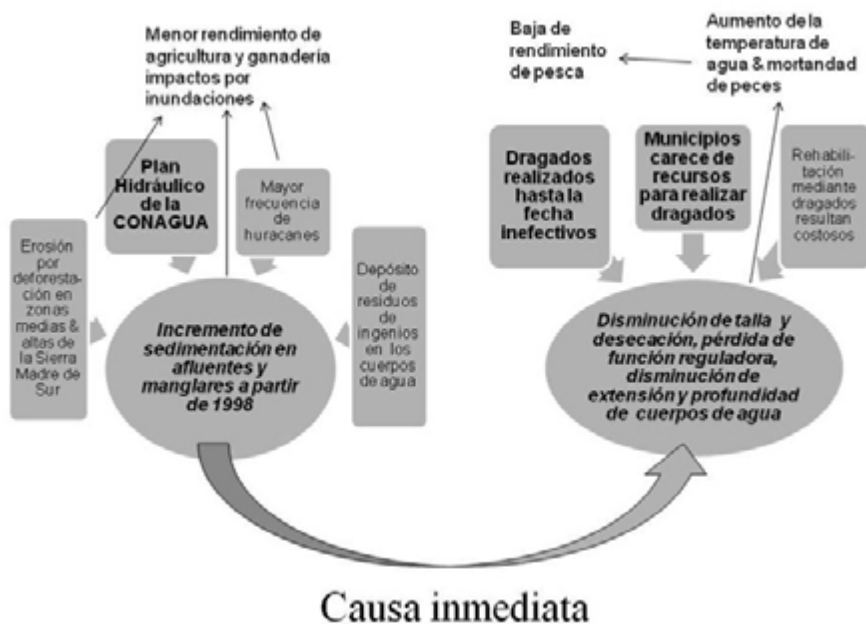
Ambos procesos se analizarán detalladamente a continuación. Otros problemas de menor impacto ambiental –que no se abordan en el estudio presente– son la expansión de la ganadería extensiva, los incendios provocados para cazar tortugas de agua dulce e iguanas, las modificaciones de los flujos hídricos a raíz de dragados mal planeados, la contaminación de los cuerpos de agua con pesticidas y fertilizantes, y el establecimiento de asentamientos humanos irregulares (INE, 1999; CONABIO, 2013). Cabe añadir que las intensas precipitaciones causadas por los huracanes “Mich” en 1998 y “Stan” (en 2005) agudizaron aún más las consecuencias ambientales de la sedimentación de los manglares.

RESULTADOS

Los entrevistados identificaron dos principales causas para la afectación de los manglares por las políticas públicas: en primer lugar, la regularización de los flujos hídricos de los afluentes de los humedales por parte de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), con la finalidad de permitir un desagüe más rápido de las precipitaciones en la Sierra Madre del Sur, evitando así inundaciones y daños de la infraestructura vial.

En este sentido, las actividades realizadas por la CONAGUA también se podrían interpretar como medida preventiva para mitigar los impactos de precipitaciones de mayor intensidad en la región a raíz del cambio climático. Por otra parte, se destacaron los impactos que causó la subvención al cultivo de la palma africana en la zona de estudio, otorgados por la Secretaría de Campo de Chiapas (SE-CAM), así como, en menor medida, la SAGARPA; para impulsar la producción de biocombustibles renovables en la planicie a costa del estado. Irónicamente, la intención del gobierno estatal fue mitigar los impactos del cambio climático en la entidad, reduciendo la emisión de gases de efecto invernadero producidos por la combustión de gasolina y diésel convencionales.

Figura 1. Causas y efectos del incremento de sedimentación



Fuente: elaboración propia con base en entrevistas a expertos (mayo/junio de 2013).

Como lo señala la Figura 1, los expertos coinciden en que el incremento de la sedimentación⁵² como consecuencia de la rectificación de cauces, observada desde 1998 en los afluentes y los humedales, constituye la principal causa inmediata para el deterioro de los manglares de *La Encrucijada*; ya que desencadenó una disminución progresiva de la talla promedio de los manglares y la pérdida de su función regulatoria para mitigar inundaciones en la zona costera; probablemente más frecuentes e intensas,

⁵² Varios entrevistados usaron el término “azolvamiento” para referirse al proceso de depósito y acumulación de sedimentos.

debido a los efectos del cambio climático (INEGI, 2015), acompañado por un proceso lento de desecación de los cuerpos de agua del humedal y la reducción de la extensión de las lagunas costeras (véase elipses en la figura 1).⁵³ Como lo describe de manera expresiva uno de los entrevistados:

“El azolvamiento de los ríos; todo eso que viene de la parte alta es la [amenaza] más seria, ya que indudablemente de los cinco sistemas lagunares uno ya está muerto por azolvamiento (...) [La sedimentación] es la amenaza tremenda, pero no solo amenaza la laguna, sino toda el área de manglar, todas las áreas de tulares, amenaza toda la zona” (Académico/16 de mayo de 2013).

Cabe mencionar que una serie de estudios realizados confirma la magnitud de los impactos que causa el aumento de sedimentación en otras zonas de manglares de México (véase por ejemplo CONAFOR, 2007; de Rouffignac, 2012; Romero Berny, 2012). Sin embargo, conviene fijar la atención no solo en las causas inmediatas y los efectos directos antes señalados, sino también en los factores que influyen de manera decisiva en dichas causas inmediatas; y al mismo tiempo determinan los efectos directos (Figura 1): por un lado, llama la atención que las políticas públicas, en este caso el “Plan Hidráulico de la Costa de Chiapas” de la CONAGUA (iniciado en 1995) para rectificar las cauces de los afluentes de La Encrucijada mediante la remoción de material pétreo, canalización y dragados, en el afán de permitir un escurrimiento más rápido de la precipita-

53 Aunado a eso, la sedimentación también tiene repercusiones en el rendimiento de las actividades agropecuarias, debido una mayor frecuencia e intensidad de inundaciones en la planicie costera, ya que impide la libre salida del agua dulce hacia el mar. Asimismo, la disminución de la extensión y profundidad de los cuerpos de agua de La Encrucijada como consecuencia directa de la sedimentación causan un incremento de la temperatura del agua y, en consecuencia, un menor rendimiento de la pesca debido a la mortandad de especies de valor comercial (Figura 1).

ciones en la Sierra Madre del Sur (INE, 1999),⁵⁴ no fue la única causa del incremento de la sedimentación, sino más bien su catalizador; ya que otros factores agudizaron considerablemente los efectos de la rectificación de cauces: aunque las obras realizadas por la CONAGUA indudablemente provocaron un incremento de la velocidad de flujo del agua de los afluentes, así como un mayor arrastre de sedimentos, su combinación con tres factores adicionales, es decir, la erosión de los suelos debida a la deforestación en las zonas medias y altas, el incremento de precipitaciones durante eventos meteorológicos extremos, así como el depósito de residuos orgánicos en los afluentes por parte de los ingenios locales, últimamente provocó el volumen actual de la sedimentación (Figura 1). En otros términos, sin la coincidencia con los tres factores antes mencionados, las obras de rectificación hubieran causado un impacto ambiental considerablemente menor en los manglares de *La Encrucijada*. En este sentido, resulta justificado afirmar que las medidas tomadas por la CONAGUA no han causado por sí mismo un incremento de sedimentación tan notable como se observa en la actualidad. Así lo expresa un entrevistado:

“A mi punto de vista, los azolvamientos (...) incluyen diferentes factores: uno es la situación de la remoción de la cobertura vegetal en la parte de la sierra; dos: los arrastres de la materia orgánica por suelos, que (...) se erosionan, al perder la cobertura vegetal; y tres: obviamente, si no hay una buena planeación o un estudio de impacto ambiental para hacer la remoción o extracción de material pétreo en los cuerpos de agua naturales, como son los ríos, efecti-

54 El objetivo principal del Plan Hidráulico fue permitir la salida rápida del agua cuando hay precipitaciones fuertes, para impedir inundaciones en las cuencas de los afluentes, removiendo obstáculos (sobre todo rocas) que impiden el libre flujo de agua.

vamente, llegan a ocasionar un azolvamiento en la parte baja. Pero son distintos factores, no es exclusivamente la obra que hacen para canalizar o para desazolver los ríos, sino más bien incluye el factor desmonte o quitar la cubierta vegetal, el arrastre del suelo por la pérdida de cobertura vegetal y (...) también las obras, en este caso, de remoción del sustrato de los ríos” (Funcionario público/29 de mayo de 2013).

No obstante, dadas las circunstancias ambientales y socioeconómicas prevalecientes en la región, la seriedad de afectación ambiental por azolvamiento no hubiera resultado tan notable sin la intervención de la CONAGUA.

Además, hay que tomar en consideración otros factores que agudizaron los impactos ambientales de la sedimentación. Por un lado, la única medida considerada factible para mitigar dichos impactos, es decir, dragados para remover los azolves, resultan costosos, incluso prohibitivos para las instituciones municipales; lo cual dificulta una aplicación con la debida frecuencia. Así, las obras realizadas por la CONAPESCA para evitar una baja del rendimiento de la pesca a raíz del aumento de la temperatura del agua resultaron ineficientes: debido al depósito del material excavado cercano a los humedales para ahorrar los gastos operativos, las corrientes de agua lo arrastraron hacia los manglares poco después de terminar las obras:

“Los dragados, los han hecho de una manera equivocada. Bueno sería que pudieran sacar ese sedimento fuera (...) de la comunidad (...) [Pero] sacarlo y trasladarlo fuera de la comunidad o lejos del sistema lagunar (...) es más costoso. Entonces a veces en el mismo año esa arena ya regresó” (Miembro ONG/20 de mayo de 2013).

Aplicando más recursos financieros y una mejor planeación, posiblemente hubiera sido posible contrarrestar, mediante los dragados mejor

planeados por parte de la CONAPESCA, las consecuencias ambientales más severas de la sedimentación. De esa manera, los instrumentos y medidas derivados de la política de fomento pesquero hubieran *solucionado* los problemas provocados por la política de obras hidráulicas.

Para proporcionar una dimensión espacial de la sedimentación como causa inmediata de la afectación de los manglares, se construyó un mapa de coincidencia, de acuerdo con la metodología previamente descrita. Como lo indica la Figura 2, las afectaciones de la sedimentación muestran un patrón espacial particular, puesto que los entrevistados coincidieron en el momento de indicar los cuadrantes de mayor impacto. Así, existe un consenso notable entre los entrevistados de que los sedimentos se depositan principalmente en las cuencas bajas de los principales afluentes, y en particular en sus desembocaduras en los humedales con cobertura de manglar.⁵⁵ Aunque sea preciso de confirmar las percepciones de los expertos con otras técnicas, esta metodología aplicada permite proporcionar, a nivel de cuadrantes de un kilómetro cuadrado, una dimensión explícitamente espacial de las percepciones consensuadas de los expertos. Esta georeferenciación del parecer de los entrevistados también resulta útil en el momento de planear e implementar medidas concretas de conservación ambiental, como por ejemplo la realización de dragados.

55 El proceso de sedimentación no es detectable mediante las técnicas de percepción, ya que las zonas azolvadas se encuentran mayoritariamente debajo de la superficie de agua.

Figura 2. Zonas de manglares afectados como consecuencia de la sedimentación



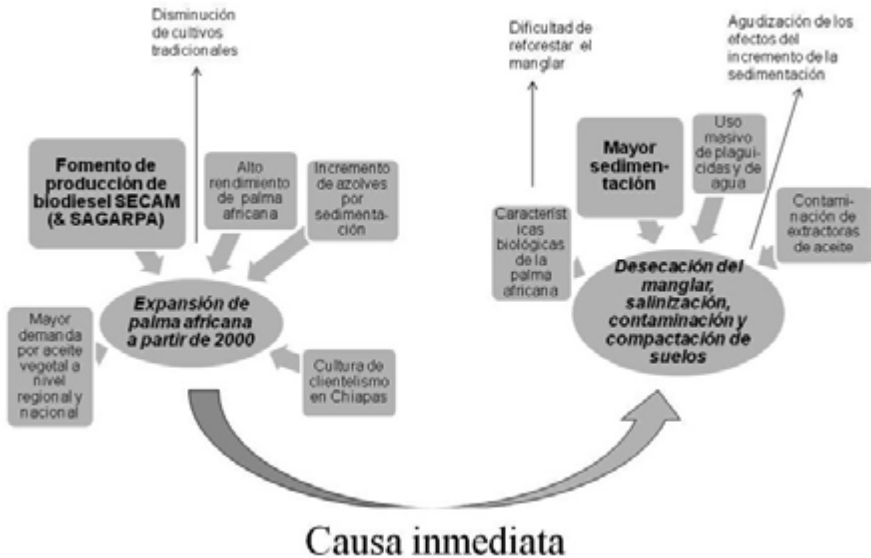
Fuente: Elaboración propia.

