



CAMBIO CLIMÁTICO:

un futuro inexorable

Cambio climático: un futuro inexorable

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
División de Extensión de la Cultura



CONSEJO
EDITORIAL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DEL ESTADO DE HIDALGO

Cambio climático: un futuro inexorable



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DEL ESTADO DE HIDALGO

Pachuca de Soto, Hidalgo, México

2022

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

Octavio Castillo Acosta

Rector

Julio César Leines Medécigo

Secretario General

Marco Antonio Alfaro Morales

Coordinador de la División de Extensión de la Cultura

Marco Antonio Alfaro Morales

Director del Festival Internacional de la Imagen

Fondo Editorial

Asael Ortiz Lazcano

Director de Ediciones y Publicaciones

Joselito Medina Marín

Subdirector de Ediciones y Publicaciones

Primera edición electrónica: 2022

D.R. © UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

Abasolo 600, Col. Centro, Pachuca de Soto, Hidalgo, México, C.P. 42000

Dirección electrónica: editor@uaeh.edu.mx

El contenido y el tratamiento de los trabajos que componen este libro son responsabilidad de los autores y no reflejan necesariamente el punto de vista de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

ISBN: 978-607-482-726-2

Esta obra está autorizada bajo la licencia internacional Creative Commons Reconocimiento - No Comercial - Sin Obra Derivada (by-nc-nd) No se permite un uso comercial de la obra original ni la generación de obras derivadas. Para ver una copia de la licencia, visite <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>.



Hecho en México/*Printed in Mexico*

Publicación en línea 2023

Este libro fue dictaminado por pares académicos.

Se agradecen los comentarios y sugerencias del Cuerpo de Asesores ya que permitieron darle un mejor rumbo a esta publicación. De igual forma, se agradece profundamente a los dictaminadores del proceso evaluador, que con sus observaciones y comentarios enriquecieron esta obra.

Índice

Presentación	9
Adolfo Pontigo Loyola	
Nuestro mundo atraviesa un momento crítico	12
Otilio Arturo Acevedo Sandoval	
Desentrañando el cambio climático	15
Tillmann K. Buttschardt	
Reflexiones sobre la economía circular como inhibidor del cambio climático	26
Roberto Morales Estrella y Eduardo Rodríguez Juárez	
Complejidad económica y economía verde en México: buscando nuevos caminos para la sustentabilidad	51
Carla Carolina Pérez-Hernández	
Hacia una innovación social estratégica: construcción de una hoja de ruta de tendencias enfocada en el ecoturismo en México	76
Marisol Hernández Latorre y Carla Carolina Pérez-Hernández	
Nuevos retos y alternativas para la construcción de políticas públicas para enfrentar el cambio climático ante los resultados de la COP26	96
Sócrates López Pérez y Juan Bacilio Guerrero Escamilla	

Modelamiento matemático del calentamiento global a través de la actividad humana de 1880 a 2020	123
Juan Bacilio Guerrero Escamilla y Sócrates López Pérez	
Mitigación de la emisión de CO2 mediante REDD+: una estrategia para frenar el cambio climático y el potencial de almacenamiento de carbono en un bosque montano de Hidalgo, México	150
Numa P. Pavón, Judith Galván-Juárez y Jessica Bravo Cadena	
Aplicación de <i>machine learning</i> como aprendizaje automático para enfrentar los retos del cambio climático	188
Joselito Medina Marín y María Guadalupe Serna Díaz	
Situación actual y perspectivas de las emisiones de metano entérico en la producción ganadera	209
Juan Carlos Ángeles Hernández	
Importancia del manejo silvícola de los bosques para enfrentar el cambio climático. Estudio de caso: Parque Nacional El Chico, Hidalgo	236
Ramón Razo Zárate y Rodrigo Rodríguez Laguna	
Energía y cambio climático: fundamentos y alternativas	261
César Abelardo González Ramírez y Fabiola Velázquez Alonso	
Arte del cambio climático: la asignatura pendiente	284
Elisa Ontiveros Delgadillo	

Presentación

Adolfo Pontigo Loyola

El cambio climático es visible en todo el planeta, un efecto acelerado y devastador que amenaza todas las dimensiones de la vida en la biosfera, incluyendo, por supuesto, a la humanidad en la amplia complejidad de su existencia.

El cambio climático impactará el paisaje del mundo. Las regulaciones gubernamentales, como los requerimientos, sociales han debido readecuarse gradualmente a una dinámica económica cambiante que se enfrenta al desafío de modular el desarrollo, ante obstáculos de gran profundidad que ponen a prueba la vocación científica e investigativa a nivel global.

Los desastres naturales nos dejan entrever que el cambio climático tendrá consecuencias de alta envergadura en el sistema de seguridad social de cada país, en la economía, en la producción de alimentos, pero sobre todo en la vida ordinaria. Afecta el agua, el aire, la naturaleza, los hogares, las familias, la salud y los sistemas de salud.

Existe una gran cantidad de estudios que han predicho las causas y los efectos socioeconómicas de este proceso. También se han construido modelos de cambio climático que asocian las emisiones a factores económicos, su evolución y composición, así como el crecimiento demográfico, la tecnología disponible y sus formas de innovación e incluso de elementos sociales y culturales.

En este escenario, grave y complejo, la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH) se suma al llamado de otras universidades y actores sociales, alzando la voz ante este tema fundamental para el porvenir. En el marco del Festival Internacional de la Imagen, un festival de clase mundial

con más de una centena de personas que participan de diversas latitudes del mundo, se eligió en la última edición esta línea de trabajo con el fin de incentivar la reflexión y el intercambio de conocimiento.

La obra que se presenta, *Cambio climático: un futuro inexorable*, aborda, entre otros puntos de sumo interés para la pregunta por el futuro ambiental de nuestro planeta, un modelamiento matemático del calentamiento global a través de la actividad humana desde los años 1880 a 2020, en tanto que otro trabajo apunta a aplicaciones de *machine learning* para enfrentar los retos que se presentan en este ámbito; se discute un planteamiento de diversas vertientes en torno a la economía circular como un posible inhibidor del cambio climático, se suma un trabajo sobre la complejidad económica y la economía verde en México, como una alternativa que busca nuevos caminos para la sustentabilidad, y también se incluye el énfasis en los nuevos retos y alternativas para la construcción de políticas públicas así como la apuesta hacia una innovación social estratégica, dirigida, sobre todo, a construir una hoja de ruta de tendencias enfocada en el ecoturismo en México.

Otra visión diferente pero complementaria aboga por discutir la situación actual y las perspectivas de las emisiones de metano entérico en la producción ganadera, así como la necesidad de analizar la relación entre energía y cambio climático, a partir de fundamentos y alternativas; del mismo modo, se analiza el manejo silvícola de los bosques para enfrentar el cambio climático, junto a un estudio específico situado en el Parque Nacional El Chico, Hidalgo, México, y una mirada a partir de la posible mitigación de emisiones de CO₂ en un bosque montano del estado de Hidalgo.

Por último, el Festival Internacional de la Imagen no podía dejar de tener una mirada desde las bellas artes al problema mundial del cambio climático. Por ello se incluye la reflexión y el trabajo artístico del cambio climático como una tarea que ha sido enaltecida a través de la obra de grandes artistas de renombre a nivel internacional, algunos de los cuales, inclusive, tuvimos el honor de recibir en el contexto de las actividades del FINI 2022.

Este libro tiene el sello editorial de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, que se ha distinguido por publicar obras de alta calidad, dictaminadas mediante el sistema de doble ciego, con dictaminadores internos y externo a la institución. Adicionalmente, esta obra está disponible

para descarga gratuita en el portal de ciencia abierta de la UAEH, como una apuesta de fácil acceso a la discusión y al diálogo en torno a este punto clave de la conciencia y el saber de nuestro tiempo.

Primavera de 2022



Nuestro mundo atraviesa un momento crítico

Otilio Arturo Acevedo Sandoval

Nuestra sociedad es el resultado de un sistema que basa su estabilidad en el crecimiento económico, el cual tiene un costo enorme para el medio ambiente; este sistema que se mantiene vigente debido a la masa inconsciente, pero es insostenible a largo plazo pues supone una progresiva degradación del medio ambiente y de los ecosistemas.

Se sabe que el conocimiento y el aprendizaje son fundamentales para la renovación y la transformación. Hoy más que nunca, el conocimiento es una herramienta que permite dar respuestas a una serie de problemas que afectan a la humanidad, entre ellos, el deterioro climático, el cual se ha convertido en una de las amenazas más

preocupantes para el ambiente debido al gran impacto negativo que está causando a nivel mundial. Sus efectos son evidentes: sequía, inundaciones, oleadas de frío y de calor cada vez más severas y frecuentes a lo acostumbrado. A esto nos condena el actual modo de producción y consumo.

Nos encontramos ante un proceso de cambio en una dirección determinada, de deterioro ambiental. Ante una pandemia ambiental. Sin duda, puedo afirmar que la mayor dificultad está en alinear nuestros intereses personales y colectivos con un modelo de desarrollo más justo, equitativo, incluyente y con pleno respeto al medio ambiente.

En nuestra búsqueda de crecimiento y desarrollo, los seres humanos hemos ejercido demasiada presión sobre el medio natural, poniendo en peligro nuestra propia existencia. Se ha establecido que las actividades humanas a través de las industrias, la quema de combustibles fósiles, la deforestación, el cambio de uso de suelo, entre otras acciones, producen un aumento de gases efecto invernadero; de ellos, el principal es el dióxido de carbono (CO_2), un gas invisible que calienta el planeta Tierra mediante la absorción de infrarrojos y permanece en la atmósfera durante miles de años. Se estima que este es el responsable del 71.5% del efecto invernadero que ocasiona el calentamiento del clima.

Ciencia y conciencia, binomio inseparable para asegurar la sustentabilidad de nuestro mundo, son las únicas herramientas capaces de sacudir a una actual sociedad apocada y a la insolidaridad creciente como la actitud conformista y contemplativa que refuerza las asimetrías sociales. “Es probable que los próximos años sean los más importantes de la humanidad”. Es urgente despertar la conciencia global para crear sentimientos de ayuda mutua por un planeta que demanda urgentemente acciones que no pongan en peligro la existencia de la civilización humana.

La ignorancia se ha convertido en el virus de la sociedad: nos mantiene aferrados a un modelo anticuado y caduco, e impide el progreso colectivo e individual del ser humano. En esta incertidumbre, en esta inconformidad continua, se halla el milagro de nuestra especie: la capacidad de pensar, imaginar, crear, que nos convierte en seres únicos e irrepetibles, capaces de enfrentar la problemática ambiental, romper paradigmas, comenzar a regenerar una biosfera sana, algo que, a la larga, sin duda beneficiaría a la humanidad.

En las páginas del presente libro, *Cambio climático: un futuro inexorable*, destacados académicos e investigadores presentan un análisis desde una perspectiva de su área de conocimiento sobre la visión que tienen sobre el cambio climático y la crisis ambiental a la que se enfrenta la humanidad. A través de la lectura se busca socializar el conocimiento y que el lector —así como aquellos gobiernos que tengan la decisión de usar las herramientas que aquí se presentan para dictar políticas a favor del ambiente y de la comunidad que representan, al realizar acciones de transformación hacia una mejora cultural, social y ecológica—, convierta esta era solipsista en una travesía transitoria. De forma urgente, la sociedad tiene el compromiso y la responsabilidad de cambiar el actual modelo de desarrollo económico que afecta al ambiente y de tener claridad sobre los aspectos inherentes al desarrollo sostenible que garanticen su viabilidad a corto y mediano plazos.