La Figura 3 muestra otro factor importante del deterioro de los manglares en la zona de estudio, es decir, la expansión masiva y acelerada de la palma africana –una especie no nativa que produce aceite vegetal comestible y materia prima para elaborar biocombustible– hacia las zonas de manglares. Este proceso ha sido observado a partir del año 2000, y su efecto directo es considerado serio por todos los entrevistados, ya que la extensión natural por semillas o por cultivo provoca la desecación de los manglares, el incremento de salinidad de los cuerpos de agua, así como la contaminación y compactación de suelos, debido al consumo excesivo de agua y el uso de plaguicidas:

“Pues prácticamente la palma está dentro de la zona de manglar, esto es muy crítico. Todo esto que está en blanco [marca un área en el mapa] antes era una isla de vegetación terrestre, ahora está lleno de palma (...) Es una presión sobre los humedales, es una presión sobre el sistema lagunar” (Académico/16 de mayo de 2013).

“La palma africana es un verdadero desastre ecológico. No solamente en Tailandia, aquí en México, los programas son muy agresivos y pues arrasa con todo” (Académico/22 de mayo de 2013).

Cabe mencionar que varios estudios han comprobado los serios efectos ambientales que provocó el cultivo de la palma africana en varias regiones neotrópicas (véase por ejemplo UICN 2010; Centro Humboldt 2011 para el caso de Nicaragua). Sin embargo, igual que en el caso de la sedimentación, las políticas públicas del fomento al cultivo de la palma africana fueron el catalizador (y no la única causa) de su rápida expansión: los expertos coinciden de que, tratándose de una especie no nativa, su introducción y expansión acelerada también se debe a una combinación de factores y procesos económicos y ambientales, existentes antes del inicio del fomento gubernamental: una mayor demanda por aceite comestible, el alto rendimiento de la planta que permite rentas superiores a los cultivos tradicionales, la acumulación progresiva de sedimentos, y la cultura política tradicionalmente clientelista en la región (Figura 3).

Figura 3. Causas y efectos de la expansión de la palma africana

Fuente: Elaboración propia.

Dada esta constelación de factores, la decisión de la Secretaría de Campo del estado de Chiapas de fomentar la producción de biocombustible (o *biodiesel*) con base en el aceite de palma africana, y, aunque en menor medida, de la SAGARPA entre 2000 y 2012 mediante “paquetes agrotecnológicos” que incluían apoyos para la siembra, agroquímicos y asesoría técnica, fue un detonador de inversiones considerables en el cultivo de la palma africana:

“Ahora ante el déficit de aceites (...) todo mundo está sembrando más palmas africanas. Y mañana tendremos lo que está ocurriendo en países de Asia, desiertos de aceite, eso es lo que está ocurriendo, esa es la realidad. Entonces ahorita actualmente existe un *boom* de

palma africana, había un subsidio de hasta más de 20,000 [pesos por hectárea] cuando subsidiaban al café con 5,000 [pesos por hectárea]” (Funcionario público/20 de mayo de 2013).

Dichos recursos fueron proporcionados por un grupo de empresarios locales que suelen recibir estímulos económicos por parte del gobierno estatal a cambio de apoyar políticamente al gobernador en turno. Lo cual es considerado por los entrevistados un cambio de uso suelo en cierto modo impuesto por el gobierno estatal, como consecuencia de la cultura política clientelista que sigue predominando en Chiapas (Figura 3):

“Obviamente, esto fue un proyecto estatal, fue un proyecto que fue mal inducido, un proyecto que el anterior gobernador dijo ‘se hace porque se hace’. Y obviamente como la gente recibió instrucciones y como les tenían que dar dinero, les daban el dinero (...) No te pedían permiso, no te decían siquiera qué tanto iba a impactar, a ellos les decían nada más: ‘no queremos ver un árbol, porque si no, no te doy la plata’ y llegaban y provocó un conflicto tan fuerte, tanto social como jurídico, porque nosotros tuvimos que proceder en consecuencia contra algunas personas en (...) procedimientos administrativos con la PROFEPA” (Funcionario público/ 23 de mayo de 2013).

Cabe añadir que durante el periodo de fomento, el cultivo de granos básicos y del cacao y arroz ha disminuido, debido principalmente al alto rendimiento económico de la palma africana. Por lo tanto, igual que en caso de la rectificación de cauces, el estímulo al cultivo de la palma africana solo desencadenó su expansión territorial en virtud de una serie de circunstancias que favorecieron este proceso.

Conviene, además, prestar la debida atención a factores que agudizaron los efectos ambientales negativos provocados por la palma afri-

cana (Figura 3). Por un lado, la formación de amplias zonas arenosas sin vegetación por el incremento de la sedimentación anteriormente descrita, resultaron ser espacios idóneos para la germinación y el crecimiento de enraizamientos profundos. Así, hicieron posible que la palma africana se expandiera rápidamente sobre los terrenos de azolvamiento mediante la distribución natural de las semillas; impidiendo así la sucesión natural o asistida de manglares. Asimismo, las meras características biológicas de la palma africana también favorecen la rápida expansión hacia los manglares: su resistencia natural contra la salinidad e inundaciones, así como la fácil distribución natural de semillas y sus raíces profundas que impiden su remoción para abrir espacios para la reforestación o rehabilitación del manglar:

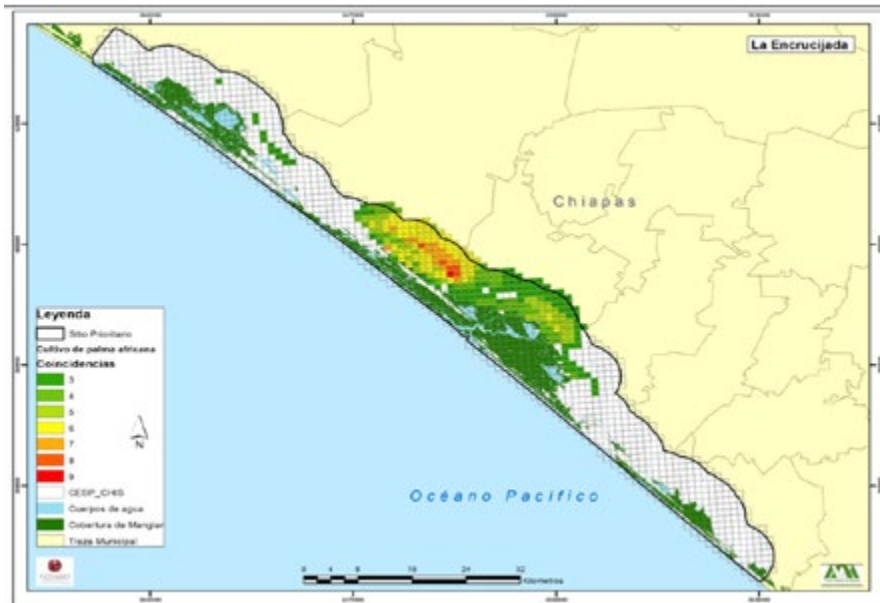
“Vienen las aguas y eso se azolva (...) Si nosotros lo queremos rehabilitar en cierto momento, no lo podemos hacer a la brevedad posible, tenemos que buscar financiamiento y todo el tiempo que nos lleva (...) Cuando nosotros llegamos a tener el proyecto o el dinero para rehabilitar, eso ya está ocupado, entonces ya no podemos hacer nada” (Miembro ONG/20 de mayo de 2013).

Por lo tanto, resulta muy difícil controlar la expansión de la palma africana, aun después del cese del fomento público en 2012. Por otra parte, los desechos de las extractoras de aceite instaladas en la zona de estudio contaminan los afluentes de los manglares (mediante lixiviación) y provocan un aumento de la cantidad de material orgánico en los cuerpos de agua.

Como lo indica la Figura 4, las afectaciones debido a la expansión de la palma africana muestran un patrón espacial claramente distinto al de la sedimentación: los expertos coincidieron de que la palma africana se ha expandido tanto fuera de las zonas de los manglares como en franjas que colindan con los humedales. En ambos casos, abarcan superficies considerables en el centro de la zona de estudio. De acuerdo con los entrevistados, las zonas de manglares más afectados por la

expansión de la palma africana se ubican en las franjas este y norte del conjunto más extendido del manglar (Figura 4), dónde se ubican los terrenos más apropiados para el cultivo de esta especie.

Figura 4. Afectación de manglares por cultivo de Palma Africana



Fuente: Elaboración propia.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Las políticas públicas han desencadenado un deterioro ambiental considerable y acelerado del manglar más importante del estado de Chiapas. Los entrevistados coinciden que el incremento de la sedimentación, debido a la rectificación de los cauces de los afluentes, es la afectación más seria que actualmente enfrentan los manglares en la zona de estudio. Cabe destacar que el tiempo entre el inicio de las

obras de rectificación y las primeras manifestaciones del impacto fue solo tres años. En consecuencia, es de esperar que la capacidad reguladora de los manglares para mitigar los efectos de inundaciones –absorbiendo el exceso de escurrimiento de agua proveniente de la Sierra Madre del Sur– muy probablemente se disminuya progresiva y rápidamente durante la próxima década. Irónicamente, estas medidas para mitigar los impactos de mayores y más intensas precipitaciones como consecuencia del cambio climático afectaron a un ecosistema que presta servicios ambientales cruciales.

Asimismo, el fomento intenso a la palma africana –paradójicamente una medida para promover la producción de combustibles que generaran menores emisiones de gases invernadero– ha impulsado una expansión acelerada de esta especie que ejerce, a partir del año 2000, otra presión seria sobre los manglares y su capacidad de mitigar los efectos de precipitaciones más intensas y frecuentes. En consecuencia, no cabe duda que las dos amenazas más serias que enfrenta la conservación de los humedales en la costa chiapaneca son resultado de las políticas públicas federales y estatales; que llevaron a cabo la CONAGUA y la SECAM. Además, en ambos casos los impactos fueron pre-visibles, como lo demuestran diversos estudios, realizados en México y Centroamérica. Así, todo indica que las instituciones responsables actuaron a sabiendas de las posibles y probables consecuencias ambientales de sus acciones. También es evidente que resulta difícil y costoso subsanar las afectaciones, debido a las razones ya expuestas.

Por ende, las políticas de conservación a nivel federal y estatal se enfrentan a las secuelas de las políticas públicas que llevaron a cabo otras dependencias gubernamentales; que generalmente cuentan con más recursos financieros y humanos que las instituciones encargadas de la protección ambiental. Esta situación semeja a un trabajo de Sísifo, puesto que todas las medidas de conservación y rehabilitación de los manglares resultaron poco eficientes hasta la fecha, ya que fueron “neutralizadas” por los impactos ambientales de las obras hidráulicas y de la política agraria.

Sin embargo, no sería justo afirmar que las medidas tomadas por las instituciones gubernamentales fueron la única causa del deterioro de los manglares; ya que “solo” desencadenaron las afectaciones ambientales; las cuales no se hubieran desarrollado de la misma intensidad sin la existencia de una serie de precondiciones socioeconómicas y ambientales muy particulares. No obstante, vale la pena resaltar que sin las actividades catalizadoras primeramente descritas, la capacidad de los manglares de mitigar los efectos de precipitaciones más intensas hubiera sido menos afectada. Así, no resulta descabellado constatar que una planeación preventiva y ejecución más cuidadosa de las políticas hidráulicas y agrarias hubiera evitado –o por lo menos mitigado– las consecuencias ambientales desencadenadas por las instituciones gubernamentales.

Conforme a lo anterior, no cabe duda que un cuidadoso análisis cualitativo puede arrojar nueva luz sobre las causas y consecuencias de las políticas públicas; mismas que generalmente se presentan de manera indirecta, contextual y retrasada. Además, permite oponer evaluaciones fundadas y verificables contra alegaciones simplificadas, pero sin embargo populares, como “el gobierno destruye los manglares”; lo cual propicia una discusión más constructiva y balanceada. En cuanto a la práctica operativa, las políticas de conservación deberían centrar su atención, al tratar de mitigar los efectos de la sedimentación a los espacios más amenazados, indicados en las Figuras 2 y 4. Asimismo, sería recomendable enfocar el monitoreo del estado de los manglares en la costa chiapaneca en los cuadrantes antes señalados.

Por otra parte, no cabe duda que el análisis de las consecuencias de las políticas públicas sobre ecosistemas específicos requiere de la investigación de los procesos ambientales y de la georeferenciación de los espacios afectados (en particular del cambio de uso de suelo y el deterioro de especies claves) con apoyo de sistemas de información geográfica; un campo que tradicionalmente corresponde a las ciencias naturales, en particular a la biología de conservación y

la percepción remota. Sin embargo, al mismo tiempo resulta preciso identificar las causas inmediatas del deterioro ambiental y de los efectos directos de las medidas aplicadas por las instituciones gubernamentales. Para ello, las ciencias sociales pueden contribuir mediante la aplicación de métodos cualitativos, cuantitativos o de una combinación entre ambos. No obstante, en este contexto surge un reto notable: aparte de identificar las causas y los efectos de las políticas públicas en los manglares y en otros ecosistemas, proporcionar una dimensión espacial clara a los resultados de la investigación de índole socioeconómica, para facilitar su aplicación en el ámbito de la planeación, ejecución y evaluación de las políticas públicas; lo último constituye una tarea pendiente para las ciencias sociales. Para lograrlo, conviene, por un lado, aplicar sistemáticamente los métodos cualitativos y cuantitativos de investigación (o de una mezcla entre ambos), ya que permiten capturar y estructurar adecuadamente el conocimiento y las experiencias de los expertos locales; un recurso frecuentemente desaprovechado, por lo menos en el contexto del análisis de las consecuencias de las políticas públicas. En el caso del estudio presente, resultó útil un análisis de contenido primeramente descrito, para condensar los puntos de vista compartidos por la mayoría de los entrevistados. En fin, es preciso superar las limitaciones disciplinarias, tanto de las ciencias naturales como de las ciencias sociales, con el afán de combinar sus fortalezas.

Por otra parte, es preciso dar una dimensión espacial a las percepciones y valoraciones de los entrevistados, en el afán de localizar los diversos efectos provocados por las políticas públicas en contextos geográficos específicos. En este contexto, el método de coincidencias entre los expertos a nivel de una determinada dimensión espacial viable (un kilómetro cuadrados) resultó adecuado y viable. Así, sería posible complementar los resultados de la investigación cualitativa con referencias espaciales intersubjetivas y consensuadas. Además, un contraste comparativo entre el tipo de información cartográfica presentada en este

trabajo con otros datos georeferenciados, generados mediante técnicas de percepción remota, como por ejemplo cambios de uso de suelo de cobertura forestal, podría ser una herramienta innovadora. Por ejemplo, sería recomendable elaborar un sistema de monitoreo que contraste los cuadrantes identificados como “focos rojos” por parte de los entrevistados, con imágenes satelitales que identifiquen cambios ambientales, por ejemplo la expansión o disminución de ciertas especies claves, como lo son los manglares. Este procedimiento sería capaz de generar una “mezcla” entre información cualitativa e intersubjetiva, con base en los conocimientos de expertos locales, y datos cuantitativos.

Con base en los argumentos antes expuestos, los científicos sociales, y en particular los geógrafos, deberían reconsiderar sus reservas contra una georeferenciación de la información que generan, aumentando y diversificando los estudios que aplican mapeos participativos. En este contexto, llama la atención la virtual ausencia de trabajos de esta índole en México. Por lo tanto, exhortamos a la comunidad científica de ser más creativa en el momento de dar una dimensión explícitamente espacial a los conocimientos, percepciones y valoraciones de los expertos locales, considerando “expertos” a individuos que disponen de conocimientos técnicos y empíricos, relevantes para la problemática por investigar; en el caso que nos ocupa la capacidad de los manglares de mitigar los efectos de cambio climático en la planicie costera de Chiapas.

BIBLIOGRAFÍA

- Aburto Orozpea O., Ezcurra E., Danemann G., Valdez V., Murray J., Sala E. (2008). Mangroves in the Gulf of California increase fishery yields. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* (pp. 10456-10459). Vol. 105. Issue 30.
- Alonso-Pérez F., Ruíz Luna A., Turner J., Berlanga-Robles C.A., Mitchelson-Jacob G. (2003). Land cover change and impact of shrimp aquaculture on the landscape in the Ceita coastal lagoon, Sinaloa, Mexico. *Ocean & Coastal Management* (pp. 583-600). Vol. 46.
- Barbier E.B. (2000). The values of wetlands: landscape and institutional valuing the environment as input: review of applications to mangrove-fishery linkages. *Ecological Economics* (pp. 47-61). Vol. 35.
- Brenner L. (2015). *Análisis de las consecuencias de la política pública en el contexto de la conservación de los manglares: los casos de La Palma/Mecoacán (Tabasco), La Encrucijada (Chiapas), Punta Maroma/Chacmuchuc (Quintana Roo) y Agua Dulce/El Ermitaño (Jalisco)*. Informe final SNIB-CONABIO, proyecto No. KE010. México: Universidad Autónoma Metropolitana/Unidad Iztapalapa.
- Beverly J., Uto L.K., Wilkes J., Brothwell P. (2008). Assessing spatial attributes of forest landscape values: An internet-based participatory mapping approach. *Canadian Journal of Forest Research* (pp. 289-303). Vol. 38.
- Brown G. (2012). An empirical evaluation of the spatial accuracy of public participation GIS (PPGIS) data. *Applied Geography* (pp. 289-294). Vol. 34.
- Brown G. (2004). Mapping spatial attributes in survey research for natural resource management: Methods and applications. *Society and Natural Resources* (pp. 17-39). Vol. 18, Issue 1.

- Brown G., Weber D. (2011). Public Participation GIS: A new method for national park planning. *Landscape and Urban Planning* (pp. 1-15). Vol. 102.
- Camacho Valdez V., Ruiz A., Ghermandi A., Nunes P.A.L.D. (2013). Valuation of ecosystem services provided by coastal wetlands in north-west Mexico. *Ocean & Coastal Management* (pp. 1-11). Vol. 78.
- Centro Humboldt (2010). *Impacto ambiental y social a causa de palma africana y la extracción de aceite vegetal en la Región Autónoma del Atlántico Sur/Nicaragua*. Managua: Centro Humboldt.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) (2008). *Manglares de México*. México: CONABIO.
- (2009). *Manglares de México: extensión y distribución*. México: CONABIO.
- (2013). *Manglares de México: extensión, distribución y monitoreo*. México: CONABIO.
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) (2007). *Manual comunitario de restauración de manglares. Plan de acción regional para la restauración de los manglares de Nayarit/CONAFOR-Reino Unido*. México: CONAFOR.
- Fernandez Vázquez E. (2014). Integración de la política ambiental en México. *Gestión y Política Pública* (pp. 465-505). Vol. 23. Issue 2.
- Gläser J., Laudel G. (2010). *Experteninterviews und qualitative Inhaltsanalyse*, Wiesbaden/Alemania: VS Verlag für Sozialwissenschaften.
- Herrera Silveira J., Ceballos E. (1998). Manglares: ecosistemas valiosos. *Biodiversitas* (pp. 1-10). Vol. 19.
- Hirales Cota M., Espinoza J., Smook B., Ruiz A., Ramos R. (2010). Drivers of mangrove deforestation in Mahual-Xcalak, Quintana Roo, southeast Mexico. *Ciencias Marinas* (pp. 147-159). Vol. 36.
- Instituto Nacional de Ecología (INE) (1999). *Programa de manejo/ Reserva de la Biosfera La Encrucijada*. México: INE.

- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) (2015). Sistema de información sobre el cambio climático. México: INEGI.
- Jordan A., Lenschow A. (2010). Environmental policy integration: A state of the art review. *Environmental Policy and Governance* (pp. 147-158). Vol. 20.
- Kaplowitz M. (2000). Identifying ecosystem services using multiply methods: Lessons from the mangrove wetlands of Yucatán, Mexico. *Agriculture and Human Values* (pp.169-179). Vol. 17.
- López Medellín X., Ezcurra E., González-Abraham C., Hak J., Santiago L.S., Sickman J.O. (2011). Contrasting perspectives on mangroves in arid Northwestern Mexico: Implications for integrated coastal management. *Ocean & Coastal Management* (pp. 318-329). Vol. 54. Issue 4.
- Lowery D.R., Morse W.C. (2013). A qualitative method for collecting spatial data on important spaces for recreation, livelihoods, and ecological meaning: Integration focus groups with public participation geographic information systems. *Society and Natural Resources* (pp. 1422-1437). Vol. 26. Issue 12.
- Martínez N., Brenner L., Espejel I. (2015). Red de participación institucional en las áreas naturales protegidas de la península de Baja California. *Región y Sociedad* (pp. 27-62). Vol. 27.
- Mayntz R. (2004). Mechanisms in the analysis of social marco-phenomena. *Philosophy of the Social Science* (pp. 237-259). Vol. 34.
- Mayring P. (2010). *Qualitative Inhaltsanalyse. Grundlagen und Techniken*, Weinheim/Alemania y Basilea/Suiza: Beltz.
- Mendoza González G., Martínez M., Lithgow D., Pérez O., Simonin P. (2012). Land use change and its effects on the value of ecosystem services along the coast of the Gulf of Mexico. *Ecological Economics* (pp. 23-32). Vol. 82.
- Nunan F., Campbell A., Foster E. (2012). Environmental mainstrea-

- ming : the organisational challenges of policy integration. *Public Administration and Development* (pp. 262-277). Vol. 32.
- Ortiz Lozano L., Granados A., Solís V., García M. (2005). Environmental evaluation and development problems of the Mexican coastal zone. *Ocean & Coastal Management* (pp. 161-176). Vol. 48. Issue 2.
- Páez-Ozuna F.(2001). The environmental impact of shrimp aquaculture: a global perspective. *Environmental Pollution* (pp. 229-231). Vol. 112. Issue 2.
- Riemann H., Santés-Álvarez R., Pombo A. (2011). El papel de las Áreas Naturales Protegidas en el desarrollo local. El caso de la península de Baja California. *Gestión y Política Pública* (pp.141-172). Vol. 20. Issue 1.
- Romero B.E.I. (2012). *Manglares del Scononusco, Chiapas: estructura y cambios a nivel de paisaje*, Tapachula/México. Tesis de maestría. México. ECOSUR.
- Rouffignac de, A. (2012). El reto de las pesquerías en manglares. *Ecofronteras* (pp. 30-32). Vol. 52.
- Ruiz Luna A., Cervantes Escobar A., Berlanga-Robles C. (2010). Assessing distribution patterns, extent, and current condition of north-west Mexico mangroves. *Wetlands* (pp. 717-723). Vol. 30. Issue 4.
- Sanjurjo E., Cadena K., Erbstoesser I. (2005). *Valoración económica de los vínculos entre manglar y pesquerías*. México: INECC.
- Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) (2010), *Impactos de cultivo de la palma africana en el municipio de El Castillos/Nicragua*. Managua: UICN.
- Vazquez García V. (2003). La gestión ambiental con perspectiva de género. El manejo integrado de ecosistemas y la participación comunitaria. *Gestión y Política Pública* (pp. 291-322). Vol. 12. Issue 2.
- Yañez Arancibo A., Lara A., Rojas J., Zárate D., Villalobos J., Sánchez P. (1999). Integrating science and management on coastal marine protected areas in the Southern Gulf of Mexico. *Ocean &*

Coastal Management (pp. 319-344). Vol. 42. Zaldívar Jiménez A., Herrera-Silveira J.A, Teutli-Hernández C., Comín F.A., Andrade J.L., Coronado Molina C., Pérez Ceballos R. (2010). Conceptual framework for mangrove restoration in the Yucatán peninsula. *Ecological Restoration* (pp. 333-342). Vol. 28. Issue 3.

CAPÍTULO 11

Los residuos plásticos y el cambio climático

Alethia Vázquez Morillas⁵⁶

Margarita Beltrán Villavicencio*

Rosa Ma. Espinosa Valdemar*

Jéssica Paola Hermoso López Araiza*

Elodia Villagrán Cano*

INTRODUCCIÓN

Los plásticos surgieron a finales del siglo XIX, en la búsqueda por sustituir materiales naturales como la madera, el marfil y los metales. El siglo XX los vio popularizarse, gracias a su bajo costo y la posibilidad de producirlos masivamente, hasta convertirlos en materiales de uso generalizado en el mundo actual. Su versatilidad ha llevado a emplearlos en aplicaciones tan variadas como la agricultura, la medicina y las comunicaciones; sin embargo, una proporción significativa es empleada para la fabricación de envases y embalajes.

Los envases y embalajes que acompañan a los productos de consumo facilitan su transportación, los protegen y aumentan su durabilidad, sin embargo, generalmente son desechados después de una vida útil muy corta, contribuyendo a las dificultades de gestión de residuos y a la saturación de los sitios de disposición. En México, los plásticos constituyen el 12% de la masa de residuos sólidos urbanos generados, aunque en volumen llegan a representar hasta el 25% (INECC, 2012). Aunque la mayoría de los plásticos son reciclables, las cadenas de acopio y suministro sólo se han desarrollado adecuadamente para el polietilén

⁵⁶* Profesoras-investigadoras en el Departamento de Energía de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco.

tereftalato (PET) y el polietileno de alta densidad (PEAD) de origen industrial. Adicionalmente, muchos residuos plásticos llegan a los ecosistemas debido a su disposición no controlada. En éstos, bloquean el desarrollo de especies vegetales y pueden ingresar en las cadenas tróficas, al ser ingeridos por animales que los confunden con comida.

Ante esto, se han desarrollado diferentes plásticos degradables, con el fin de que se reintegren a los ciclos naturales en tiempos cortos. Estos nuevos materiales se producen a partir de dos posibles principios: a) la inserción, en las cadenas de polímeros que forman los plásticos convencionales, de aditivos que promuevan la degradación del material; y b) la modificación de la estructura polimérica del plástico, para incluir elementos susceptibles a biodegradarse. Bajo estas dos estrategias se han generado muchos nuevos plásticos que se autodenominan como “biodegradables”, “oxo-degradables” o “degradables”. En México se ha promovido su uso a través de diferentes instrumentos, tanto comerciales como legales, sin embargo, no se ha valorado el espectro de consecuencias que podrían derivarse del mismo.