El pensar racional y creativo del ser humano, junto con su libertad, son la batuta que abre camino hacia el progreso. A lo largo de la historia, la inagotable curiosidad humana no ha cesado de buscar las respuestas más remotas. “Nuestras manos son las únicas capaces de moldear los caminos del mañana”. La evidencia científica es inequívoca: el cambio climático constituye una amenaza para el bienestar de la humanidad y la salud del planeta.



Desentrañando el cambio climático

Tillmann K. Buttschardt

En 2022, aumentamos a un poco más de ocho billones. Ocho billones de individuos de una especie que habita y es parte de este planeta que llamamos Madre Tierra. Somos parte de esta tierra y le pertenecemos. Fuimos creados a través de la vida y con la muerte nos volvemos humus, que a su vez alimenta a la vida y crea no solo a especies como el *Homo sapiens* sino a otras también. Sin embargo, esta interrelación ha sido desconectada: Nos vemos como humanos por un lado y al medio ambiente por el otro. Ha sucedido una separación. Una división que no nos permite ver que el cambio climático está sucediendo, sino que nosotros mismos somos el cambio climático. ¿Qué quiero decir con esto? Si nos permitiéramos tener

una visión diferente del mundo y reconociéramos que cada una de nuestras acciones está conectada con el cambio climático, de una manera que motiva pero también mitiga el calentamiento global, y si imagináramos que somos ocho billones de personas quienes comemos, bebemos, viajamos, lavamos, nos comunicamos (digitalmente), entonces tendríamos más claro el poder que tiene este fenómeno del cambio climático.

Está claro para todos que, y especialmente para quienes negociaron en Sharm el Sheij, Egipto en la conferencia climática del 2022, es solo cuestión de tiempo para que tengamos que decir que la meta de limitar el calentamiento global a 1.5°C por encima de niveles pre-industriales ya no se adecua a la situación. Ya se cuenta con graves proyecciones que serán un gran reto ya que se espera un calentamiento de más de 3.5°C o incluso 4°C. Este nivel tendría consecuencias inmensas. Se asume que en este escenario la capa de hielo de Groenlandia se derretiría. Lo que tendría como efecto que los niveles del mar alrededor del mundo aumenten 7 metros. Este aumento en los niveles del mar no solo es una amenaza para las ciudades en las costas. Un aumento en los niveles del mar haría que el agua subterránea en muchas zonas costeras se salinice y por lo tanto no se pueda beber. Además, los suelos que se riegan con esta agua perjudicarían a la agricultura en muchas zonas costeras fértiles. La gente se moriría de hambre y no tendrían más que irse de esas ciudades y regiones afectadas. Una verdadera perspectiva distópica.

Que este panorama amenazador no nos agobie, estamos tratando de encontrar explicaciones sencillas que nos ayuden a que no nos sigamos preocupando. Más que nada buscamos frases de sosiego o creencias que nos dijeron en nuestra infancia en situaciones perturbadoras: "no será tan malo", "es algo que no podemos evitar", "así tiene que ser", "todo estará bien", "no te alteres", etc.. Para que no nos paralice el miedo, hemos encontrado formas y rituales para aguantar esta disyuntiva: Estamos en el aquí y el ahora, el valle de lágrimas, el lugar del odio, de la discordia, del pecado; si crees que hay un día de redención y un después de la muerte, los fieles serán redimidos. Por lo que, para no sentirnos paralizados en nuestra propia pasividad, hacemos un llamado a las instituciones fuertes, sí, esporádicamente a líderes fuertes, quienes debieran resolver esta discordancia en nuestra representación y

poner en orden las cosas para que nuestras antiguas creencias tengan sentido de nuevo: "así tiene que ser", "hay un orden para todo"... Sin embargo, todas estas acciones sustitutivas nos apartan de nosotros mismos y del maravilloso planeta del que somos parte. Ni los humanos ni la Tierra nos vamos a recuperar si continuamos con los hábitos que nos enferman. Esto comienza con la manera en la que comemos, el lugar de donde vienen los productos que comemos, la manera en la que se producen, la cantidad de toxinas que contienen, las intervenciones que se hagan a los sistemas de vida que produzcan los bienes, etc. La lista podría no tener fin. Nuestros estilos de vida están tan entrelazados con el ecosistema que ya no entendemos a todos los ecosistemas como una sola entidad. Precisamente porque es un sistema, siempre tiene un efecto y un ciclo de retroacción en todo lo que hacemos y no hacemos.

Para no desesperar y ser capaces de contemplar mejor lo que está pasando, los autores de la Ecología Profunda sugieren cuatro pasos: Primero: se trata de agradecer que nacimos en este rico y maravilloso planeta, y concebir a las cosas como son y no como deberían de ser según nuestras creencias o la lógica que defienden las sociedades industrializadas. Para esto se requiere una mentalidad sin juicios ni prejuicios, hacer una pausa en el aquí y el ahora. Una de las claves para esto es nuestra propia respiración. La meditación y las prácticas contemplativas ayudan para esto. Estas prácticas nos permiten dar el segundo paso: ser empáticos con una "madre tierra que sufre", permitiendo el dolor y la desesperación ante la destrucción y lo que nosotros los humanos le estamos haciendo a la tierra. Lo que nos lleva al tercer paso: ver al mundo con nuevos ojos. Con unos ojos que anteriormente estaban vendados por nuestra "propia forma de pensar". Una nueva vista del mundo en la que se le da a cada ser viviente los mismos derechos que a los humanos, una visión que sea igualitaria. Podemos ver que el mundo no es un mundo complicado ni lleno de problemas, sino complejo y lleno de soluciones. Por lo tanto, el cuarto paso es: activarse. Vamos hacia adelante. Esto está regularmente orientado hacia las condiciones de vida y no sigue la forma de pensar mecánica de los últimos 200 años.

En este "trabajo que reconecta" yace la clave a la que también se refirió el escritor japonés Daisaku Ikeda: "Cuando nosotros cambiamos, el mundo

cambia. La clave para todo cambio está en nuestra propia transformación, cambiar nuestro corazón y nuestra mente. Esto es la revolución humana. Todos tenemos el poder de cambiar. Cuando nos damos cuenta de esta verdad, podemos manifestar ese poder donde sea, en cualquier momento y en cualquier situación".

Así como la humanidad ha propiciado el cambio climático, también tiene el poder de mitigarlo. Es de gran ayuda cuando pensamos de manera diferente, cuando se nos presenta la verdad de manera que no nos genera miedo: esto es lo que hacen los trabajos de los artistas que se exhiben en el FINI.

El festival es un espacio seguro en el que podemos desentrañar científicamente la complejidad del ser y el fenómeno del cambio climático, como lo he hecho en mis pláticas durante el FINI, y nos da la confianza de acercarnos al antiguo conocimiento espiritual de las comunidades indígenas en las que México es tan rico.

Estos elementos necesitan conectarse a instituciones como la UAEH, con visibilidad global a través de la cual podemos vislumbrar un mundo más allá de lo humano.

Unraveling climate change

Tillmann K. Buttschardt

In 2022, we have grown to over eight billion. Eight billion individuals of one species who inhabit and are a part of this planet we have called Mother Earth. We are of this earth and we belong to it. We are created through life and after our death we'll become humus, which in turn nourishes life and produces not only individuals of the species *Homo sapiens* but also others. But this interconnectedness has been detached: We see ourselves as human beings here and our environment there. A separation has happened. A division that obscures our view that climate change is not happening somewhere out there, but that we ourselves are the climate change. What do I mean by that? If we allow ourselves a different view of the world and recognise that every single action we take is connected to climate both in a way that can drive or mitigate global warming and if we also imagine that we are eight billion people who all eat, drink, travel, wash, communicate (digitally), then it becomes clear how powerful this phenomenon of climate change is.

It is clear to all, and especially to those who negotiated in Sharm El Sheik at the 2022 climate conference, that it is only a matter of time before we have to say that the goal of limiting global warming at 1.5°C above pre-industrial levels is no longer adequate to the situation. There are already serious projections that it will be very challenging and that a warming up to 3.5°C or even 4°C is likely. This level would have immense consequences. It is assumed in this scenario that the Greenland

ice sheet would melt. This, in turn, would have the effect of raising sea levels worldwide by 7 metres. A rise in sea level does not only threaten the cities along the coasts. The increased level of sea water will make the groundwater in many coastal plains saline and thus undrinkable. Furthermore, the soils irrigated with this water will impair agriculture in many fertile coastal plains. People will starve and will have no choice but to leave the destroyed cities and regions. A truly dystopian perspective.

Thus that this threatening outlook does not overwhelm us, we try to find simplifying explanations that help us not worry us further. Mostly we find appeasements or beliefs that we were told in our own childhood in disturbing situations: "it won't be so bad", "we can't help it", "it has to be like this", "everything will be alright", "don't get upset" etc.. In order not to freeze in fear, we have found forms and rituals that allow us to endure this dichotomy: We are in the here and now, the valley of tears, the place of hatred, discord, sin - but if you only believe there is redemption day and after death the faithful will be redeemed. So that we don't feel completely paralysed in our passivity, we call for strong institutions, yes, not infrequently for strong leaders, who are supposed to resolve this dissonance on our behalf and put things in order so that our old beliefs work again: "it has to be this way", "there's an order to everything" ... However, all these substitute actions alienate us from ourselves and the wonderful living planet of which we are a part. Neither humankind nor the Earth will recover if we continue to maintain the habits that make us ill. This starts with the way we eat, where the products we eat come from, how they were produced, how many toxins they contain, what interventions were made in living systems to produce the goods etc. The list could go on and on. Our lifestyles are so closely interwoven with ecosystem services that we often no longer understand the totality of ecosystems as one single entity. Precisely because it is a system, it always has an effect and a feedback loop in everything we do and not do.

In order not to despair and to be able to take a better look at what is happening, the authors of Deep Ecology suggest four steps: First, it is about perceiving out of gratitude that we were born into this rich and wonderful world and perceiving how things really are and not how

they have to be because of our beliefs or the logic that industrial growth society postulates. This requires a non-judgemental and non-prejudiced mindfulness, a pausing in the here and now. One key to this is one's own breath. Meditations or contemplative practices assist in this. These practices open us to the second step, empathising with the "crying mother earth", allowing grief and despair in the face of destruction and what we humans are doing to the earth. This leads to the third step, which is to seeing the world with new eyes. With a view that was previously blinded by our "being separate" mindset. A new view of the world that gives every living being the same rights as humans, a view that is egalitarian. We can see that the world is not complicated and full of problems, but complex and full of solutions. Thus, in the fourth step, we come to action. We are going forth. This is consistently oriented towards the conditions of the living and does not follow the mechanistic thinking of the last 200 years.

In this "work that reconnects" lies a key that the Japanese writer Daisaku Ikeda also addressed: "When we change, the world changes. The key to all change is in our inner transformation - a change of our hearts and minds. This is human revolution. We all have the power to change. When we realize this truth, we can bring forth that power anywhere, anytime and in any situation."

Just as humanity has helped to bring about climate change, it has the power to mitigate it. It helps us when we are thrown out of our tunnels of thought, when we are confronted on a level that does not generate fear: these are the works of the artists as shown at the FINI festival.