En este trabajo se analiza el efecto que el uso de estos nuevos plásticos podría ocasionar en la generación de gases de efecto invernadero en dos posibles escenarios, la disposición en rellenos sanitarios y el compostaje. Los resultados indican que la sustitución de los materiales convencionales por plásticos oxo-degradables no tendría efecto alguno, debido a que las condiciones de manejo evaluadas no garantizan la degradación de los mismos. Por otro lado, la sustitución de las bolsas de plástico actuales por bolsas de ácido poliláctico implicaría un incremento del 1% y el 19% para escenarios de relleno sanitario y compostaje, respectivamente.

Estos resultados ejemplifican la forma en que una posible solución a un problema ambiental puede provocar efectos no previstos, por lo que es indispensable que al evaluar las diferentes opciones ante situaciones como la acumulación de residuos plásticos se mantenga una visión integral y sistémica.

EL CAMBIO CLIMÁTICO

Para abordar el tema del cambio climático es necesario distinguir entre los conceptos de tiempo y clima. El *tiempo* es el conjunto de propiedades físicas de la tropósfera en un momento y lugar determinado; algunas de estas propiedades son la temperatura, la presión atmosférica, la humedad, las precipitaciones, la dirección y la velocidad del viento (Miller, 2002). El *clima*, por otro lado, es un patrón de las condiciones promedio de muchos estados de tiempo, en un lapso de meses, años o décadas (Landa *et al.*, 2008).

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) define el cambio climático como: “un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables” (CMNUCC, 1992). El cambio climático es, por tanto, atribuible tanto a factores naturales, como las modulaciones de los ciclos solares y las erupciones volcánicas; así como a factores antropogénicos, como los cambios en la composición de la atmósfera y de uso del suelo (IPCC, 2014b).

El *calentamiento global* es la manifestación más contundente del cambio climático (SEMARNAT, 2009). La principal causa de este calentamiento, observado en la última mitad del siglo veinte, es el incremento de las concentraciones atmosféricas de dióxido de carbono, metano y óxido nitroso. Estos gases, mejor conocidos como *gases de efecto invernadero* (GEI), tienen la capacidad de absorber los rayos infrarrojos generando que el aire de la tropósfera se caliente, potencializando el efecto invernadero natural de la Tierra (Molina-Pasquel, 2003). Los 9 años más cálidos de los últimos 134 años se han producido desde el 2000, siendo el año 2014 el que registró mayor temperatura (NASA, 2015). Asimismo, entre 1961 y el 2003 la temperatura global del océano ha aumentado en 0.10°C desde la superficie hasta una profundidad de 700 m (Bindoff *et al.*, 2007). Estos cambios en la temperatura están

asociados directamente con el incremento, durante el siglo XX, en las concentraciones de GEI en la atmósfera (Mann *et al.*, 1998).

Los cambios en la humedad y los regímenes de precipitación en la Tierra también son una evidencia directa del cambio climático; el calentamiento de la tropósfera aumenta la retención de agua en el aire, lo que conduce a un aumento de la humedad. De ahí que las tormentas, ciclones y huracanes, suministrados por este incremento de humedad, producen precipitaciones (Trenberth, 2011). En los últimos 100 años se ha observado un aumento significativo en la precipitación en regiones orientales de América del Norte y del Sur, el norte de Europa y el norte y el centro de Asia (IPCC, 2014b), y un incremento en la frecuencia e intensidad de huracanes generados por el incremento de la temperatura superficial del mar (Chan, 2006). Se han registrado, además, anomalías meteorológicas relacionadas con eventos extremos como olas de calor, sequías, inundaciones, ciclones e incendios forestales (IPCC, 2014b).

La temperatura media de los océanos del mundo ha aumentado hasta profundidades de 3000 m, lo que provoca que el agua de mar se expanda contribuyendo a elevar el nivel del mar. Al mismo tiempo, el agua del mar se acidifica con el aumento continuo de la concentración de dióxido de carbono en el aire (Schubert *et al.*, 2006). Uno de los efectos más claros del cambio climático es el retroceso de los glaciares de los casquetes polares y montañosos (IPCC, 2014b). Un ejemplo de esto es que en un periodo de 1930 hasta la actualidad los glaciares de la Cordillera Blanca, en Perú, han reducido su área total más de un 30% (Schauwecker *et al.*, 2014).

Muchas especies animales han modificado sus áreas de distribución geográfica por los cambios en la temperatura y precipitación en la Tierra (IPCC, 2014a). Se ha documentado que en el hemisferio norte, gran variedad de plantas y animales terrestres se han desplazado un promedio de 6.1 kilómetros por década hacia el norte (Thuiller, 2007). Aunque las causas de la desaparición de diversas especies aún son exploradas, algunos científicos piensan que la extinción se agravará por el cambio climático inducido por el hombre (Hannah, 2015).

Lovelock plantea, en la hipótesis Gaia, que existe una conexión entre las formas de vida en la Tierra y la naturaleza de su clima. Si se atiende a esto, no es de extrañar que una de las principales causas del cambio climático sean las actividades humanas relacionadas con el incremento de las emisiones de GEI a la atmósfera. Las principales fuentes a nivel mundial de GEI son el suministro de energía (26%), la industria (19%), la silvicultura (18%), la agricultura (14%), los edificios residenciales y comerciales (8%) y los residuos y aguas residuales (3%) (IPCC, 2007).

GESTIÓN DE RESIDUOS Y CAMBIO CLIMÁTICO

La Ley General para la Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) define residuo como: material o producto cuyo propietario o poseedor desecha y que se encuentra en estado sólido o semisólido, o es un líquido o gas contenido en recipientes o depósitos, y que puede ser susceptible de ser valorizado o requiere sujetarse a tratamiento o disposición final conforme a lo dispuesto en esta Ley y demás ordenamientos que de ella (LGPGIR, 2003).

Dentro de la clasificación de los residuos sólidos se encuentran los *residuos sólidos urbanos* (RSU), que son los generados de las actividades domésticas en las casas habitación, los que provienen de cualquier otra actividad dentro de establecimientos o en la vía pública que genere residuos con características domiciliarias, y los resultantes de la limpieza de las vías y lugares públicos. La legislación también distingue una categoría de *residuos de manejo especial*, que son aquellos generados en los procesos productivos, que no son considerados como peligrosos o como residuos sólidos urbanos, o que son producidos por grandes generadores de residuos sólidos urbanos.

Dada la alta generación de residuos sólidos en el país y la problemática derivada de su impacto en el ambiente, desde hace muchos años surgió el concepto de *manejo integral de los residuos*. Éste se refiere a las actividades de reducción en la fuente, separación, reutilización,

reciclaje, co-procesamiento, tratamiento biológico, químico, físico o térmico, acopio, almacenamiento, transporte y disposición final de residuos, individualmente realizadas o combinadas de manera apropiada, para adaptarse a las condiciones y necesidades de cada lugar, cumpliendo objetivos de valorización, eficiencia sanitaria, ambiental, tecnológica, económica y social (LGPGIR, 2003).

Para complementar el manejo integral se ha desarrollado lo que se conoce como *gestión integral de residuos* que es el conjunto articulado e interrelacionado de acciones normativas, operativas, financieras, de planeación, administrativas, sociales, educativas, de monitoreo, supervisión y evaluación, para el manejo de residuos, desde su generación hasta la disposición final, a fin de lograr beneficios ambientales, la optimización económica de su manejo y su aceptación social, respondiendo a las necesidades y circunstancias de cada localidad o región (LGPGIR, 2003). La gestión de los RSU se puede considerar como un sistema, es decir, un conjunto de elementos interrelacionados entre sí en un entorno determinado, la gestión óptima de los RSU. Es un sistema abierto, ya que existe una relación directa entre él y su entorno. El entorno está formado por todo aquello que se encuentra fuera y rodea el sistema, esto es, el ambiente circundante, el medio urbano, la sociedad, el entorno político, actual e influye sobre el sistema de gestión (Márquez-Benavides, 2011).

En México, el destino final de la mayor parte de los residuos es su depósito en un relleno sanitario, confinamiento controlado o tiradero a cielo abierto, que juntos agrupan al 94.8% de los residuos (INEGI, 2014). En los rellenos sanitarios las instalaciones son adaptadas para mitigar y controlar las emisiones de los residuos hacia el ambiente, mediante coberturas, sistemas de captación de gases y de lixiviados. En los tiraderos a cielo abierto, por el contrario, los residuos son depositados directamente sobre el suelo, y las emisiones de lixiviados, biogas y partículas se transportan libremente hacia el entorno. De acuerdo con los últimos datos publicados por el INEGI (2014), el 3.5% de los residuos orgánicos generados reciben algún tipo de tratamiento. Entre las tec-

nologías disponibles es común el empleo del compostaje, mediante el cual se estabiliza la materia orgánica en un proceso aerobio que genera bióxido de carbono, vapor de agua, otros gases, y biomasa con alto contenido de materiales húmicos, que puede ser utilizada como mejoradora de suelos.

Las diferentes actividades que se realizan durante las etapas de la gestión de residuos tienen un efecto en el ambiente, de acuerdo con Juárez (2009), en el estudio que realizó sobre análisis de ciclo de vida (ACV) para evaluar los potenciales impactos ambientales asociados al Sistema de Gestión Integral de Residuos Sólidos (SGIRS) de la Ciudad de México. Los resultados obtenidos reflejan las contribuciones de cada una al efecto invernadero: las emisiones mayores, con 1.09×10^6 equivalentes de CO_2 , corresponden a tiraderos clandestinos, vertederos, e incineración; las etapas de gestión de residuos que no contribuyen de forma significativa son la recolección y las plantas de selección; las etapas que mitigan los impactos de forma significativa son la fabricación de composta y los procesos de reciclaje de aluminio, papel y cartón, ya que representan importantes ahorros de energía y materiales en comparación con la producción a partir de materiales vírgenes. En general los procesos de vertedero controlado y los tiraderos clandestinos contribuyen al impacto debido principalmente a las emisiones de biogas y lixiviados, aunque el vertedero controlado genera proporcionalmente menor impacto ya que cuenta con tecnología para la recuperación y tratamiento de biogas y lixiviados generados.

De acuerdo con el inventario de GEI publicado en la Quinta comunicación Nacional ante la Convención Marco de la Naciones Unidas sobre Cambio Climático (SEMARNAT & INECC, 2012) para conocer el impacto de los residuos en el cambio climático se han clasificado las actividades relacionadas con la gestión de residuos en las subcategorías que se muestran en la tabla 1, en la que además se muestran los gases considerados.

Tabla 1. Clasificación de las actividades de gestión de residuos

Etapa de gestión de residuos	Gases de efecto invernadero emitidos		
	CH ₄	N ₂ O	CO ₂
Eliminación de desechos sólidos	√		
Tratamiento biológico de los desechos sólidos	√	√	
Incineración e incineración a cielo abierto	√	√	√

Elaboración propia con datos de la Quinta comunicación SEMARNAT-INECC, 2012.

En este documento se compara la generación de GEI, en equivalentes de CO₂, debida a la generación de residuos para 1990 y 2010. Se observa un incremento general de 270% para las emisiones; aunque este comportamiento obedece a diversos factores, sin duda uno de los más importantes es el aumento poblacional. Las emisiones de GEI adjudicadas a los residuos entre 1990 y 2010 se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. GEI generados en la gestión de residuos en México

	CO ₂ equivalente (miles de toneladas)		Contribución a los GEI (%) del manejo de residuos	
	1990	2010	1990	2010
Actividades				
Eliminación de desechos sólidos	6,653.6	22,117.7	88.60	93.18
Tratamiento biológico de desechos	329.0	376.8	4.38	1.58
Incineración	526.8	1,239.9	7.01	5.22
TOTAL	7509.4	23734.4	100.00	100.00

Elaboración propia con datos de la Quinta Comunicación, fuente: (SEMARNAT-INECC, 2012).

Los datos presentados sugieren la necesidad de hacer cambios y modificaciones que permitan un mejor manejo de los RSU, destacando la necesidad de minimizar los residuos que llegan a disposición final o tratamiento, que es la etapa final del manejo en donde se detectan mayores emisiones de GEI.

LOS RESIDUOS PLÁSTICOS

Una de las corrientes de residuos que más atención ha recibido en los últimos años es la de los residuos plásticos. Los plásticos han contribuido a cambios importantes en todo el mundo, ya que han llegado a remplazar a la madera, el papel, el vidrio y a algunos metales. Los plásticos presentan propiedades que ofrecen ventajas en una gran variedad de aplicaciones. Se caracterizan por una alta relación resistencia/densidad, presentan resistencia al calor, al desgaste, así como una larga vida. Tienen propiedades para el aislamiento térmico y eléctrico y buena resistencia a los ácidos y disolventes, además de una alta hidrofobicidad. Éstas son características muy apreciadas en muchos productos, pero cuando estos artículos sobreviven a su utilidad, su persistencia se puede convertir en un problema (McMurry, 2001; Navarro, 2010).