It gives us a secure base when we scientifically unravel the complexity of being and the phenomenon of climate change, as I have done in my lectures during the FINI Festival, and it gives us a confidence when we realise that we can draw on ancient spiritual knowledge from indigenous communities, of which Mexico is so rich.

These elements need to be connected at institutions like UAEH is one of those and taken out into the world if we are to move into a good future with the more-than-human world.

Klimawandel entwirren

Tillmann K. Buttschardt

Im Jahr 2022 sind wir angewachsen auf über acht Milliarden. Acht Milliarden Individuen einer Spezies, welche diesen Planeten, den wir selbst Mutter Erde genannt haben, besiedeln und die ein Teil davon sind. Wir sind von dieser Erde und sind ihr zugehörig. Wir werden aus dem Leben erschaffen und werden nach unserem Tod zu Humus, der wiederum das Leben nährt und nicht nur Individuen der Gattung *Homo sapiens* hervorbringt. Doch diese Verbundenheit hat sich gelöst: Wir sehen uns Menschen hier und unsere Umwelt dort. Es ist eine Trennung eingetreten. Eine Spaltung, die uns den Blick darauf verstellt, dass der Klimawandel nicht irgendwo da draußen stattfindet, sondern dass wir selbst der Klimawandel sind. Was meine ich damit? Wenn wir uns eine andere Sicht auf die Welt gestatten und anerkennen, dass jede einzelne Handlung, die wir ausführen u.a. mit dem Klima verbunden ist sowohl in einer Art und Weise, welche die Erderhitzung antreiben kann oder abschwächen kann und wenn wir zugleich imaginieren, dass wir ja acht Milliarden Menschen sind, die alle essen, trinken, reisen, waschen, (digital) kommunizieren dann wird deutlich, welche Wucht hinter diesem Phänomen Klimawandel steht.

Allen und vor allem jenen, die in Scharm El Sheik bei der Klimakonferenz 2022 verhandelt haben, ist klar, dass es nur noch eine Frage der Zeit ist, bis wir sagen müssen, dass das Ziel, die Erderwärmung bei 1,5°C gegenüber der vorindustriellen zu begrenzen nicht mehr der Lage angemessen ist. Es sind bereits jetzt seriöse Prognosen vorhanden,

dass es sehr herausfordern werden wird und eine Erhitzung bis 3,5° C oder sogar 4°C wahrscheinlich ist. Dieses Level hätte immense Folgen. Es wird in diesem Szenario davon ausgegangen, dass der Grönländische Eisschild abschmelzen würde. Das wiederum hat Auswirkungen das der Meeresspiegel weltweit um 7 m ansteigen würde. Ein Anstieg des Meeresspiegels bedroht ja nicht nur die an den Küsten liegenden Städten. Das erhöhte Niveau des Meerwassers wird in vielen Küstenebenen das Grundwasser versalzen und damit ungenießbar machen. Weiterhin werden die Böden, die mit diesem Wasser bewässert werden in vielen fruchtbaren Küstenebenen die Landwirtschaft beeinträchtigen. Menschen werden hungern und es wird ihnen nichts anderes übrig bleiben, als die zerstörten Städte und Regionen zu verlassen. Eine wahrhaft Dystopische Perspektive.

Damit uns diese nicht überwältigt, versuchen wir einfache Erklärungen zu finden, die uns nicht weiter beunruhigen. Meist sind es Beschwichtigungen oder Glaubenssätze, die uns in unserer eigenen Kindheit in derart verstörenden Situation gesagt worden sind: "es wird schon nicht so schlimm werden", "wir können ja nicht anders", "das muss so sein", "das hat schon alles seine Ordnung", "reg Dich nicht auf" etc.. Damit wir nicht in Angst erstarren haben wir Formen und Rituale gefunden, die uns diesen Zwiespalt aushalten lassen: Hier ist die Erde, das Jammertal, der Ort von Hass, Zwietracht, Sünde - dort jedoch gibt es einmal die Erlösung und nach dem Tod werden die Gläubigen erlöst werden. Damit wir uns in unserer Passivität nicht vollständig gelähmt fühlen rufen wir nach starken Institutionen, ja, nicht selten nach Führern, die stellvertretend für uns diese Dissonanz auflösen und die Dinge ordnen sollen, damit unsere alten Glaubenssätze wieder funktionieren: "das muss so sein", "das hat schon alles seine Ordnung" ... Alle diese Ersatzhandlungen entfremden uns jedoch von uns selbst und dem wunderbaren Planeten, dessen Teil wir sind. Weder wir selbst noch die Erde werden gesunden, wenn wir die krank machenden Gewohnheiten weiter beibehalten. Dies beginnt bei der Art und Weise wie wir uns ernähren, woher die Produkte stammen, die wir essen, wie sie erzeugt wurden, wie viele Giftstoffe sie enthalten, welche

Eingriffe in lebendige Systeme vorgenommen wurden, um die Waren zu erzeugen etc. Die Liste ließe sich lange fortsetzen. Unsere Lebensstile sind so eng verwoben mit den ökosystemaren Leistungen, dass wir oft die Gesamtheit der Ökosysteme als Einheit nicht mehr verstehen. Eben weil es ein System ist, hat es immer eine Wirkung und eine Rückkoppelung bei allem was wir tun und lassen.

Um nicht zu verzweifeln und einen besseren Blick auf das Geschehene werfen zu können schlagen die Autorinnen und Autoren der Tiefen Ökologie vier Schritte vor: Zunächst geht es um aus der Dankbarkeit heraus wahrzunehmen, dass wir in diese reichhaltige und wunderbare Welt hineingeboren wurden und wahrzunehmen, wie die Dinge wirklich sind und nicht, wie sie vor unseren Glaubenssätzen zu sein haben oder der Logik der industriellen Wachstumsgesellschaft postuliert werden. Hierzu ist eine vorurteilsfreie und nicht bewertende Achtsamkeit, ein verharren im Jetzt notwendig. Ein Schlüssel hierzu ist der eigene Atem. Meditationen oder kontemplative Praktiken assistieren hierbei. Diese Praktiken öffnen uns für den zweiten Schritt, das Mitfühlen mit der "weinenden Mutter Erde", das Zulassend er Trauer und Verzweiflung und Zerstörung angesichts dessen, was wir Menschen der Erde zufügen. Daraus resultiert der dritte Schritt, nämlich der, die Welt mit neuen Augen zu sehen. Mit einem Blick, der zuvor durch unser "getrennt sein" geblendet war. Eine neue Sicht auf die Welt, die jedem Lebewesen, dieselben Rechte einräumt wie den Menschen, ein Blick der egalitär ist. Wir können sehen, dass die Welt nicht kompliziert und voller Probleme, sondern komplex und voller Lösungen ist. So kommen wir in dem vierten Schritt ins Handeln. Dieses ist konsequent an den Bedingungen des Lebendigen ausgerichtet und folgt nicht dem mechanistischen Denken der letzten 200 Jahre.

In dieser "Arbeit, die wieder verbindet" liegt ein Schlüssel, den auch der japanische Schriftsteller Daisaku Ikeda angesprochen hat: "When we change, the world changes. The key to all change is in our inner transformation - a change of our hearts and minds. This is human revolution. We all have the power to change. When we realize this truth,

we can bring forth that power anywere, anytime and in any situation."

Genau so, wie die Menschheit dazu beigetragen hat, den Klimawandel hervorzubringen, genau so ist sie in der Lage diesen wieder einzudämmen. Es hilft uns, wenn wir aus unseren Denktunneln herausgeworfen werden, wenn wir konfrontiert werden auf einer Ebene, die nicht Angst erzeugt: Das sind die Werke der Künstlerinnen und Künstler, wie sie beim FINI Festival gezeigt wurden. Es gibt eine sichere Basis, wenn wir auf wissenschaftliche Art die Komplexität des Seins und des Phänomens Klimawandels entwirren, wie ich das in meinen Vorträgen getan habe und es gibt uns eine Zuversicht, wenn wir erkennen, dass wir auf altes spirituelles Wissen von indigenen Gemeinschaften zurück greifen können, von dem Mexico so reich ist.

Diese Elemente müssen an einer Universität verbunden und in die Welt getragen werden, wenn wir mit der mehr-als-menschlichen Welt in eine gute Zukunft gehen wollen.



Reflexiones sobre la economía circular como inhibidor del cambio climático

*Roberto Morales Estrella
Eduardo Rodríguez Juárez*

Introducción

La economía es un proceso que aplica el conocimiento para sobrevivir, transformando lo existente en la naturaleza en bienes satisfactorios, desde la organización tribal-comunitaria hasta las sociedades tecnológicas-digitales, para lograr una integración sustentable biodiversidad-economía global.

Los efectos del cambio climático constituyen uno de los problemas más graves que enfrenta la presente generación. Reuniones y acuerdos tomados no han logrado cambiar el modelo económico capitalista cuya operación se lleva

a cabo en un 98% con combustibles fósiles y la generación de desechos contaminantes, lo que ha propiciado el calentamiento en el planeta, que ya alcanza el 1.1°C a nivel global. Esto ha transformado ecosistemas en climas adversos a todo tipo de vida, con olas y domos de calor, sequías, inundaciones, tormentas invernales e incendios, lo cual ha propiciado la desaparición de comunidades enteras y generado migraciones masivas.

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2016) construyó una visión científica de las repercusiones generadas por el cambio climático, presentes y futuras, medio ambientales y socioeconómicas, precisando que el calentamiento global debe estar en 1.5°C en todo el planeta, como resultado de la susceptibilidad del clima de la tierra a la influencia de las actividades humanas (Sherman *et al.*, 2020). El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático ha estimado que “las actividades humanas han causado un calentamiento global de 1.0°C con respecto a los niveles preindustriales, con un rango probable de 0.8°C a 1.2°C. Es probable que el calentamiento global llegue a 1.5°C entre 2030 y 2052 si continúa aumentando al ritmo igual (IPCC, 2019, p. 6). Este grupo está integrado por 243 científicos de 66 países y fue organizado por la ONU en 1988 para la evaluación del cambio climático.

El desarrollo tecnológico e iniciativas como la transición hacia “neto-cero” convergen con el modelo de economía circular que, si bien data de 1966, ha cobrado relevancia a partir de la década de 1970. Su aplicación a nivel global ha sido impulsada por Walter Stahel y la Ellen MacArthur Foundation (2021).

A partir de la revisión de los conceptos y la estructura de la economía circular, se considera que esta parte del principio económico de lograr el aprovechamiento de los productos durante su ciclo de vida, desde las materias primas y los procesos tecno-productivos hasta el consumo, transformando los resultados en nuevas materias primas, vía la remanufacturación. La economía circular plantea la transformación y la creación de ciudades climáticamente neutrales, socialmente prósperas e incluyentes.

Caer en desánimo no nos ayuda para enfrentar los efectos del cambio climático. Necesitamos reducir la vulnerabilidad de las naciones más pobres. Pasar de una economía capitalista generadora de desechos a la aplicación

del esquema de la economía circular resulta imprescindible e impostergable, ya que de no ser así la existencia de la humanidad entrará en una ruta de probable extinción.

La economía circular y el contexto del libre mercado

Crear una economía circular en una economía establecida donde prevalecen el llamado libre mercado y una efervescencia bélica en la geopolítica para la redistribución de la *technobegemonía* es una tarea bastante compleja para la sociedad en general, sobre todo para las economías emergentes, en la lucha por lograr la transición a *ciudades climáticamente neutrales y socialmente prósperas*. Sin lugar a dudas, este proceso de transformación requiere de esfuerzos globales y una guía, para lo cual la Fundación Ellen MacArthur, en conjunción de esfuerzos con las ciudades líderes de Copenhague, Glasgow, Amsterdam, Toronto y Nueva York, está impulsando el programa Circular Innovation City Challenge (2022) a fin de resolver o por lo menos disminuir los efectos del cambio climático. Rediseñar la vida económica conlleva aplicar una nueva dinámica de la creatividad en las actividades económicas, cómo extraemos y nos hacemos llegar de las materias primas, la forma en que las transformamos para que nos sean útiles en la satisfacción de nuestras necesidades, que son cada vez más cambiantes, cómo aplicamos las tecnologías en los procesos de transformación para después realizar el manejo de los desechos. Desde esta perspectiva, en el esquema de la economía circular identificamos tres principios fundamentales: eliminación de desechos y la contaminación, circulación de productos y materiales, y regeneración de la naturaleza Ellen MacArthur Foundation (2021).

Entender a la economía circular implica asimilarla como un proceso de transición a partir del modelo lineal que se identifica en el esquema de la libertad de mercado (neoliberal), que consiste en producir, consumir y desechar. En este esquema, la extracción de las materias primas no considera los impactos ambientales, generando contaminación y depredando los recursos naturales sin que importe si se llega a su sobrexplotación, dado el tipo de tecnologías que se aplican, como el *fracking*.

La producción bajo el modelo capitalista de libre mercado se realiza sobre la base de la mayor rentabilidad posible, omitiendo los parámetros

de contaminación. Para hacer llegar los productos a los mercados para su consumo, ni siquiera se prevé que los empaques sean reutilizables, por lo que si el bien o la mercancía no se consumen en su totalidad se transforman en desechos y, consecuentemente, producen contaminación.

La economía circular es un concepto que establece las bases para que todas las actividades económicas estén identificadas y articuladas en torno al concepto de sustentabilidad, desde la extracción de las materias primas, sin dañar su condición regenerativa, en caso de recursos renovables, y sin dañar el entorno, cuando se trata de recursos no renovables. Su transformación a través de los procesos productivos se realiza bajo el diseño de reutilización, cuidando incluso los empaques. En la norma ISO-14040 (ISO, 2006) se estipula la regulación referente al análisis del ciclo de vida, calculando el perfil ambiental de un solo producto o servicio. De hecho, es una herramienta para realizar la comparación entre productos.

Algunos expertos definen a la economía circular como un modelo reconstituyente y regenerativo con base en el diseño (Cerdá, 2016), que mantiene a los productos y sus componentes en sus aplicaciones más intensas posibles y procura el óptimo aprovechamiento de los bienes y servicios, pero de manera sustentable e integral, dado que los desechos se transforman en materiales que pueden remanufacturarse. Según Prieto Sandoval *et al.* (2017), la economía circular es un flujo cíclico para la extracción, transformación, distribución, uso y recuperación de los materiales de productos y servicios disponibles en el mercado.

Fueron el análisis de flujos de la materia (Jiménez Cornejo, 2015) y la teoría general de sistemas de Kenneth E. Boulding (2007), que data de 1966, la base para la construcción del concepto de economía circular. Boulding partía de la consideración jerárquica de niveles que van desde los sistemas estáticos hasta los complejos niveles de la vida en general; el enfoque también incluye a la sociedad en general y al individuo en su contexto social.

La evolución del concepto ha sido contundente al grado de que diversas organizaciones productivas han iniciado la aplicación de los criterios de la economía circular, dando una nueva dimensión a las estrategias de producción y de inserción de sus productos en los mercados. De este modo se incluye en la operación general de las empresas la perspectiva de la

sostenibilidad en sus objetivos estratégicos. También hay naciones que han adoptado a la economía circular. La Comisión de la Unión Europea tomó la iniciativa para adoptar la economía circular en junio de 2014 (Iles, 2018). En el continente americano el mejor ejemplo es la creación de la Coalición Regional de Economía Circular, anunciada el 1 de febrero de 2021 en el evento virtual de la XXII Reunión del Foro de Ministros de América Latina (Ellen MacArthur Foundation, 2021); el propósito de la Coalición fue crear una visión común para la transición hacia la economía circular en América Latina y el Caribe, a través de una plataforma tecnológica para la colaboración intersectorial y la transferencia de conocimientos y experiencias, a fin de propiciar y facilitar la comprensión de los criterios básicos de la economía circular.

Esta Coalición Regional de Economía Circular no es un organismo aislado, ya que cuenta con el respaldo del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), así como con la participación estratégica de organismos como la Fundación Ellen MacArthur, el Centro y Red de Tecnología del Clima (CTCN), el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), la Fundación Konrad Adenauer (KAS), la Coalición de la Plataforma para Acelerar la Economía Circular (PACE), la ONUDI y el Foro Económico Mundial de Davos. Se definió un comité directivo con carácter rotativo como la entidad coordinadora; dicho Comité inició su organización con la participación de representantes de alto nivel de los gobiernos de Costa Rica, Perú y República Dominicana.

México no se queda atrás, dado que el 18 de noviembre de 2021 el Senado de la República aprobó el dictamen por el que se expide la Ley General de Economía Circular, la cual es reglamentaria a lo dispuesto en los artículos 4, párrafo quinto, 25, párrafo séptimo, y 73, fracción XXIX-G, de la *Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos*, en materia de protección al medio ambiente, desarrollo sustentable, preservación y restauración del equilibrio ecológico. Dicha ley es congruente con la Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, así como con la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (Cámara de Senadores, 2021). Su objetivo primario es promover la eficiencia en el uso de los productos, servicios, materiales y materias primas secundarias a través

de la reutilización, el reciclaje, el rediseño y cualquier criterio de economía circular, haciéndola aplicable a todas actividades económicas.

Los efectos del cambio climático constituyen el problema más grave que enfrenta la presente generación. El grupo de expertos que participan en el IPPCC informó que, como consecuencia del retraso, por parte de las naciones, de acciones de política pública en materia de reducción de emisiones de carbono, principalmente por el uso de combustibles fósiles, el planeta ya llegó a un calentamiento global de 1.1°C a nivel global. El grupo de expertos del IPCC considera que este es el “aumento estimado de la temperatura media global en superficie promediada durante un período de 30 años, o durante el período de 30 años centrado en un año o decenio particular, expresado en relación con los niveles preindustriales a menos que se especifique de otra manera. Para los períodos de 30 años que abarcan años pasados y futuros, se asume que continúa la actual tendencia de calentamiento multidecenal” (IPCC, 2019, p. 26), lo que ha generado olas y domos de calor, sequías, inundaciones, tormentas invernales e incendios en zonas como Estados Unidos, Canadá, Alemania, China, Siberia, Turquía y Grecia. Cabe precisar que estos fenómenos climatológicos desaparecen a pueblos enteros, provocando migraciones masivas de miles de personas sin hogar ni sustento, por lo que ya hay daños irreversibles.

Estamos frente a un gran riesgo de supervivencia de la humanidad. Según Piers Forster (citado por Plumer y Fountain, 2021) de la Universidad de Leeds, y miembro participante del IPPCC, es probable que la situación se agrave aún más dentro de 20 o 30 años, de no hacer lo necesario para detener el incremento en el calentamiento del planeta. Este experto estima que más de mil millones de personas podrían sufrir olas de calor, lo que pondría en riesgo su vida, mientras que la crisis del agua ya se inició, sin lugar a dudas la guerra del agua escalará a nivel global y esto será una emergencia planetaria en el corto plazo. Detener la privatización del agua sería una medida a aplicar a nivel global, dado que el agua es un derecho humano y no una mercancía. Pero la privatización ya está avanzando cada vez más, sobre todo entre empresas como las que procesan y venden los llamados refrescos embotellados y las cerveceras. En este proceso destacan trasnacionales como Coca-Cola y Modelo, en nuestro caso.

La desaparición de las especies aumentará, modificando los ecosistemas y creando condiciones adversas a la vida humana, así como el daño a los arrecifes de coral, donde surge el plancton, que es base alimenticia de la vida marina. Sin productos pesqueros ni agrícolas, ¿de qué se alimentará la humanidad? ¿Acaso la chatarra será la única opción? Luego entonces, todo habitante del planeta tendrá diabetes e hipertensión, sobre todo los más los pobres.

Un grupo de investigadoras del Centro de Resiliencia de Estocolmo realizaron el estudio denominado “La Contaminación química ha superado el límite seguro para la humanidad” (Cornell, 2022) en el que describen cómo la producción y liberación de productos químicos ha generado una contaminación de forma tal que amenaza la estabilidad de los ecosistemas globales de los cuales depende la humanidad.

La contaminación de los plásticos, junto a 350 mil productos químicos sintéticos, incluidos los pesticidas, además de compuestos industriales y antibióticos, según los investigadores de este Centro de Resiliencia, ha cruzado ya un límite planetario, a tal grado que los cambios provocados empujan al planeta fuera del entorno estable de los últimos diez mil años. Los científicos muestran en su investigación que los riesgos se han desbordado: los químicos CFC (clorofluorocarburos derivados de los hidrocarburos, o sea, combustibles fósiles) destruyen la capa de ozono y exponen al planeta a los dañinos rayos ultravioleta. Para la doctora Bethanie Carney Almorot (2022), miembro del grupo de investigación de la Universidad de Gotemburgo, la masa total de plásticos excede la masa total de todos los mamíferos vivos del planeta; esto es un indicador bastante claro de que hemos cruzado un límite, explicó. En conjunto, los científicos reconocieron que el peso de la evidencia apuntaba a una ruptura del límite planetario. La historia de la contaminación química y de los plásticos es la historia de cómo la sociedad industrializada ha venido cambiando al planeta en aras de la rentabilidad y de una desmedida capitalización y concentración en pocas manos de las ganancias financieras. La historia del deterioro ambiental de la Tierra es la historia de la desigualdad social.

El límite planetario (Rockström *et al.*, 2009) es un concepto que delimita un ámbito de actividad segura para los seres humanos respecto a la resiliencia de la biosfera, es decir, establece la capacidad de la biosfera

para recuperarse de las perturbaciones generadas principalmente por las actividades humanas, fundamentalmente las económicas, y en específico las industriales. Para recuperar la estabilidad, en función de la capacidad de resiliencia ambiental, bajo este concepto de límite planetario se integran nueve procesos que mantienen la integridad del sistema planetario, los cuales son: cambio climático, biodiversidad, cambios en el uso del suelo, uso del agua dulce, flujos bioquímicos, acidificación de los océanos, aerosoles en la atmósfera, destrucción de la capa de ozono y contaminación química.

En esta última se incluye la contaminación de plástico, como ya se mencionó, cuya producción se estimó en 2016 entre nueve y 23 millones de toneladas métricas al año. Si no revertimos estos volúmenes de producción, se duplicarán en 2025 (MacLeod, 2021). De esta emisión de plásticos, solo se recicla el 9% y el 12% se incinera, por lo que el 79% contamina grandes extensiones de territorios y de aguas tanto dulces (ríos y lagos) como los mares. Las evidencias son contundentes: el 100% de las tortugas tienen plástico en sus estómagos y se estima que también el 59% de las ballenas, el 36% de los lobos marinos y el 40% de las aves marinas (Toledo, 2022).

Investigadores de Suecia, Noruega y Alemania coordinados por el doctor Mathew MacLeod (2021), de la Universidad de Estocolmo, advirtieron en un estudio que los niveles de emisiones de plásticos a nivel mundial pueden desencadenar efectos que no podremos revertir.