El uso de los plásticos es cada vez mayor, lo que tiene repercusiones ambientales, ya que los plásticos son el componente de más rápido crecimiento en los residuos sólidos urbanos (Jakubowicz y Enebro, 2012). El aumento en la generación de residuos plásticos ha ocasionado que éstos ocupen grandes espacios en los sitios de disposición sin representar una proporción equivalente en peso. Esto, aunado a la industrialización, producción, y venta de toda clase de productos, muchas veces innecesarios, ha traído como consecuencia la contaminación ambiental derivada de la producción de residuos. El incremento es notable y se debe en ocasiones a que muchos materiales plásticos, sobre todo los requeridos para empaques y embalajes, suelen ser perecederos, es decir, de vida útil corta, y por ende la afectación en ambien-

tes ocasionada por su mal manejo, es notable. El Instituto Nacional de Estadística y Geografía, INEGI, reportó que la masa de residuos plásticos que se produjo en 1995 fue de 1,336.3 miles de toneladas, sin embargo para el 2011 la generación aumentó a 4,475.7 miles de toneladas (INEGI, 2012).

Los plásticos convencionales tienden a acumularse en el ambiente debido a su baja biodegradabilidad. Una posible solución a las graves afectaciones originadas por los residuos plásticos es el uso de plásticos con un tiempo de permanencia menor en el ambiente, dentro de esta categoría se encuentran los denominados plásticos biodegradables y oxo-degradables.

Los plásticos biodegradables son materiales relativamente nuevos, los cuales poseen características similares a los plásticos convencionales, sin embargo, la diferencia entre ambos radica en la posibilidad de ser degradados directamente por microorganismos en un periodo más corto. Estos materiales pueden generarse a partir de fuentes fósiles o renovables (de origen vegetal fundamentalmente). La biodegradabilidad no depende del origen de la materia prima, sino de la estructura química del polímero. Un polímero biodegradable se define como aquel que es capaz de descomponerse químicamente por la acción de microorganismos. Como ejemplo de estos materiales se tiene: la poliláctida o ácido poliláctico (PLA) y el polihidroxialcanoato (PHA) que son derivados de recursos naturales, y el adipato-tereftalato de polibutileno (PBAT) y polibutilenosuccinato (PBS) con base de petróleo (Dornscheidt *et al.*, 2013; Müller, 2005).

El PLA es un polímero termoplástico degradable perteneciente a la familia de los poliésteres alifáticos, obtenido de recursos renovables con excelentes propiedades mecánicas, térmicas y aislantes, lo que lo hace muy versátil. El uso de éste se remonta a los años 70 cuando se utilizaba en productos clínicos, sin embargo en los últimos tiempos se ha utilizado en nuevas aplicaciones tales como: alimentos, farmacéuticas, textiles, industria química (Huang, 2005). El PLA es considerado

una alternativa sustentable con el fin de suplir el uso de productos derivados del petróleo, debido a que su componente básico es el ácido láctico, el cual puede ser producido a bajo costo por fermentación de subproductos agrícolas principalmente aquellos que contienen gran cantidad de carbohidratos o bien por síntesis química. Actualmente, la mayor parte de la producción de ácido láctico está basada en la ruta fermentativa (Nampoothiri *et al.*, 2010).

Existen plásticos diseñados específicamente para su biodegradación por medio del compostaje. Uno de ellos es ECOVIO®, un plástico biodegradable, que contiene un 45% en peso de PLA (ácido poliláctico), el cual es obtenido de maíz, una materia prima renovable. Tiene propiedades de resistencia, es translúcido de estructura semi-cristalina, rigidez y estabilidad térmica por arriba de los 230°C. Este material tiene una variedad de aplicaciones de película por ejemplo en bolsas para residuos orgánicos, entre otras (BASF, 2007).

A partir del 2009, comenzó a extenderse mundialmente la presencia de un nuevo grupo de aditivos que sirven para que los plásticos aceleren su proceso de degradación. Estos aditivos conocidos como aditivos pro-oxidantes se añaden a niveles relativamente bajos, por lo general 1 a 3% en peso (Núñez, 2011). Los plásticos oxo-degradables son materiales modificados de plásticos convencionales, que comúnmente se obtienen de recursos no renovables como el petróleo, aceites y gas natural, son en su mayoría fabricados de PE, PP, PS y PET, sin embargo, también pueden estar hechos de PVC (EuropeanPlastics, 2009; Noreen *et al.*, 2010). Se les incorpora en su estructura química una sal metálica de Co, Mn, Fe o Ni, los cuales forman radicales libres que atacan a las cadenas poliméricas, causando escisiones y la generación de productos oxidados de baja masa molecular que pueden ser consumidos por microorganismos. La primera etapa puede ser iniciada por la luz ultravioleta de la radiación solar, el calor, la tensión mecánica o una combinación de estos factores. La reducción en el peso molecular del polímero debido a la rotura de las cadenas moleculares permite que

estos materiales sean susceptibles a un proceso de biodegradación con el tiempo (Jakubowicz y Enebro, 2012; Ojeda *et al.*, 2009).

LEGISLACIÓN RELACIONADA CON LOS RESIDUOS PLÁSTICOS

En vías de dar solución a la problemática asociada con los residuos plásticos, en los últimos años se han presentado diferentes iniciativas para reformar la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos. En octubre del 2016, por ejemplo, se propuso prohibir “el otorgar a título gratuito bolsas de plástico en establecimientos mercantiles” (Gracia Guzmán, 2016). Sin embargo, en menos de un mes las asociaciones de fabricantes de bolsas se reunieron para generar acciones estratégicas para contrarrestar dicha iniciativa, apostando por programas de Sustentabilidad basados en la producción y consumo sustentable de los plásticos (ANIPAC, 2016). Tras estos movimientos, cinco meses después la iniciativa de reforma fue detenida (ANIPAC, 2017).

No obstante, en marzo de 2017 se presentó otra iniciativa mucho más completa que no sólo incluye la prohibición de las bolsas, sino la creación de un Programa Nacional de Manejo y Sustitución de Plásticos (Castañeda Hoeflich, Lomelí Bolaños, & Delgadillo García, 2017). Esta iniciativa pretende remplazar todos los productos y empaques empleados para la distribución, comercialización y transporte de otros productos, por otros instrumentos hechos a partir de bioplásticos biodegradables y de rápida descomposición. Dicha propuesta implica, por lo tanto, la sustitución y la prohibición de bolsas de plástico. El documento presentado propone un trabajo en conjunto de los tres niveles de gobierno para lograr la sustitución del plástico y generar una estrategia de manejo adecuada. En este último caso, por ejemplo, se propone una separación de residuos sólidos urbanos que considere una subclasificación exclusiva para los desechos plásticos. Esta iniciativa indica

también que el Programa Nacional de Manejo y Sustitución de deberá incluir un diagnóstico básico de productos plásticos no sustituibles por motivos de sanidad; una política que prohíba el proporcionar bolsas de plástico; una política que prohíba el uso del poliestireno expandido para el empaque, embalaje, envase y transporte de alimentos; una política de sustitución de popotes; así como una política de disposición final para dichos residuos, a fin de que se logre una descomposición óptima (Castañeda Hoefflich *et al.*, 2017).

El objetivo de este trabajo es valorar el efecto potencial en la generación de gases de efecto invernadero que se derivaría de la sustitución de las bolsas de plástico convencionales por bolsas compostables u oxo-degradables. En específico se analizan las variaciones en dos sistemas de disposición de residuos: el relleno sanitario y el compostaje. Con ello se pretende hacer evidente la interrelación existente entre los distintos impactos ambientales derivados de un producto común, y la necesidad de tomarlos en cuenta al momento de generar legislaciones al respecto del mismo.

DESARROLLO

Para estimar el impacto de la sustitución de bolsas convencionales por bolsas compostables o biodegradables se siguieron los siguientes pasos:

- a) Disposición en relleno sanitario
 - 1) Se estimó la generación potencial de metano de una tonelada de residuos cuando se dispone en un relleno sanitario, a partir de la composición de los residuos sólidos urbanos en el Distrito Federal. Para ello se tomó como base el estudio de composición realizado por Durán *et al.* (2013). En dicho análisis se cuantifica a los residuos orgánicos en una sola categoría; para diferenciar entre residuos de alimento y residuos de poda se aplicó la

proporción definida previamente por Orta *et al.* (2010), que determinó que el 79.16% de los residuos orgánicos corresponden a residuos de alimento y 20.83% a residuos de poda. Finalmente, la masa de residuos de poda se dividió en tres partes iguales, entre hojarasca, pasto y ramas (ICF International, 2015).

Para determinar la generación potencial de una tonelada de residuos con la composición mencionada en un relleno sanitario se utilizaron los factores de emisión propuestos por la Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME, 2010), que presenta proporciones de carbono orgánico y de generación de metano para diferentes tipos de residuos orgánicos. Las categorías de papel que se encuentran en los RSU del DF y que no están especificadas en dichos factores fueron consideradas como "otros tipos de papel".

Se consideró que el biogas emitido en un relleno está compuesto en un 50% por metano, y el resto se tomó como bióxido de carbono. El metano calculado para cada corriente de residuos se transformó a CO_2 equivalente utilizando un factor de 21, y se sumó a las emisiones directas de metano para calcular la emisión potencial de GEI.

- 2) Se calculó el incremento máximo en emisiones de metano que tendría lugar si el total de las bolsas de plástico presente en los residuos se sustituyera por bolsas compostables u oxo-degradables. Para ello se consideró al PLA como un material de lenta degradación, equivalente a la madera (Green Materials from Plant Oils, 2014), y al polietileno oxo-degradable como inerte (Selke et al., 2015).

Se determinó, a partir de la producción de metano, la generación de CO_2 y la contribución al efecto invernadero, generada por la sustitución de bolsas convencionales por degradables.

b) Composteo

- 1) Se determinó la composición de la fracción orgánica de los RSU en el Distrito Federal, y se estimó su potencial de producción GEI en un proceso de compostaje, a partir de una tonelada de RSU mezclados. Para ello se utilizaron los factores propuestos por ICF (ICF International, 2015) de generación de CO₂ equivalente, a partir de las emisiones de metano y N₂O, posteriormente se calcularon las emisiones directas de CO₂, tomando en cuenta que las emisiones combinadas de metano y N₂O en el compostaje representan el 6% (en masa) de las emisiones gaseosas, y el resto es CO₂.
- 2) Se calculó el incremento en dicha generación al agregar al proceso la proporción correspondiente de bolsas de plástico, si éstas se sustituyeran por bolsas compostables u oxo-degradables. Los factores de generación para el PLA fueron tomados de ICF, y el polietileno oxo-degradable se consideró inerte, dado que en el contexto actual de manejo de residuos no se puede garantizar la existencia de un proceso abiótico de degradación.

RESULTADOS

La Tabla 3 presenta la composición de los residuos urbanos en el Distrito Federal, agrupados en categorías de materiales semejantes. Se observa que los residuos biodegradables constituyen el 62.12% de los mismos. De esta proporción, pueden considerarse como rápidamente biodegradables los residuos de alimento, de poda, papel y cartón, mientras que la madera se considera de lenta biodegradación (Tchobanoglous *et al.*, 1996).

Tabla 3. Composición de residuos en el Distrito Federal

Biodegradable	Tipo de residuos	Proporción en los RSU del DF (% masa)
No	Metales	1.51
No	Otros: cuero, huesos, cerámica, textiles, construcción, finos	10.46
No	Electrónicos y de manejo especial	1.48
No	Plásticos	6.87
No	Vidrio	2.74
No	Compuestos: encerado, multicapas, pañales	8.15
No	Peligrosos	0.15
Si	Alimentos	37.13
Si	Hojas	3.23
Si	Pasto	3.23
Si	Ramas	3.23
Si	Madera	0.42
Si	Cartón	3.38
Si	Papel impreso	1.72
Si	Papel de revista	0.89
Si	Otros tipos de papel	1.06
Si	Periódico	1.88
Si	Papel sanitario	5.95
No/Si	Bolsa de plástico	6.41
	TOTAL	99.90

Fuente: Construcción propia a partir de datos reportados por otros autores (Durán *et al.*, 2013; ICF International, 2015; Orta *et al.*, 2010).

Para esa composición, con base en los factores de emisión propuestos para degradación en rellenos sanitarios (ADEME, 2010), se producirían los gases de efecto invernadero que se presentan en la Tabla 4. Destaca la contribución de los residuos de alimentos y del papel sanitario a la generación de GEI, que juntos producen más del 70% de las emisiones. El caso del papel sanitario es particular a situaciones como la de México, en donde este residuo se deposita con los RSU y no en los sanitarios, como ocurre en otros países.