La contaminación por plásticos no solo es un problema medioambiental, sino que impacta en lo político y lo económico al grado de que las tecnologías de reciclaje que actualmente existen no pueden resolver el problema.

La contaminación química también incluye pesticidas y herbicidas como el glifosato, el dicamba y los transgénicos, cuya aplicación solo favorece a las grandes trasnacionales como Syngenta-Monsanto-Bayer, la trasnacional química Basf y Microsoft, que con su agricultura sin agricultores ha iniciado la digitalización de la agricultura.

Tanto los agrotóxicos como las prácticas productivas de esta naturaleza ponen en alto riesgo toda forma de vida, desde los insectos hasta las especies mayores, sin dejar de considerar a la flora y a la humanidad entera. El funcionamiento de los ecosistemas requiere del aire y del agua para la generación de la vida más allá de la cadena trófica. Todos nos necesitamos para vivir.

Los científicos del Centro de Resiliencia de Estocolmo plantean la necesidad de crear un organismo equivalente al Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, para evaluar y monitorear la contaminación química, que es toda una emergencia global. A esta propuesta se suma el profesor Sir Ian Boyd, de la Universidad de St. Andrews, quien considera que el aumento de la carga química en el medio ambiente es difusa e insidiosa. Incluso si los efectos tóxicos de los productos químicos individuales pueden ser difíciles de detectar, después de varias investigaciones ha sido posible concluir que esto no significa que el efecto agregado sea insignificante. Son evidentes las deficiencias e insuficiencias en materia de regulación, ya que la que existe, con sus diferentes matices, no está diseñada para detectar y comprender la gravedad de los impactos y consecuencias de la contaminación química.

En este orden de ideas, la Ellen MacArthur Foundation (2022) presentó en la Asamblea de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente 5.2, celebrada en Nairobi, Kenia, el 28 de febrero de 2022, con el propósito de fortalecer las acciones por la naturaleza y para alcanzar el logro de los Objetivos del Desarrollo Sostenible, la solicitud de un Tratado Basado en un Enfoque de Economía Circular para Abordar la Contaminación por Plástico a Escala Mundial, con el objetivo de establecer un alto estándar de acción común que todos los países deben cumplir, para impulsar la transición a una economía circular para los plásticos a nivel mundial y a escala. La base es el reconocimiento que la Ellen MacArthur Foundation hace sobre que:

- a) El problema de la contaminación plástica es de naturaleza transfronteriza y genera impactos negativos significativos en nuestro medio ambiente, sociedad y economía.
- b) Se necesita urgentemente una respuesta internacional holística y coordinada que aborde los problemas en su origen para detener de manera efectiva la fuga de plástico en la naturaleza.
- c) Que una economía circular para los plásticos contribuirá a los esfuerzos para abordar el cambio climático y la pérdida de la biodiversidad, al mismo tiempo que generará impactos sociales y económicos positivos.

La Solicitud de la Fundación EM a la UNEA 5.2 se centra en establecimiento de un comité intergubernamental ambicioso y legalmente vinculante sobre la contaminación plástica que:

- 1) Incluye políticas *upstream* y *downstream*, con el objetivo de mantener los plásticos en la economía y fuera del medio ambiente, reducir la producción y el uso de plásticos vírgenes y desvincular la producción de plásticos del consumo de recursos fósiles.
- 2) Establece una dirección clara para alinear a los gobiernos, las empresas y la sociedad civil en torno a una comprensión común de las causas de la contaminación plástica y un enfoque compartido para abordarla. Para las empresas y los inversores, esto crea un campo de juego equitativo y evita un mosaico de soluciones desconectadas, al tiempo que establece las condiciones propicias adecuadas para hacer que una economía circular funcione en la práctica y a escala.
- 3) Proporciona una estructura de gobernanza sólida para garantizar la participación y el cumplimiento de los países, con definiciones comunes y estándares armonizados aplicables a todos. Esto facilita las inversiones para escalar innovaciones, infraestructuras y habilidades en los países e industrias que más necesitan apoyo internacional.

Esta descripción de la solicitud del Tratado es válida, dado que resulta importante difundirlo a fin de impulsar la transición de la economía lineal que se está aplicando hacia una economía circular, tal como lo planteó la investigadora del Centro de Resiliencia de Estocolmo Patricia Villarrubia-Gómez, cambiar a una economía circular es realmente importante. eso significa cambiar los materiales y productos para que pueda reutilizarse, no desperdiciarse.

Bajo el lema “Uniendo al mundo para hacer frente al cambio climático” se llevó a cabo la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático en Glasgow, Reino Unido, del 31 de octubre al 12 de noviembre de 2021, que reunió a 120 líderes mundiales y a más de 40 mil participantes. Ahí se dio a conocer el informe AR6 que los expertos del Grupo de Expertos del IPPCC elaboraron; después de dos semanas de debates y deliberaciones, los textos aprobados constituyen un compromiso,

expresó António Guterres, secretario general de las Naciones Unidas quien reconoció que la voluntad política colectiva no ha sido suficiente para superar la problemática que constituye el cambio climático, a pesar de siete acuerdos: intensificación de la acción por el clima, abandono de los combustibles fósiles, financiación para la acción climática, incremento del apoyo a la adaptación y cumplimiento de las normas del acuerdo de París, Francia, y atención a pérdidas y daños.

Para estabilizar el clima y limitar los riesgos climáticos, a los científicos del clima les resulta claro que es urgente reducir la adición de gases de efecto invernadero a *cero neto*. Pero, ¿qué es el *cero neto*? Según la organización Eenerctic (2021), el logro de *cero neto* en emisiones netas de carbono es un concepto que data de épocas previas a la revolución industrial, sobre todo en la construcción de edificios, puesto que se aprovechaban la luz y la ventilación naturales.

En 1933, el inventor Buckminster Fuller construyó una casa prefabricada denominada *Dymaxion* con un innovador sistema de aire acondicionado totalmente natural, que permitía dirigir el aire caliente hacia arriba y el aire frío hacia abajo; su innovación consistía en vincular la arquitectura a la ecología. En 1998 se creó el diseño sostenible en un concepto vertical de los arquitectos: fue el Green Building Council de Estados Unidos, que creó el Energy and Environmental Design para la certificación del uso de materiales, agua y energía para la construcción de edificios sin emisiones de carbono.

En 2002, tanto la organización Architecture 2030, fundada por Ed Mazria, como el Instituto Americano de Arquitectos se enfocaron a construir edificios con emisiones cero carbono, articulando sus procesos a los objetivos del desarrollo sostenible. Para 2006, la Living Building Challenge perfeccionó sus estándares de edificación en materia de sostenibilidad, por lo que su certificación solo se otorga a los edificios que logren el consumo de energía llevada a *cero neto*.

Pero el más emblemático de *cero neto* es la Masdar City, un centro de investigación y desarrollo para la tecnología ecológica, considerada como una ciudad satélite con cero emisiones de carbono. Miller Hull construyó en 2014 un centro comercial denominado Bullitt Center de Seattle, de seis

plantas, con paneles solares y sistemas de captación de aguas pluviales, y energéticamente sostenible.

En 2015, en la ciudad de Le Bourget, Francia, se reunieron 196 naciones para firmar lo que se le llamó el Acuerdo de París, considerado como el primer consenso global para contener el calentamiento global por debajo de los 2°C, acuerdo que no se ha cumplido en los términos que se establecieron los compromisos. En 2019, la Comisión Europea creó el llamado Pacto Verde (European Green Deal), integrado por un conjunto de iniciativas para lograr la neutralidad climática en Europa para 2050. Esta llamada neutralidad se transformó en el mapa de ruta del *cerro neto*.

Para Ellen MacArthur (2020), si bien es cierto que es un avance lograr los acuerdos, cuyo cumplimiento deberá ser exigibles, incluso cumplirlos no será suficiente para alcanzar el objetivo del *cerro neto* para 2050, por lo tanto es trascendental abordar la forma de que fabricamos y usamos productos, materiales y alimentos. Para ello se necesita una economía circular, que implica construir nuevas políticas públicas que propicien superar el modelo económico capitalista neoliberal de procesos productivos lineales y generadores de desechos, esquema que se sustenta en el libre mercado, que más bien es libertad para las transnacionales. ¿Será posible una ética ecológica en los procesos económicos, que deriven en el cumplimiento de los acuerdos de París, de Kyoto y los de la COP26? Sobre todo porque la descarbonización total es ya un desafío global.

Para Krisnan *et al.* (2022), las huellas de emisiones se han identificado en siete áreas específicas:

Energía: que consiste en la generación de electricidad y calor 30% de las emisiones de CO₂ y 3% de las emisiones de óxido nitroso (N₂O);

Industria: incluye diversos procesos como acero, química, cemento y la extracción de petróleo, gas y carbón; sus huellas de emisiones son 30% de carbono, 33% de metano y 8% de óxido nitroso.

Movilidad: contempla transporte terrestre, aéreo, ferroviario y marítimo; su huella de emisiones son 19% de carbono y 2% de óxido nitroso.

Construcción: es el sector con menor huella de emisiones, ya que solo registra el 6% de carbono.

Agricultura: en esta actividad socioeconómica se incluyen el uso de energía y las prácticas agrícolas y pesqueras; registra 1% de carbono, 38% de metano y 79% de óxido nítrico.

Silvicultura: incluye otros usos de la tierra; las emisiones que registra son 14% de carbono, 5% de metano y 5% de óxido nítrico;

Residuos sólidos: 23% de metano y 3% de óxido nítrico.

Los sectores de energía, industria y transporte destacan por las emisiones de carbono, por lo que las huellas de carbono, metano y óxido nítrico, junto a las emisiones del plástico, constituyen la esencia de los desafíos a resolver en el menor tiempo posible. Ya no se puede postergar la aplicación de medidas que revertan estas emisiones por el alto riesgo que suponen para la humanidad.

Los impactos y secuelas de los fenómenos climatológicos son evidencias irrefutables de lo que le espera a la humanidad en los próximos años. Las propuestas generadas por los científicos, en lugar de encontrar apoyo, se han ahogado en discursos, y las acciones —insuficientes, por cierto— se han centrado en políticas públicas y normas que no se cumplen.

La economía circular y el paradigma tecnológico-digital

La ciencia y la tecnología son hoy un binomio e interactúan recíprocamente, se amplifican y fortalecen en un constante escalamiento (Schwab, 2017). En este contexto se identifican la inteligencia artificial, el 5G, el *edge computing* y sobre todo el cómputo cuántico, que pueden dar respuesta a la problemática del cambio climático. En este contexto tecnológico, ¿acaso el cómputo cuántico puede succionar carbono de la atmósfera de manera fácil y a bajo costo?

Las computadoras cuánticas pueden hacer lo que las computadoras clásicas no pueden; entre sus capacidades están el entrelazamiento y la superposición de valores, sobre todo cuando se trata de simular moléculas, como lo refiere Feynman (1981), a través de la simulación molecular se logra el diseño de nuevos catalizadores que aceleran las reacciones químicas, pues los productos químicos involucran catalizadores también conocidos como enzimas (Feynman, 1981). Si bien es cierto que el CO₂ es capturado de manera natural por los océanos y los árboles, es irrefutable que la generación de CO₂ por una economía capitalista generadora de desechos es sumamente superior a la que se pueden absorber en los ecosistemas naturales.