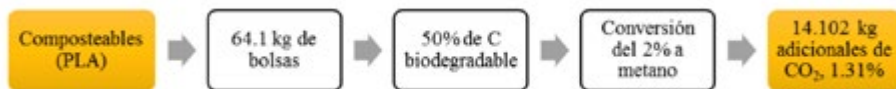
Tabla 4. Producción de gases de efecto invernadero en relleno sanitario

Tipo de residuos	Proporción en los RSU del DF (% masa)	Masa en una tonelada de RSU (kg)[A]	C_{BIODEG} (fracción masa)¹ [B]	C_{BIODEG} transformado en CH₄ (fracción masa)¹[C]	CH₄ emitido (kg/ton) [D=A*B*C]	CO₂ EQ_{**} [E=21D]	CO₂ emitido (50% del biogas) [F=D]	CO₂ EQ total [G=F+D]
Alimentos	37,13	371,3	0,15	0,42	23,39	491,23	23,39	514,62
Hojas	3,23	32,3	0,46	0,08	1,19	24,96	1,19	26,15
Pasto	3,23	32,3	0,45	0,23	3,34	70,20	3,34	73,55
Ramas	3,23	32,3	0,49	0,07	1,11	23,27	1,11	24,37
Madera	0,42	4,2	0,46	0,02	0,04	0,81	0,04	0,85
Cartón	3,38	33,8	0,4	0,21	2,84	59,62	2,84	62,46
Papel impreso	1,72	17,2	0,4	0,44	3,03	63,57	3,03	66,60
Papel de revista	0,89	8,9	0,32	0,12	0,34	7,18	0,34	7,52
Otros tipos de papel	1,06	10,6	0,38	0,48	1,93	40,60	1,93	42,54
Periódico	1,88	18,8	0,47	0,08	0,71	14,84	0,71	15,55
Papel sanitario	5,95	59,5	0,38	0,48	10,85	227,91	10,85	238,76
TOTAL	62,12	621,2			48,77	1024,20	48,77	1072,97

Fuente: ¹ ADEME, 2010.

Ahora, bien, si el total de las bolsas de plástico, que constituyen el 6.41% de los RSU en el Distrito Federal, se sustituyera por bolsas degradables, se tendrían dos posibles escenarios: si se reemplazaran con otras fabricadas a partir de polietileno oxo-degradable no se tendría un efecto, debido a que las condiciones generales de un relleno sanitario no promoverían la degradación abiótica previa requerida para la biodegradación del material. Por otro lado, si se sustituyeran por bolsas fabricadas de PLA, éstas se comportarían como un material de lenta biodegradación, generando un incremento en las emisiones (Figura 1).

Figura 1. Generación de CO₂ por el uso de bolsas compostables, en relleno sanitario



Fuente: Elaboración propia.

Aunque el incremento apenas supera el 1%, no debe desestimarse, sobre todo si se considera el incremento en masa que podría derivarse de la generación total de residuos en el DF, que supera las 10,000.00 toneladas diarias.

Los cálculos para fijar el escenario base de generación de GEI si todos los residuos de alimentos y poda se compostarán se presentan en la Tabla 5. Debe señalarse que, a diferencia de lo que ocurre en el relleno sanitario, en el compostaje las emisiones de CO₂ representan una proporción más significativa; sin embargo, estas emisiones generalmente se consideran “neutras” en términos de GEI, debido a que se generan a partir de la degradación de recursos naturales renovables, y no de combustibles fósiles.

Tabla 5. Producción de gases de efecto invernadero en compostaje

Tipo de residuos	Proporción en los RSU del DF(% masa)	Masa en una ton de residuos (kg)[A]	CO ₂ EQ a partir de emisiones de CH ₄ + N ₂ O (MTCO ₂ EQ/ton) 1 [B]	CO ₂ EQ generado (CH ₄ +N ₂ O) (ton) [C=A*B]	CO ₂ emitido directamente (ton) [D=C*94/6]	CO ₂ EQ total (ton) [E=D+C]
Alimentos	37,13	371,3	0,0451	16,75	12,49	29,24
Hojas	3,23	32,3	0,0748	2,42	1,80	4,22
Pasto	3,23	32,3	0,0748	2,42	1,80	4,22
Ramas	3,23	32,3	0,0748	2,42	1,80	4,22
TOTAL	46,82	468,2		23,99	17,90	41,89

Fuente: ¹(ICF International, 2015)

Al sustituir las bolsas de plástico convencionales por otras fabricadas a partir de polietileno oxo-degradable no se generarían cambios en las emisiones, sin embargo, si se observa un incremento en el caso de que el reemplazo implicara el uso de bolsas de PLA (Figura 2).

Figura 2. Generación de CO₂ por el uso de bolsas compostables, en compostaje



Fuente: Elaboración propia.

El incremento en emisiones, dada la alta proporción de bolsas presentes en los residuos, corresponde al 19%, lo que sin duda puede considerarse como un efecto significativo y que debería tomarse en cuenta al momento de la toma de decisiones.

CONCLUSIONES

La presencia e incremento de materiales plásticos en los residuos sólidos urbanos genera problemáticas durante la gestión de los mismos, especialmente en lo relacionado con la saturación de los sitios de disposición final. La sustitución de los plásticos convencionales por degradables se ha planteado como una posible solución, orientada a aplicaciones de vida útil corta, como las bolsas. Sin embargo, la aplicación de estas tecnologías en México se ha desarrollado en un marco general de desinformación, en el que legisladores, productores, comercializadores y la sociedad en general desconocen los principios de funcionamiento y limitaciones de los diferentes plásticos degradables presentes en el mercado nacional. La promoción de estos materiales se ha realizado teniendo como único referente el esce-

nario de fin de vida de los residuos plásticos, sin considerar otras etapas de su ciclo de fabricación y utilización. Tampoco se ha tomado en cuenta el posible efecto de los plásticos degradables en temas como la generación de gases de efecto invernadero en escenarios de manejo de residuos. Del análisis realizado en este trabajo se desprenden dos conclusiones importantes:

- 1) La posible degradabilidad de los materiales plásticos no garantiza que ocurra su reintegración a los ciclos de nutrientes. Para que este fenómeno tenga lugar se requiere de la existencia de las condiciones que pueden provocar la degradación o biodegradación, como puede observarse para el caso de los plásticos oxo-degradables. Es por tanto necesario articular la promoción de este tipo de materiales con medidas de gestión y manejo, en caso contrario los posibles efectos positivos serán poco significativos.
- 1) Aunque el uso de algunos plásticos biodegradables como el PLA puede ayudar a solucionar algunos problemas ambientales (i.e., la acumulación de plásticos), debe tenerse en cuenta que afectará otros aspectos, en este caso la generación de gases de efecto invernadero.
- 1) Es indispensable contar con mecanismos de evaluación y certificación, que permitan comprobar que los plásticos etiquetados como oxodegradables, biodegradables o compostables realmente lo son, pues en las condiciones actuales no hay garantía de que así sea.

Esta investigación ilustra, mediante un ejercicio simple de cálculo de emisiones, la complejidad de las problemáticas ambientales. Éstas incluyen generalmente interacciones entre distintos elementos que conforman el entorno y se vinculan con aspectos sociales y económicos. Es importante, por tanto, mantener una visión sistémica, de ciclo de vida, que contemple la viabilidad de las propuestas en el contexto local, de forma que las soluciones planteadas no trasladen el problema a otro elemento del ambiente, y puedan trascender el plano regulatorio para representar una alternativa real de mitigación de impactos.

BIBLIOGRAFÍA

- ADEME (2010). Prise en compte des déchets directs et des eaux usées. In: *Guide des facteurs d'émissions V 6.1* (pp. 4–21). France: ADEME.
- ANIPAC (2016). *Suman esfuerzos en defensa de las bolsas de plástico*. México: ANIPAC.
- ANIPAC (2017). *Se detiene iniciativa que prohíbe la gratuidad de bolsas de plástico*. México: ANIPAC.
- BASF (2007). *Competence in Plastics*. Germany: Ludwigshafen BASF Aktiengesellschaft Communication Plastics.
- Bindoff N.L., Willebrand J., Artale V., Cazenave A., Gregory J.M., Gulev S., Unnikrishnan A.S. (2007). *Observations: oceanic climate change and sea level*. IPCC (Vol. AR4). Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- Castañeda Hoefflich J.C., Lomelí Bolaños C., Dalgadillo García V. (2017). *Iniciativa que reforma y adiciona diversas disposiciones de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos*. México: Sistema de Información Legislativa de la Secretaría de Gobernación.
- Chan J.C.L. (2006). Comment on Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment. *Science* (pp. 311). Vol. 311. Issue 5768.
- CMNUCC (1992). *Convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático*. Geneva: CMNUCC.
- Dornscheidt W.M., Schafer J., Stempfle B., Werner H. (2013). Bioplásticos: ¿una alternativa con futuro? *International Trade Fair No.1 for Plastics and Rubber Worldwide* (pp. 1-16). México.
- Durán M.A., Garcés R.M., Velasco A.R., Marín E.J.C., Gutiérrez L.R., Moreno G.A., Delgadillo H.N.A. (2013). Mexico City's municipal solid waste characteristics and composition analysis. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* (pp. 39-46). Vol. 29. Issue 1.

- European Plastics (2009). Oxo-Biodegradable Plastics. *Position Paper. Jul*, 1–7.
- Gracia Guzmán R. (2016). *Iniciativa para proyecto de decreto por el que reforma por adición el artículo 106 de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos*. México: Sistema de Información Legislativa de la Secretaría de Gobernación.
- Green Materials from Plant Oils* (2014) (Vol. 12). London: Royal Society of Chemistry.
- Hannah L. (2015). *Climate Change Biology*. *Climate Change Biology*. London: Elsevier.
- Huang S.J. (2005). Poli(Lactic Acid) and Copolyesters. In: C. Bastioli (Ed.). *Handbook of Biodegradable Polymers* (pp. 287–294). London: Rapra Tecnology Limited.
- ICF International (2015). *Solid Waste Management and Greenhouse Gases Report*. USA: ICF.
- INECC (2012). *Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos*. México: INECC.
- INEGI (2012). *Anuario estadístico de los Estados Unidos Mexicanos 2011*. México: INECC.
- INEGI (2014). *Anuario estadístico de los Estados Unidos Mexicanos 2014*. México: INEGI.
- IPCC (2007). *Cambio climático 2007: Informe de síntesis*. (R. K. Pachauri & A. Reisinger, Eds.). Ginebra, Suiza: IPCC.
- IPCC (2014a). *Cambio climático 2014. Impactos, adaptación y vulnerabilidad-Resumen para responsables de políticas*. Contribución del Grupo de trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Ginebra, Suiza: IPCC.
- IPCC (2014b). *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. Geneva, Switzerland: IPCC.

- Jakubowicz I., Enebro J. (2012). Effects of reprocessing of oxobio-degradable and non degradable polyethylene on the durability of recycled materials. *Polymer Degradation and Stability* (pp. 316-321). Vol. 97.
- Juárez López C. (2009). *La valorización de los residuos como una vía para garantizar la sustentabilidad*. Memorias 2do encuentro de exbecarios IFP. México: Acciones y compromisos para el desarrollo sustentable del Centro de Investigación en Antropología Social.
- Landa R., Magaña V., Neri C. (2008). *Agua y clima : elementos para la adaptación al cambio climático*. México: SEMARNAT.
- LGPGIR (2003). *Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos*. México.
- Mann M.E., Bradley R.S., Hughes M.K. (1998). *Global-scale temperature patterns and climate forcing over the past six centuries* (pp. 779-787). Vol. 392.
- Márquez-Benavides L. (2011). *Residuos Sólidos: Un enfoque multidisciplinario*. México: Colección Ecología y Medioambiente.
- McMurry (2001). *Química orgánica*. México: International Thomson Editores.
- Miller G.T. (2002). *Ciencia ambiental; Preservemos la Tierra*. México: Thomson.
- Molina-Pasquel M. (2003). *El impacto de las actividades humanas en la atmósfera*. México: El Colegio Nacional.
- Müller R. (2005). Biodegradability of polymers: regulations and methods for testing. *Biopolymers Online* (pp. 365-374).
- Nampoothiri K.M., Nair N.R. (2010). Review: An overview of the recent developments in polylactide (PLA) research. *Bioresour. Technol.* (pp. 8493-8501). Vol.101. Issue 22.
- NASA. (2015). *Global Temperature*. Washington: NASA.
- Navarro A.J.F. (2010). *Universidad de Colima. Tesis de Maestría*. Colima: Universidad de Colima.