Los acuerdos internacionales para reducir las emisiones de CO₂ no han logrado avances significativos, puesto que el calentamiento ya aumentó en 1.1°C. La conversión del actual modelo económico va cuesta arriba, sobre todo por la resistencia e inconciencia de políticos y empresas trasnacionales que solo ven cómo ampliar su dominio de mercados para incrementar su rentabilidad financiera a través de sus procesos de producción y venta.

La opción más viable es capturarlo mediante aplicaciones de cómputo cuántico, y descubrir nuevos catalizadores de CO₂, la capacidad requerida de las computadoras cuánticas sería de un millón de qubits. Con esta tecnología cuántica se podría eliminar directamente de la atmósfera el dióxido de carbono, o bien reciclarlo para que se produzcan subproductos como el hidrógeno, para usarlo como combustible limpio, y/o monóxido de carbono, para la industria química.

Sin embargo, no se debe dejar de considerar la creación de catalizadores y enzimas que aceleren los procesos químicos, que pueden resultar clave para reducir el coste energético. Por ejemplo, según Mauricio Cárdenas (2021), del BID, se gasta entre el 1% y el 2% de la energía mundial para producir amoníaco, recurso indispensable para la producción de fertilizantes. Esta situación podría mejorarse si se produce amoníaco a bajo costo energético a través de una enzima llamada nitrogenasa, que requiere aplicar procesos a nivel molecular, lo cual solo se puede lograr mediante procesos de cómputo cuántico, ya que permite realizar las simulaciones moleculares para lograr el conocimiento necesario.

El Consejo Global del Futuro sobre Computación Cuántica (2020) hace un llamado a las naciones para que mediante la cooperación internacional se destinen recursos financieros y científicos para desarrollar esta tecnología, a fin de que permita hacer frente a las calamidades que genera el cambio climático.

La computación cuántica requiere de un internet cuántico, en China han logrado crear la primera red integrada de comunicación cuántica del mundo, que combina más de 700 fibras ópticas sobre el terreno con dos enlaces tierra-satélite. Funcionará a velocidad 5G.

Las mayores capacidades de cómputo y las necesidades de menores tiempos de respuesta, con mayor flexibilidad, no se pueden lograr con el

actual sistema centralizado de flujos de información, por lo que el *edge computing* implica pasar a un sistema distribuido con nodos intermedios, con el beneficio de dar mayor velocidad y seguridad en los flujos de información.

Las tecnologías están, solo faltan buena voluntad, la ética, las políticas y normas públicas necesarias para aplicarlas, así como el financiamiento, para enfrentar los desafíos del cambio climático. Es algo viable, pero nada sencillo.

Pero no solo son estos sectores donde están los desafíos climáticos: el avance de la digitalización en las actividades económicas y sociales, aceleradas por los efectos de la pandemia de la Covid-19, han generado ya lo que se denomina la *economía digital*, cuyas huellas de emisiones, si bien no se han publicado, sus métricas sí son de consideración, dado que no pueden funcionar sin el uso y la aplicación de energía y otros insumos, como materiales plásticos y minerales. Además, es preciso contemplar los desechos que constituye la basura electrónica altamente contaminante. Según el informe del Observatorio Mundial de Residuos Electrónicos 2020 (Forti *et al.*, 2020), en 2019 el mundo generó 53.6 millones de toneladas métricas de residuos electrónicos; China ocupa el primer lugar en generación de estos residuos, mientras México es el número 11. Se estima que el 17.4% se ha reciclado, por lo que el restante 82.6% es todo un desafío.

Cada vez son más las actividades que realizamos de manera digital: transacciones como pagos, compras, transferencias bancarias, etcétera. Hemos pasado de la sociedad informatizada a una sociedad digitalizada, en una economía del conocimiento, donde la creatividad como elemento clave de todo proceso económico deriva en su privatización y comercialización vía propiedad industrial o intelectual. Por eso, quien domina la propiedad intelectual domina los mercados, y quien domina los mercados domina el mundo.

La sociedad global ha pasado de la razón de Estado a la razón de mercado. La llamada libertad de mercado es totalmente inexistente: son más reales los mercados digitales, como los mercados token no fungibles y los mercados de criptomonedas. El mercado de competencia perfecta es un referente teórico inexistente, lo que prevalece son los mercados oligopólicos. ¿Quién domina el mercado de las vacunas? ¿Quién domina el mercado de los energéticos? ¿Quién domina el mercado de las armas? ¿Quién domina el mercado de los

alimentos industrializados? ¿Quién domina los mercados digitales? Todos son dominados por las grandes transnacionales que buscan y logran en los gobernantes las mejores condiciones para alcanzar la más alta rentabilidad de sus inversiones, en un proceso histórico de incremental acumulación de capitales. El modelo económico ideal para ese proceso es el neoliberalismo.

Desde la Edad Media, caracterizada por el colonialismo basado en la conquista y el sometimiento de grandes territorios, a nuestra actualidad, la depredación de la naturaleza, como la precarización de grandes masas de seres humanos, solo ha cambiado de forma en su proceso de perpetuarse. Las evidencias son irrefutables: por un lado, el deterioro del planeta que ha dado lugar al apocalíptico cambio climático, y por el otro, la desigualdad social cuya brecha se profundiza cada vez más, los ricos cada vez son más ricos en capitales, pero menos en población, y los pobres son cada vez más pobres en condiciones y en número.

El paradigma de la tecnología le ha dado un nuevo significado al curso de la historia en medio de las tensiones geopolíticas, que no son más que la lucha por los recursos naturales y la *technohegemonía*, donde las grandes transnacionales tienen un poder nunca antes visto. Por ejemplo, tres gigabancos, BlackRock, StateStreet y Vanguard, controlan activos con valor de 22 billones de dólares, equivalentes al 91.6% del PIB de los EU, que alcanza los 24 billones. El peso económico-financiero se traduce en un enorme poder político. En este contexto surge la nueva megatendencia tecnológico-digital.

Con el *metaverso* se está generando la posibilidad de la ubicuidad, tanto en las plataformas tecnológicas *internet-metaverso* como la realidad física. Los modelos comerciales del *metaverso* se superpondrán con el mundo físico, en la medida que el ecosistema de realidad extendida (RX) vincule a los criptoactivos con las actividades económicas reales.

A la *web* 1.0 de los años 90 se le consideró la súper carretera de la información orientada a buscar, explorar y habitar en las plataformas de AOL, Yahoo, Microsoft y Google; a principios de este milenio surgió la *web* 2.0, caracterizada por las redes sociales, los *blogs* y la monetización de los datos generados por la masificación de los usuarios como atractivo para la publicidad. Esta información es captada por Snapchat, Twitter, TikTok

y, claro, Facebook. Por algo el *Washington Post* le ofreció a Mark Elliot Zuckerberg, en los inicios de la empresa, invertir 6 millones de dólares en Facebook, oferta que rechazó por tener otra propuesta superior, planteada por Accel Partners, pero también declinó la oferta de Yahoo para comprar Facebook por mil millones de dólares (Frenkel y Kang, 2021).

Fue a Steve Jobs a quien se le atribuyó el comentario sobre *las implicaciones que una red distribuida globalmente de computadoras interconectadas podría tener en las comunicaciones, el comercio y la información*, así como el concepto de *metaverso* que Neal Stephenson describió en su novela *Snow Crash* (1992), elementos que dieron pauta a la *web 3.0* como la vertiente tecnológica y la pandemia del Covid-19 como la vertiente social, que crearon las condiciones de la nueva era tecnológico-digital.

Para Aaron Franco (2022), de Singularity University, *metaverso* es una colección espacial de entornos virtuales en 3D impulsados por un motor de juegos que opera en internet, con interfaz en las computadoras. Esto permite dar paso a las llamadas economías virtuales. En este sentido, el *metaverso* se constituye en una megaindustria de moda virtual: por ejemplo, el PIB de Second Life supera los 500 millones de dólares.

El *metaverso* en tanto plataforma tecnológica está provocando transformaciones en *hardware*, *software* y experiencias. Por ejemplo, Meta (antes Facebook) está construyendo una súper computadora de inteligencia artificial, AI Research Super Cluster (RSC), con billones de parámetros, para entrenar algoritmos de aprendizaje automático, superando las existentes hasta hoy.

Con Meta ya están participando once empresas trasnacionales que, si antes competían entre sí, hoy concurren al meganegocio: se formarán diferentes grupos que construirán diferentes mundos virtuales, los cuales serán interoperables y permitirían la creación del *metaverso*, a través de aplicaciones descentralizadas convergentes, habilitadas para la tecnología del *blockchain* en respaldo de los criptoactivos y datos propiedad del usuario.

Blockchain es la tecnología vertebral del *metaverso*, considerada como la tecnología de registros distribuidos que está cambiando la naturaleza de hacer negocios y ayudando a las empresas a reimaginar cómo administrar activos tangibles y digitales (Tech Trends, 2022). De esto se favorecen el Bitcoin y

el Ethereum, que son programables a través de contratos inteligentes, para establecer la propiedad de un objeto digital, como los token no fungibles (NFT), que significa que son únicos y no repetibles, como obras de arte digitales, pero también los avatares, la ropa del avatar, armas, animaciones y decoraciones virtuales: todos son mercancías virtuales o criptoactivos que se pueden adquirir con criptomonedas.

En economías virtuales donde el conocimiento se transforma en criptovalor, la accesibilidad está determinada por la capacidad financiera de los usuarios para contar con el equipamiento tecnológico necesario, por lo que la población de las naciones que padecen la profunda brecha tecnológica y social no podrán acceder a ellas. La operación de los ecosistemas del *metaverso* requiere de una enorme infraestructura tecnológica que absorberá grandes cantidades de energía sobre todo eléctrica. ¿Acaso se tienen valorados sus impactos sociales y del cambio climático?

La viabilidad de la economía circular

Lo descrito hasta este punto nos lleva a la reflexión de que la economía circular se ha venido introduciendo en las agendas de la política pública y en las actividades privadas de varios países. La Fundación Ellen MacArthur (2021) plantea promover la idea de economía circular para enfrentar el cambio climático, la pérdida de la biodiversidad, el desperdicio y la contaminación, a través de un modelo económico resistente, distribuido, diverso e inclusivo, y para ello ha establecido cinco objetivos universales para las políticas de economía circular, en torno a los cuales los gobiernos de las naciones que la llegaran a adoptar puedan diseñar las estrategias para escalar el modelo de economía circular.

Por su trascendencia, se enuncian dichos objetivos. Primero, estimular el diseño para una economía circular. En segundo término, gestionar recursos para preservar el valor. En el tercer objetivo se plantea la creación de las condiciones económicas favorables para la transición. El cuarto objetivo hace referencia a la inversión en innovación, infraestructura y habilidades. Y en el quinto se establece como elemento fundamental la colaboración para el cambio de sistema, sobre todo la colaboración público-privada en todas las cadenas de valor.

El proceso de transición de una economía lineal hacia una economía circular, en una sociedad hiperconectada donde pueden converger la economía circular y la economía digital, no es un proceso automático. La transición está en función de la dinámica económica, tecnológica y política de cada país. Esta transición plantea la construcción de consensos no solo entre los agentes económicos, sino entre los políticos y los sectores sociales. Las estructuras productivas de cada economía nacional se enfrentan a presiones tanto internas como externas, sobre todo ante el conflicto bélico entre Rusia y Ucrania, por lo que habrá que valorar las brechas tecnológicas. La transición de una economía lineal a una economía circular obliga a una transición de ser usuarios a productores de tecnología, los procesos de innovación y de desarrollo tecnológico se enfrentan a políticas de inversión pública y privada que en las naciones de economías emergentes son casi nulas.