- Noreen T., Clarke J., McLauchlin A., Stuart P. (2010). *Assessing the Environmental Impacts of Oxo degradable Plastics Across Their Life Cycle* (pp.1–32). Loughborough University.
- Núñez R.D.L. (2011). *Impacto económico y ecológico de la degradación de botellas de plástico en México. Tesis de Maestría*. México: IPN.
- Ojeda T., Freitas A., Dalmolin E., Pizzol M.D., Vignol L., Melnik J., Camargo F. (2009). Abiotic and biotic degradation of oxo-bio-degradable foamed polystyrene. *Polymer Degradation and Stability* (pp. 2128–2133). Vol. 94. Issue 12.
- Orta Ledesma M.T., Saucedo Castañeda G., Tovar Gálvez L.R. (2010). *Composición y generación de residuos sólidos en la Ciudad de México*. México: Instituto de Ciencia y Tecnología del Distrito Federal.
- Schauwecker S., Rohrer M., Acuña D., Cochachin A., Dávila L., Frey H., Vuille M. (2014). Climate trends and glacier retreat in the Cordillera Blanca, Peru, revisited. *Global and Planetary Change* (pp. 85–97). Vol. 119.
- Schubert R., Schellnhuber H.J., Buchmann N., Epiney A., Griesshammer R., Kulessa M., Schmid J. (2006). *The Future Oceans—Warming Up, Rising High, Turning Sour. Solar Energy*. Berlin.
- Selke S., Auras R., Nguyen T.A., Castro Aguirre E., Cheruvathur R., Liu, Y. (2015). Evaluation of biodegradation-promoting additives for plastics. *Environmental Science & Technology* (pp. 3769–3777). Vol. 49. Issue 6.
- SEMARNAT (2009). *Cambio Climático. Ciencia, evidencia y acciones. Serie ¿Y el medio ambiente?* México: SEMARNAT.
- SEMARNAT y INECC. (2012). *Quinta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático*. México: SEMARNAT.
- Tchobanoglous G., Theisen H., Vigil S. A. (1996). *Gestión integral de residuos sólidos*. Madrid: McGraw Hill.
- Thuiller W. (2007). Climate change and the ecologist. *Nature* (pp. 550–552). Vol. 448.
- Trenberth K.E. (2011). Changes in precipitation with climate change. *Climate Research* (pp. 123–138). Vol. 47. Issue 2.

CONCLUSIONES FINALES

El Cambio Climático representa un gran reto para la humanidad que hace necesario reducir de manera contundente y sostenida las emisiones de GEI, con el fin de minimizar, y en la medida de lo posible prevenir, los impactos que este fenómeno pudiera tener en la humanidad y los ecosistemas. Lo anterior, pone en evidencia la relevancia de priorizar la adaptación en aquellos sectores y grupos vulnerables, además de fortalecer los procesos de gobernanza que permitan una participación informada y efectiva de la población, así como favorecer el desarrollo y la reducción de la pobreza para reducir los riesgos frente al cambio climático. Reducir los riesgos al cambio climático no implica desatender las estrategias de mitigación, sino favorecer las sinergias entre las acciones orientadas a la mitigación y aquellas enfocadas a la adaptación, ya que algunas medidas de mitigación apoyan el cumplimiento de otros objetivos sociales y ambientales, favoreciendo la generación de co-beneficios.

Los aumentos proyectados en la temperatura media global para el 2100 comprende un rango de 2.5 a 7.8°C con base en los niveles preindustriales; situación que refleja una gran incertidumbre. Sin embargo, se sabe con certeza que los impactos y desafíos que enfrentarán los países del mundo serán diferentes, debido a su ubicación geográfica y a los recursos humanos, económicos y tecnológicos con los que cuenta cada país para impulsar acciones en materia de mitigación y adaptación. Desafortunadamente, con los esfuerzos que actualmente se están llevando a cabo en materia de mitigación y adaptación, se espera que, a finales del siglo XXI, la humanidad enfrente altos riesgos en materia de seguridad alimentaria, seguridad hídrica y pérdida de biodiversidad marina y terrestre. En este sentido, mayores esfuerzos para la reducción de los GEI y para fortalecer las capacidades de adaptación de los países son indispensables para reducir los impactos esperados,

los cuales podrían llegar a ser catastróficos e irreversibles si no se logra evitar el incremento de la temperatura en más de 2°C, lo cual cada vez parece más difícil de alcanzar.

La adaptación por sí misma, si bien contribuirá a reducir los efectos negativos del cambio climático tendrá resultados limitados, ya que algunos riesgos serán inevitables por lo que deben formar parte de las estrategias de desarrollo y combate a la pobreza. Sin embargo, lograr el objetivo de evitar el calentamiento del planeta por debajo de los 2°C con respecto a los niveles preindustriales requerirá de una reducción drástica en la generación de GEI, esto tendrá modificaciones importantes en los procesos productivos, así como en los hábitos de producción y consumo, dado que se proyecta que el crecimiento de las emisiones continuará como resultado del incremento demográfico, urbano y de las actividades económicas. Retrasar la implementación de las medidas necesarias para cumplir este objetivo, traerá como resultado que los costos de las estrategias que se lleven a cabo para hacer frente al cambio climático sean aún más costosas, por ende, para que se minimicen los costos de mitigación y adaptación se requiere no sólo el compromiso de las instituciones para conjuntar esfuerzos orientados al combate del cambio climático, también es fundamental fortalecer sus mecanismos de colaboración y cooperación, además de crear las condiciones que favorezcan la gobernanza y la inversión en tecnología e infraestructura para incrementar la resiliencia a este fenómeno. En este sentido, estas estrategias deben dirigirse no sólo al desarrollo e implementación de energías limpias y mayor eficiencia energética, sino también a modificaciones en el comportamiento y en los estilos de vida que son insostenibles.

Las estrategias de mitigación que se están implementando en el mundo, y que en México también están siendo analizadas por los diversos sectores, y para las cuales se está realizando investigación por parte de las universidades y de diversos centros, incluyen la descarbonización de la generación de la electricidad, explorando el uso de otras

energías renovables; mejorar la eficiencia energética; modificar los patrones de consumo de energía para reducir la demanda y adoptar medidas de ahorro energético; desarrollar dispositivos tecnológicos para la captura de CO₂; favorecer un manejo sustentable de los bosques y reducir la deforestación, así como realizar cambios en la dieta. Lograr la descarbonización de las economías será una medida clave para evitar un calentamiento del planeta, por encima de los 2°C, con respecto a los niveles preindustriales. Sin embargo, con base en el análisis realizado por los expertos en el Quinto Reporte del IPCC, alcanzar esta trayectoria es poco probable. Si bien la mitigación está enfocada en gran medida a estrategias de cooperación internacional, la adaptación está más centrada en el contexto local, por lo que mejorar la colaboración y coordinación entre las instancias involucradas en los diferentes niveles de gobierno es clave para obtener los resultados esperados.

Las *Reflexiones del Cambio Climático desde la Academia* es el producto del trabajo de un grupo de investigadores y académicos participantes en el Quinto Congreso Nacional de Investigación en Cambio Climático, realizado del 12 al 16 de octubre de 2015, cuyo objetivo es contribuir a la concientización sobre la problemática que el Cambio Climático podría generar en la sociedad y el medio ambiente si no se realizan las medidas de mitigación y adaptación necesarias. Cada uno de los capítulos que forman parte de esta obra, ilustran las estrategias que tanto el gobierno como el sector científico están llevando a cabo en materia, tanto de mitigación como de adaptación, para contribuir al combate del Cambio Climático.

El libro se organizó en tres secciones que permiten al lector un avance desde la perspectiva institucional y económica (primera sección), pasando por una revisión (segunda sección) de alternativas tecnológicas como estrategias de mitigación frente al Cambio Climático, y una tercera sección que evidencia algunas de las tantas tareas ambientales que se requieren solucionar en México para crear las condiciones que permitan fortalecer las capacidades de adaptación en el país.

Individualmente, el Capítulo 1, *Estrategias de mitigación y adaptación para enfrentar el cambio climático en la Ciudad de México*, concluye que ha habido grandes avances en las áreas de mitigación y adaptación, ya que ha crecido el desarrollo de energías alternativas, sistemas limpios en el transporte, reducción en los consumos de energía, concientización en la necesidad de mejorar la gestión de residuos, e incrementar las áreas de reforestación. Hace hincapié en la necesidad de profundizar las estrategias de adaptación de la Ciudad de México, recalcando la relevancia de la participación social para enfrentar de manera eficiente los impactos del Cambio Climático, así como favorecer las sinergias en las medidas orientadas a la adaptación como aquellas que buscan reducir la pobreza. Hasta el momento, la mitigación ha recibido más atención que la adaptación, fenómeno que se ha presentado no sólo en México sino en todo el mundo, lo cual hace necesario reconocer que muchos de los impactos que tendrá el cambio climático en los diferentes sectores y grupos vulnerables serán inevitables, dado que se espera que la temperatura continúe aumentando por lo menos en 0.9°C, a pesar de que los GEI se estabilicen en la atmósfera.

El Capítulo 2, *La dimensión institucional de los gobiernos locales en la adaptación al cambio climático*, realiza un estudio de los factores institucionales que determinan el reconocimiento del cambio climático como un problema público, observando la relevancia de la actuación de los gobiernos locales en la identificación de las dimensiones que sirven de base en el desarrollo de su propia capacidad institucional. El autor identifica que las ciudades forman parte de la causa del cambio climático, sin embargo, también forman parte de la solución, es decir, las ciudades responden y se adaptan a los efectos del Cambio Climático, mediante la generación de estrategias, políticas, programas, etc., con el fin de reducir en lo posible los impactos del Cambio Climático. Bajo estas circunstancias, el autor, analiza la importancia del fortalecimiento de las habilidades institucionales, en la solución de problemas, que los gobiernos locales deben desarrollar, con el fin de prevenir y reducir

los efectos sobre los diversos sectores de la población. En general, las dimensiones identificadas corresponden al ambiente técnico-burocrático del aparato estatal y a la participación ciudadana y actuación del gobierno. En el primer caso se encuentran la *prioridad gubernamental*, la *institucionalización del problema*, la *interdependencia gubernamental*, la *autoridad pública* y la *gestión interna*. En el segundo caso se incluyen la *responsabilidad compartida*, el *quehacer gubernamental*, la *trascendencia gubernamental*, la *interacción social* y la *responsabilidad gubernamental*. Finalmente, el autor concluye, que las diez dimensiones, en su conjunto, ponen en evidencia la existencia de interrelaciones al interior de la administración pública, así como al exterior por medio de la acción gubernamental, siendo las dimensiones *prioridad gubernamental* y *responsabilidad compartida*, la base para el reconocimiento del cambio climático en las políticas públicas.

En el Capítulo 3, *El costo socioeconómico de los desastres de origen climatológico en América Latina y el Caribe (1970-2008)*, se destaca que las medidas de adaptación y gestión del riesgo en la región deben reconocerse como sinérgicas y como parte de las estrategias del desarrollo sustentable. La realización de inversión en infraestructura hidráulica sugiere la necesidad de realizar un análisis costo-beneficio local para comparar el beneficio neto de la obra. El autor hace hincapié que los países de la región enfrentan crecientes costos económicos por más frecuentes e intensos eventos climáticos que han provocado desastres, lo cual ha repercutido en una reducción del PIB *per cápita*. Por otro lado, el autor concluye que, aunque no se han podido correlacionar los eventos climáticos del pasado con los actuales para obtener un coeficiente de predicción de intensidad o recurrencia, si es posible identificar otros factores que podrían incrementar los costos económicos privados y sociales como resultado de desastres climatológicos; entre dichos factores destacan: el incremento demográfico, los daños a los ecosistemas y las inversiones productivas con poca o nula valoración del riesgo. Por consiguiente, el autor invita a la reflexión para

implementar nuevas políticas para aumentar la resiliencia de los grupos sociales de menores ingresos, así como instrumentos económicos modernos y cambios tecnológicos, que permitan la adaptación a los nuevos escenarios de cambio climático que enfrenta la región.

En el Capítulo 4, *El mercado de bonos de carbono en México: realidad y perspectivas de desarrollo*, el autor, después de hacer un análisis comparativo entre los diversos mercados de carbono, concluye que hay un fuerte compromiso a nivel mundial por reducir las emisiones GEI, favoreciendo al mismo tiempo la conservación. En el caso de México, éste debe comprometerse a reducir las emisiones de GEI a un ritmo que permita que los sectores económicos puedan adaptar nuevas tecnologías más limpias, contando con los recursos financieros necesarios para realizar estas inversiones. Se sugiere el establecimiento de mecanismos de precios de bonos de carbono, de manera que se incentive el uso de créditos nacionales e internacionales. Asimismo, la asignación y distribución de los bonos de carbono por parte del gobierno, debe agilizarse mediante el diseño de una plataforma tecnológica, además de unificar el comercio de emisiones nacionales con el mercado de bonos de carbono de California, ya que geográficamente es el más cercano y existe una estrecha relación productiva. Fortalecer y desarrollar el mercado de bonos de carbono en México constituye una alternativa que no sólo favorecerá el que México pueda cumplir con sus compromisos en materia de mitigación, sino que también puede convertirse en una poderosa estrategia de adaptación que proporcione recursos económicos de manera sustentable a las comunidades para preservar sus bosques y selvas, además de promover la conservación de estas zonas y los servicios ecosistémicos que prestan.

El Capítulo 5, *Perspectivas en la construcción de capacidades tecnológicas para el sector eólico en México*, el autor concluye que parte de la solución para impulsar las tecnologías renovables, como la eólica, es reducir las actuales tendencias en el uso de las energías convencionales. Algunas de las limitantes para reducir el uso de energías convenciona-

les son los costos más elevados que implican los proyectos que emplean energías renovables. Los proyectos eólicos, por ejemplo, se enfrentan a problemas con la infraestructura de transmisión, altos costos de inversión, restricciones crediticias, problemas en el arrendamiento de tierras para el desarrollo, dificultades regulatorias y de legislación, además de la marcada predilección por empresas extranjeras sobre las empresas de origen nacional. Por ello, es necesario que en México se logre un acuerdo de colaboración tecnológica entre instancias educativas, científicas y productivas de manera que el sector eólico incremente sus capacidades. Sin embargo, no se deja de lado la relevancia que tiene en esta iniciativa la participación del Estado con mayores inversiones en el sector eólico que permitan incrementar la capacidad instalada y apoyar nuevos proyectos de investigación científica y tecnológica en materia de energías renovables y proyectos de generación distribuida. De acuerdo a las tendencias, el sector eólico ha visto incrementado su crecimiento en un 69.8%, en los últimos años, con un particular crecimiento del sector en los proyectos de autoabastecimiento (energía eléctrica). El autor señala que, desafortunadamente, en un futuro cercano es poco probable que las tecnologías que se están utilizando en otros países en el sector eólico puedan ser implementadas con prontitud en México. Además de la negativa de algunas empresas para capacitar empleados en el país y de seguir desarrollando su tecnología en el país de origen. No obstante, es conveniente mencionar, que hay algunas empresas de inversión extranjera en México no sólo están interesadas en comercializar esta tecnología, sino también apoyar la investigación y el desarrollo de tecnología en el país, con el fin de apoyar la formación de recursos humanos.

En el Capítulo 6, *Combustión Catalítica: una alternativa en la mitigación de gases de efecto invernadero, una perspectiva desde México*, se hace mención de algunas tecnologías empleadas para limitar la emisión de gases contaminantes a la atmósfera, como la pre-combustión y la post-combustión. En la tecnología de pre-combustión se eficiente

la relación aire-combustible, mientras que en la de post-combustión hay una separación del CO_2 puro para su posterior compresión; un proceso de pre-combustión es la combustión catalítica. La emisión de GEI requiere de esfuerzos tecnológicos que permita reducirlos lo más posible; uno de estos recursos es el uso del catalizador, el cual permite que la combustión catalítica reduzca los productos de la combustión por la reducción en el consumo de combustible, al incrementar la eficiencia de la oxidación del combustible. Una importante ventaja que ofrece la combustión catalítica es que es un método de bajo costo y eficiente a altas temperaturas. Una gran desventaja, es que se deben garantizar por lo menos 8000 horas de trabajo del catalizador para evitar que se eleven los costos, así como asegurar la estabilidad térmica durante el proceso. Así pues, un catalizador, para emplearse en la combustión catalítica, exige selectividad a bajas temperaturas, estabilidad térmica, resistencia mecánica y al desgaste, entre otros requerimientos. Los autores señalan que los metales como el Pt y Pd son los más ampliamente usados para la combustión de gas natural, estos soportados en materiales cerámicos como la alúmina. Consideran que este desarrollo tecnológico representa una alternativa para el sector industrial y automotriz que coadyuvaría a la mitigación. En un futuro cercano se esperan mayores avances en esta materia al ser el sector automotriz uno de los mayores generadores de GEI a nivel mundial.

En el Capítulo 7, *Quema de la caña de azúcar, carbono negro y cambio climático*, los autores analizan la quema de la caña de azúcar como práctica productiva, que es altamente contaminante y contribuye considerablemente a la emisión de GEI. De las partículas liberadas a la atmósfera, producto de la quema de los residuos de la caña, 60% de ellas son partículas finas ($\text{PM}_{2.5}$) del tipo aerosoles carbonáceos y 25% son partículas gruesas (PM_{10}). Las partículas finas se pueden depositar en el aparato respiratorio y pueden ser cancerígenos, además de modificar el forzamiento radiativo del planeta. Los resultados de esta investigación identificaron que los niveles de concentración de carbono negro en

PM_{2.5} (aerosoles de carbono) durante la época de zafra aumentaron en un 83.33%, mientras que las PM₁₀ se incrementaron en un 162.71%. Sin embargo, el problema no se reducía a la época de zafra, sino también a época de no zafra, porque, aunque la concentración de partículas se reducía, seguía habiendo cierta concentración de particulado en la zona, dado que es una zona agrícola que durante todo el año lleva a cabo quema de residuos agrícolas. Los autores coinciden que, para evaluar el impacto del carbono negro durante la quema de residuos agrícolas sobre el calentamiento global requiere la identificación de factores de emisión y el potencial de calentamiento global de las partículas de aerosol generadas. Actualmente, no existe un factor de emisión avalado por la IPCC para el carbono negro generado durante la quema de los residuos de la caña de azúcar, aunque se han hecho estimaciones al respecto. Modificar este tipo de prácticas requiere el uso de cosechas en verde, en donde se elimina la quema como parte del proceso; esta técnica requiere tecnología y sobre todo capacitación. Entre sus ventajas están que se ahorra agua, se mejora el ambiente, se conserva la materia orgánica del suelo y se aumenta la productividad. No obstante, es importante tomar en cuenta los niveles de dependencia económica de la comunidad para que puedan capacitarse en el uso de esta técnica sin que esto repercuta en la pérdida de sus empleos. En el Capítulo 8, *La gestión del Agua en la Ciudad de México ante el Cambio Climático*, el autor documenta que la Ciudad de México es la región del país con mayores probabilidades de sufrir los efectos del cambio climático, esto debido a su elevada concentración demográfica y los problemas ambientales que esto genera. Uno de los riesgos más importantes de la ciudad es el abastecimiento de agua a la población que vive y trabaja en la región. Bajo este contexto, el autor analiza de qué manera los efectos del cambio climático afectarán el abastecimiento de agua a la población de la Ciudad de México, qué medidas de adaptación se han previsto y cuáles se requieren poner en práctica. La *escasez de agua y dependencia a fuentes externas*, es una de las problemáticas

más difíciles de resolver, ya que las aguas propias de la zona están altamente contaminadas o sufren de sobreexplotación, lo que ha requerido importar agua de otras cuencas para tratar de cubrir las necesidades de una población altamente demandante. El cambio climático ha afectado la disponibilidad natural de agua, lo que se reflejará en prolongadas e intensas sequías, que se presentarán de manera más frecuente. El autor considera que, aunque el cambio climático incrementa la presión sobre la disponibilidad de agua en la ciudad, esto va acompañado de una pobre gestión del recurso. Ante este panorama, el gobierno local ha enfocado sus esfuerzos en poner en práctica acciones orientadas a la mitigación y adaptación por medio del Programa de Acción Climática Local (2008). Es de reconocer que la Ciudad de México, es de las más avanzadas en materia de mitigación y adaptación, con una reducción en la emisión de GEI de 3.76 MtCO₂e, entre 2000 y 2008. En particular, en el sector agua las acciones implementadas están orientadas a mejorar los sistemas de bombeo, eficientar los sistemas de distribución y disposición de agua, y trabajar en la reducción del consumo de agua. De acuerdo al autor, parte de la problemática en el éxito de la mitigación y adaptación en la Ciudad de México tiene que ver con la falta de conciencia, conocimiento y compromiso que se tiene sobre las causas y efectos del cambio climático a todos los niveles.

Los autores en el Capítulo 9, *Impactos del cambio climático en lagunas costeras mexicanas: evidencias, vulnerabilidad, adaptación y mitigación*, enfatizan la importancia de investigar los impactos que el cambio climático ha tenido sobre el manejo ecosistémico de las zonas costeras, y proponen algunas recomendaciones. Los ecosistemas costeros más sensibles son los humedales, cuya capacidad de amortiguamiento de zonas contaminadas no se han valorado como es necesario. La vulnerabilidad a la que se han expuesto los recursos costeros ante los impactos del cambio climático requiere distinguir entre vulnerabilidad natural y vulnerabilidad socioeconómica. La vulnerabilidad natural se refiere a objetos tangibles, mientras que la de tipo socioeconómica atañe a

las políticas públicas y componentes sociales que afectan el proceso de gestión. Todas las vulnerabilidades están relacionadas y permiten, cuando se estudia un ecosistema, distinguir los tipos de vulnerabilidades que puede sufrir dicho ecosistema. En este sentido, el autor documenta la vulnerabilidad natural y la debida al cambio climático sobre las lagunas costeras y estuarios. La mayoría de los efectos tienen su impacto en las cadenas tróficas del ecosistema, afectando además la integridad del hábitat de las especies propias del lugar. Otros factores que afectan los ecosistemas costeros en México, y que son efecto del cambio climático, son alteraciones en la temperatura media del agua, el nivel medio de las mareas, la creciente presencia de tormentas, y los huracanes y ciclones. El autor agrega además, algunos otros impactos, como el desplazamiento de humedales, intrusión salina en estuarios y acuíferos, pérdida de biodiversidad, erosión de la línea de costa, daño a la infraestructura costera, afectación a las pesquerías artesanales, riesgo de inundaciones y afectación de las actividades turísticas. El autor, concluye en la importancia de incluir dentro de los planes de desarrollo de las 17 entidades que cuentan con franja litoral en México, incluyan estrategias de mitigación de los efectos del cambio climático. Adicionalmente, sugiere que se defina una agenda de conservación de los ecosistemas más frágiles, así como un programa de mitigación de impactos para las comunidades pesqueras, para lo cual es fundamental integrar y hacer funcional los usos, los recursos y los usuarios de los ecosistemas. En las estrategias de adaptación se sugiere que los tomadores de decisiones deben tener en cuenta los potenciales impactos en los procesos productivos, la afectación de los asentamientos humanos y a la biodiversidad propia de las zonas de estudio.

En el Capítulo 10, *Políticas públicas, manglares y protección costera frente al cambio climático: el caso de La Encrucijada en Chiapas*, el autor aborda como caso de estudio el manglar más importante del estado de Chiapas, La Encrucijada, el cual ha sufrido un fuerte daño ambiental, producto de la falta de compromiso para implementar políticas pú-

blicas adecuadas para su salvaguarda. Para efectos de este estudio, el autor aplicó una metodología que consistió en la triangulación entre entrevistas cualitativas a expertos y un mapeo de atributos espaciales de los efectos ambientales producto de las políticas públicas. El mapeo se realizó mediante el sistema de información geográfica ArcGIS. La zona de estudio forma parte de la Reserva de la Biósfera “La Encrucijada”, se ubica en la planicie costera chiapaneca y cubre una superficie aproximada de 145,000 has, posee una importante diversidad biológica, desde manglares, tulares, matorrales costeros, residuos de selva perennifolia y una amplia variedad de especies animales. La zona por sus características provee importantes servicios ambientales para mitigar los efectos del cambio climático. El autor identifica dos causas principales que han dañado este manglar, la primera tiene que ver con la rectificación de cauces, lo cual ha provocado la reducción en la talla de los manglares y la disminución de su función regulatoria para atenuar las inundaciones; en segundo lugar, la creciente proliferación y cultivo de la palma africana, que es una especie introducida con fines de producción de aceite vegetal comestible y que provoca la desecación, aumento de salinidad, contaminación y compactación de suelos en la zona de los manglares. Propone la implementación de una red de monitoreo que permite cruzar información cualitativa (obtenida de expertos de la región) y cuantitativa (mapeo satelital), como una estrategia clave para la conservación de estos ecosistemas.

Finalmente, en el Capítulo 11, *Los residuos plásticos y el cambio climático*, los autores analizan la problemática que el uso indiscriminado de plásticos usados para envases y embalajes ha generado en la gestión de residuos y sobre saturación de los sitios de disposición. Aun cuando la mayoría de los plásticos pueden ser reciclados, solo para material como el polietilen tereftalato (PET) y el polietileno de alta densidad (PEAD) se han desarrollado cadenas de acopio y suministro. Se han desarrollado plásticos degradables, con la idea de que se reintegren al ciclo natural en periodos de tiempo corto. El desarrollo de

estos plásticos es producto de alteraciones químicas en las cadenas de polímeros que permite la rápida degradación del material. En México se ha promovido la producción de estos plásticos biodegradables, sin embargo, a juicio de los autores no se ha analizado a profundidad los posibles efectos de estos plásticos. Los autores concluyen que, aunque se modifique el uso de plásticos comunes por degradables, no se puede garantizar la reintegración de los componentes degradados a los ciclos de nutrientes; para que esto ocurra, es necesario el uso de plásticos degradables. Por otro lado, también se reflexiona que el uso de plásticos biodegradables puede seguir afectando en la generación de GEI, por ende, es importante reflexionar si realmente se está coadyuvando con el cuidado del medio ambiente con el uso de los plásticos biodegradables.

Mediante este libro, *Reflexiones del Cambio Climático desde la Academia*, autores de diversas disciplinas proporcionan una visión de las problemáticas que atañen al cambio climático y de los retos que como sociedad tendremos que enfrentar en materia de mitigación y adaptación para estar listos a los efectos negativos que se espera de este fenómeno.

Dra. Fabiola S. Sosa-Rodríguez
Coordinadora

Reflexiones del cambio climático desde la Academia

Se terminó de editar en 2018.