Las tensiones geopolíticas en la actualidad son determinantes en la dinámica de toda la economía global. El conflicto Rusia-Ucrania está ya impactando en las economías de las naciones, sobre todo las que padecen notables rezagos ocasionados por la ancestral desigualdad, que es consecuencia de un proceso histórico de injustos intercambios comerciales entre naciones donde solo salen beneficiadas, en primer término, las grandes transnacionales, las cuales nunca dejan de investigar y desarrollar nuevas tecnologías y nuevos productos, y cuya dinámica de fusiones empresariales tiene como propósito escalar sus posicionamientos en los mercados, los cuales marcan una tendencia creciente hacia el oligopolio, cuando no al monopolio. Es una cuestión de poder económico y tecnológico, al igual que apoderarse de los recursos naturales.

Transformar una economía lineal en una economía circular fortalecería los mecanismos económicos e institucionales para enfrentar y por lo menos disminuir los efectos del cambio climático, pero surge una pregunta: ¿la transición hacia la economía circular también garantizará la aplicación de mecanismos para eliminar o por lo menos atenuar la desigualdad y la pobreza en las naciones más rezagadas socialmente? Es cierto que son las que menos contaminan, pero también son las que más padecen los efectos tanto del cambio climático como de las pandemias, ante la imposibilidad de contar con sistemas de salud acordes a sus propias y urgentes necesidades.

El desarrollo tecnológico y la innovación se fundamentan en la capacidad de generación de nuevos conocimientos cuyo soporte son los modelos educativos para formar masas críticas de personal de alto desempeño, pero las capacidades estructurales de las naciones con economías emergentes (que carecen de los recursos suficientes para lograr la formación de sus nuevas generaciones, resilientes y disruptivas, de manera exponencial), al no estar en posibilidad de impulsar modelos educativos acordes a los objetivos de la economía circular, complican o por lo menos retrasan la transición anhelada hacia una economía circular.

El contexto presentado es abrumador y muy preocupante. Si bien la economía circular se presenta como una alternativa, su viabilidad universal habrá que ubicarla en el proceso histórico de la transición multidimensional y multifactorial que estamos viviendo.

No se trata de dejarla de lado porque son más los obstáculos que las posibilidades, pero habrá que redoblar esfuerzos e impulsar una conciencia social-global para la sustentabilidad. Sin embargo, lo más difícil de lograr es eliminar la negligencia e irresponsabilidad de los políticos, así como disminuir la corrupción y la criminalidad, para superar el modelo capitalista-neoliberal; de lo contrario, no solo no se cumplirán los cinco objetivos de la economía circular que plantea la Fundación Ellen MacArthur, sino que el compromiso de cumplir los 17 Objetivos del Desarrollo Sostenible queda en suspenso ante el riesgo de extinción de la humanidad, que tiende a incrementarse, sobre todo por los conflictos bélicos como el de Rusia-Ucrania, que ya delineó su ruta hacia la tercera guerra mundial.

El Foro Económico Mundial de Davos (2022), a través del Consejo del Futuro Global sobre Soluciones Basadas en la Naturaleza, acuñó el término de *soluciones basadas en la naturaleza* en virtud de que los marcos políticos y las economías de las diversas naciones, desde la perspectiva del Foro Económico Mundial de Davos (WEF), no han reconocido el valor de la naturaleza, lo que pone al mundo en alto riesgo de un colapso económico y social a gran escala. Pero lo que no menciona el WEF es que la gran desigualdad económica, social y tecnológica del planeta es resultado de la estructura depredadora que se estableció por miles de años gracias al colonialismo impuesto por las monarquías de la Edad Media, esquema fortalecido por el capitalismo de libre mercado.

Si como lo plantea el WEF, la implantación de políticas positivas para la naturaleza podría generar más de diez billones de dólares de valor comercial anual y crear 395 millones de empleos para 2030, será un gran negocio pero carecerá de sentido social.

La propuesta de *soluciones basadas en la naturaleza*, además de un cambio dietético para lograr una reducción significativa en la demanda general de la tierra para la producción de alimentos, podría liberar, según el WEF, suficiente tierra agrícola para capturar entre cinco y diez gigatoneladas de CO₂ por año. Parece prometedor, pero no ponderan la desigualdad que prevalece; por ejemplo, según el informe de OXFAM 2022, mientras que los diez hombres más ricos del mundo duplican su fortuna con la pandemia, los ingresos del 99% de la población mundial siguen deteriorándose, y la desigualdad, que por siglos ha prevalecido, se profundizará con la inflación global. Lo que se observa es que se está fracturando al mundo. En este informe, la OXFAM define el concepto de *violencia económica* como las decisiones políticas estructurales que favorecen a los más ricos, afectando a las personas en condiciones de pobreza, y enfatiza que, por la desigualdad, muere cuando menos una persona cada cuatro segundos.

¿Por qué el WEF no plantea la desigualdad y la pobreza como uno de temas prioritarios, y que además esten articulados a soluciones basadas de manera amigable con la naturaleza?

En la reciente Convención Marco de la COP26 arriba citada, Estados Unidos y los Emiratos Árabes promovieron la iniciativa llamada Misión de Innovación Agrícola para el Clima (AIM4C), que no es otra cosa que un mecanismo de meganegocios para grandes inversionistas como Bill Gates, que pretende perfeccionar la agricultura industrial-digital, también conocida como la agricultura climáticamente inteligente. Ello facilita el acaparamiento de todas las tierras susceptibles de ser transformadas digitalmente, y recompensa a las naciones ricas petroleras con créditos de carbono agrícola para justificarles la continuidad en su producción de combustibles fósiles.

La iniciativa AIM4C creará una agricultura digital sin trabajadores agrícolas, pero sí con desarrollos tecnológicos y de inteligencia artificial que permitirán a las trasnacionales, mediante la ingeniería genética de los cultivos, el control de las semillas, ya que son consideradas por las

transnacionales (Bayer-Syngenta y Coterva) un importante eslabón de la cadena agroindustrial, por lo que es clave su privatización vía derechos de obtentor y patentes, lo que implica la criminalización de la obtención natural de semillas por los campesinos.

Cabe señalar que en la iniciativa AIM4C no se ha mencionado nada sobre la aplicación de la agricultura digital por el manejo de grandes flujos de información. Su operación requiere grandes cantidades de energía. Se estima que Estados Unidos gastaría más de 3,300 millones de kilovatios/hora de energía, equivalentes al consumo anual de una nación africana las zonas rurales requieren de sistemas 5G que son de alto consumo energético. La inviabilidad climática de la privatización digital de la agricultura y de la iniciativa AIM4C es evidente.

Conclusiones

Estas reflexiones nos llevan a concluir que las desigualdades económicas, sociales y tecnológicas son crónicas, resultado de un modelo económico cuya estructura se diseñó y opera a partir de una injusticia histórica como es el colonialismo. Si bien ha habido avances, aunque desiguales y con pobreza, el costo ha sido muy alto: deterioro del ambiente, cambio climático, nuevas enfermedades y escasez de alimentos y de agua, condiciones que tienden a profundizarse en tanto persiste privatización de toda actividad económica y social, incluso las que son propias de la función pública, como las prestaciones sociales, entre las que están la educación y la salud. La economía circular tendrá éxito en tanto se transforme el modelo económico capitalista neoliberal; de no ser así, los beneficiarios de la aplicación de la economía circular serán los poseedores de los grandes capitales, como hasta ahora ha sucedido.

Referencias

- Boulding, K. E. (julio 2007). La teoría general de sistemas: La estructura interna de la ciencia. *Revista Politécnica*, vol 4, págs.103-115.
- Cámara de Senadores (2021). *Dictamen de las Comisiones del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Cambio Climático*. Congreso de la Unión.
- Cárdenas, M. (2021). *Políticas Climáticas en América Latina y el Caribe*. BID.
- Carney A. B. (2022). *Efectos ambientales de los plásticos y productos químicos*. Universidad de Gothenburg. <https://www.gu.se/en/about/find-staff/bethaniecarney-almroth>.
- Circular Innovation City Challenge (2022). <https://www.circularinnovation.city>.
- Cornell, S. (2022). La contaminación química ha pasado el límite seguro para la humanidad. *Centro de Resiliencia de Estocolmo*. https://www.continental.com.ar/internacional/la-contaminacion-quimica-ha-superado-el-limite-seguro-para-la-humanidad_a61e828e07b2c24794b892f63.
- Ellen MacArthur Foundation (2019). *Hacia una economía circular*. <https://archive.ellenmacarthurfoundation.org/es/economia-circular/concepto>.
- Ellen MacArthur Foundation (2020). *Elementos básicos de una economía circular*. <https://medium.com/circulatenews/to-fulfil-the-paris-agreement-we-need-a-circular-economy-5516bddd67d>.
- Ellen MacArthur Foundation (2021). *Objetivos de Política de Economía Circular Universal*. <https://ellenmacarthurfoundation.org>.
- Ellen MacArthur Foundation (2022). Business Statement for a Legally Binding UN Treaty on Plastic Pollution. <https://www.plasticpollutiontreaty.org/unea>.
- Enertic (2021). <https://www.bbc.com/mundo/noticias-internacional-59186975>
- Forti, V. (2020). *GEM_2020_Spanish*. World Health Organization; Federal Ministry for Economic Cooperation and Development.
- Franco, A. (2022). *¿Qué es el metaverso? Una guía para principiantes sobre la última obsesión de la tecnología*. Singularity University.
- Frenkel, S., y Kang, C. (2021). *Manipulados: La batalla de Facebook por la dominación mundial*. Debate.
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) (2019). *Calentamiento Global de 1.5°C*. OMM; PUMA.

- [https://archive.ipcc.ch/home_languages_main_spanish.shtml#:~:text=El%20Grupo%20Intergubernamental%20de%20Expertos,repercusiones%20y%20estrategias%20de%20respuesta.Sexto informe de evaluación \(IE6\)](https://archive.ipcc.ch/home_languages_main_spanish.shtml#:~:text=El%20Grupo%20Intergubernamental%20de%20Expertos,repercusiones%20y%20estrategias%20de%20respuesta.Sexto informe de evaluación (IE6))
- <https://es.weforum.org/search?query=Consejo+Global+del+futuro+sobre+computaci%C3%B3n+cuantica>.
- <https://www.bbva.com/es/como-puede-contribuir-la-computacion-cuantica-a-la-sostenibilidad-en-el-planeta/>.
- https://www.researchgate.net/publication/321197773_Economia_circular_Relacion_con_la_evolucion_del_concepto_de_sostenibilidad_y_estrategias_para_su_implementation_-_Circular_economy_Relationship_with_the_evolution_of_the_concept_of_sustainability_and_/link/5a148417aca27273c9eb00cb/download
- <https://www.weforum.org/agenda/2019/12/quantum-computing-applications-climate-change/>.
- <https://www.weforum.org/agenda/2021/03/nature-based-solutions-to-restore-ecosystems-require-dietary-change>.
- Iles, J. (2018). ¿Qué país está liderando la economía circular? <https://medium.com/circulatenews/which-country-is-leading-the-circular-economy-shift-3670467db4bb>.
- ISO (2006). *Norma Internacional ISO-14040: Análisis de ciclo de vida, principios y marco de Referencia*. International Organization for Standardization.
- Jiménez Cornejo, D. (2015) ¿Qué es el Desarrollo Sustentable? *Responsabilidad Social Empresarial, ResarchGate*, https://www.researchgate.net/publication/324532686_Que_es_el_Desarrollo_Sustentable.
- Lowder, S. K., (2021). Which Farms Feed the World and Has Farmland Become More Concentrated? *World Development*, 142.
- MacLeod, M. (2021). Contaminación por plásticos. ¿Hemos cruzado el punto de no retorno? <https://gestion.pe/tendencias/contaminacion-por-plasticos-hemos-cruzado-el-punto-de-no-retorno-noticia/?ref=gesr>.
- Plumer, B., y Fountain, H. (2021). Que el futuro caluroso, es una certeza. Cuánto depende de nosotros. *The New York Times*. <https://www.nytimes.com/es/2021/08/09/espanol/ipcc-reporte-cambio-climatico.html>.
- Prieto Sandoval, V., Jaca C., y Ormazabal, M. (2017). Economía circular: Relación con la evolución del concepto de

- sostenibilidad y estrategias para su implementación. *Memoria de Investigación en Ingeniería*. https://scholar.google.es/citations?view_op=view_citation&hl=es&user=v7CMEyMAAAAJ&citation_for_view=v7CMEyMAAAAJ:UebtZRa9Y70C.
- Ricciardi, V. (2018). How Much of Worlds Food Do Smallholders Produce? *Glob. Food Sec*, 17, 64-72.
- Rockström, J., (2009). A Safe Operating Space for Humanity. *Nature*, 461(24)
- Schwab, K. (2017). *La Cuarta Revolución Industrial*. Debate.
- Sherwood, S. C., (2020). Una evaluación de la sensibilidad climática de la tierra usando múltiples líneas de evidencia. <https://doi.org/10.1029/2019RG000678>.
- Sitio web (2021). <https://www.redhat.com/es/topics/edge-computing/what-is-edge-computing>
- Tech Trends Deloitte. <https://www2.deloitte.com/mx/es/pages/technology/articles/tech-trends-2022.html>.
- Thunberg, G. (2021). <https://www.bbc.com/mundo/noticias-internacional-59186975>.
- Toledo, V. (2022). La contaminación química: Otra emergencia planetaria. <https://www.jornada.com.mx/2022/02/22/opinion/015a2pol>.
- WEF. https://www.weforum.org/agenda/2022/02/how-to-navigate-the-complex-world-of-risk-and-reward-when-it-comes-to-nature/?utm_source=sfmc&utm_medium=email&utm_campaign=2767109_Agenda_weekly-18February2022&utm_term=&emailType=Agenda%20Weekly.



Complejidad económica y economía verde en México: buscando nuevos caminos para la sustentabilidad

Carla Carolina Pérez-Hernández

Introducción

La complejidad económica ofrece un paradigma potencialmente poderoso para comprender los problemas y desafíos sociales clave de nuestro tiempo (Balland *et al.*, 2022). Los métodos de complejidad económica han sido validados por estudios en múltiples áreas geográficas —de los países a las ciudades— y una variedad de actividades económicas: productos, industrias, ocupaciones, patentes, trabajos de investigación (Hidalgo, 2021). Por lo anterior, su aplicación se hace factible tanto en regiones desarrolladas y altamente industrializadas como en regiones en vías de

desarrollo para el estudio de las estructuras productivas y la forma en que estas pueden transitar a una economía más compleja y sofisticada.

El presente documento busca en un primer momento realizar una breve revisión a la teoría de la complejidad económica, para posteriormente explorar las relaciones entre complejidad económica y sustentabilidad, y finalmente remarcar los hallazgos empíricos detectados por Pérez-Hernández *et al.* (2021) derivados del cruce de la complejidad y la economía verde en México.

Breve revisión a la teoría de la complejidad económica

La complejidad económica utiliza métodos de análisis espectral y teoría de redes para reducir la dimensionalidad de los datos de manera que conserven más información que meros agregados. Los métodos de complejidad económica pueden hacer factible introducir heterogeneidad relevante entre industrias y productos (en términos de su complejidad, conectividad y relación) de una manera simple, manejable y empíricamente implementable. Este campo emergente se basa en gran medida en técnicas de *big data* y aprendizaje automático (Balland *et al.*, 2022).

La investigación sobre complejidad económica se ha enfocado sobre todo en dos temas principales: a) la proximidad, que mide la afinidad general entre una actividad específica y una ubicación, explica las dependencias de la ruta y predice qué actividades crecerán o disminuirán en una ubicación, y b) la métrica de complejidad, también conocida como intensidad del conocimiento o conocimiento interno bruto (CIB) y es útil para predecir el crecimiento económico, la desigualdad de ingresos y las emisiones de gases de efecto invernadero (Hidalgo, 2021). Los atributos de ambos enfoques se pueden observar a continuación:

Tabla 1. Atributos del relacionamiento y la complejidad económica.

1) Métricas de proximidad	2) Métricas de complejidad
Mide la afinidad entre una actividad específica y su locación geográfica.	Utiliza la información para estimar la diversidad, ubicuidad y disponibilidad de los factores que intervienen en una economía.

Predice qué actividades van a crecer o van a disminuir en un lugar.	Sirve para medir la capacidad de una economía para generar y distribuir la riqueza.
Preserva la identidad de las zonas geográficas y sus actividades mientras se aprovecha la información de sus interacciones con actividades de otras ubicaciones.	Aplica técnicas de reducción dimensional que preservan la identidad de las variables y consideran sus interacciones.
Anticipa los cambios en patrones de especialización, así como la probabilidad de que un lugar entre o salga de alguna actividad.	Predice el crecimiento económico, la desigualdad en los ingresos y las emisiones de gases de efecto invernadero.
Se relaciona con la capacidad de absorción: la capacidad de absorber nuevo conocimiento va a estar determinada por el nivel que se tiene en conocimiento relacionado.	Las métricas de complejidad fueron usadas en un inicio con datos de intercambio comercial, pero se ha demostrado que pueden usarse en patentes tecnológicas, empleo, ocupaciones.
Identifica que el aprendizaje requiere interacción entre actividades parecidas, pero no lo suficiente para ser considerados competencia (clústeres).	Actualmente se exploran análisis de las diferencias geográficas en la desigualdad de los ingresos, desarrollo humano y emisión de gases que provocan el efecto invernadero.
Medidas de proximidades que han servido para construir mapas de productos similares, industrias, tecnologías, deportes, música.	Diversas plataformas interactivas de visualización de datos han aportado para difundir las métricas de complejidad económica en diversas regiones.

Fuente: elaboración propia con base en Hidalgo (2021).

Además, se identifica que las plataformas digitales de visualización de datos han ayudado a democratizar las herramientas y métricas derivadas de la aplicación de la complejidad económica con la función de servir a

tomadores de decisiones (*policymakers*) y público en general para realizar consultas interactivas de diversas regiones, productos y años.

Tabla 2. Plataformas de visualización de la complejidad económica.

Nombre	Plataforma
Atlas de Complejidad Económica	https://atlas.cid.harvard.edu/
Atlas de Complejidad Económica de Colombia	http://datascolumbia.bancoldex.com/
Atlas de Complejidad Económica de Perú	http://acomplexperu.concytec.gob.pe/
Observatorio de Complejidad Económica	https://oec.world/es/
DataChile	https://es.datachile.io/
DataUSA	https://datausa.io/
DataViva	http://legacy.dataviva.info/en/
DataMéxico	https://datamexico.org/

Fuente: elaboración propia.

Aún hay mucho por hacer en materia de complejidad económica a nivel subnacional (regiones, ciudades), ya que, en ese sentido, las medidas de complejidad necesitan datos que reflejen la intensidad del conocimiento en un lugar. Esto significa que las medidas de empleo, por ejemplo, pueden ser aproximaciones inadecuadas de la actividad económica cuando el alto nivel de empleo refleja una falta de capital (como el caso de la agricultura no mecanizada, que requiere mucha mano de obra). De hecho, las medidas basadas en datos de productividad o valor agregado pueden reflejar mejor la complejidad que las medidas basadas en empleo. De igual manera, se pronostica que “el futuro de la investigación de la complejidad económica puede no estar en los registros administrativos que alimentaron las contribuciones pasadas, sino en repositorios en línea de colaboraciones trabajo, como GitHub o LinkedIn” (Hidalgo, 2021, p. 18).

Lo anterior resulta alentador al considerar que las futuras líneas de investigación relacionadas con la complejidad económica requieren el uso de nuevas y más específicas bases de datos, así como la exploración de la intensidad del conocimiento en relación con otras variables, como inclusión financiera, filtro de género o economía verde y circular, por mencionar algunas.

La complejidad económica y los productos ambientales

Un tema importante ha sido la conexión entre la complejidad económica y la economía verde. Algunos sugieren que la complejidad económica mejora el desempeño ambiental de los países (Balland *et al.*, 2022).

La economía verde sería aquella que tiene bajas emisiones de carbono, utiliza los recursos de forma eficiente y es socialmente incluyente. En una economía verde, el aumento de ingresos y la creación de empleos deben derivarse de inversiones públicas y privadas destinadas a reducir las emisiones de carbono y la contaminación, a promover la eficiencia energética, así como en el uso de los recursos, y a evitar la pérdida de diversidad biológica y de servicios de los ecosistemas (PNUMA, 2011).

Las diferencias entre la economía marrón y la economía verde pueden observarse en el siguiente recuadro:

Tabla 3. Diferencias entre la economía marrón y la economía verde.

Economía marrón	Economía verde
<ul style="list-style-type: none"> • Crecimiento del PIB, más actividad económica como objetivo. • Enfoque en el futuro cercano (corto plazo). • Maximización de la rentabilidad. • Valor para el accionista. • Sistema de producción lineal. 	<ul style="list-style-type: none"> • Más allá del PIB, prosperidad como objetivo. • Enfoque en el largo plazo. • Valor para los accionistas, beneficios para la sociedad. • Sistema de producción circular • Servicios de larga vida, la economía de rendimiento.

<ul style="list-style-type: none"> • Productos de corta vida a la venta. • Eficiencia medida en términos monetarios (análisis costo-beneficio). 	<ul style="list-style-type: none"> • Eficiencia multidimensional (análisis multicriterio). • Racionalidad micro y macro convergentes.
---	---

Fuente: Medina (2019).

En México, el desarrollo económico de las últimas décadas se ha guiado por los principios de una economía marrón, es decir, una economía basada en el pensamiento neoclásico y cuyos procesos productivos se concentran en la búsqueda de la maximización de los beneficios económicos y el crecimiento del producto interno bruto (PIB), beneficios económicos que han deteriorado el entorno natural debido a la utilización de combustibles fósiles en los procesos productivos, a la sobreexplotación de los recursos naturales y al aumento en la cantidad de desechos derivados de la producción y el consumo. Esto también ha traído un deterioro social, ya que la riqueza se ha ido acumulando en unas cuantas manos con el paso de los años (Medina, 2019).

La transición productiva hacia la economía verde puede aportar beneficios ambientales y a su vez económicos (Pegels y Altenburg, 2020). La Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL, 2019) sostiene que es posible fortalecer la capacidad productiva de los países de la región hacia una economía verde e inclusiva. En este sentido, la producción y difusión de bienes con beneficios ambientales (llamados productos verdes¹) puede ser considerada un paso adelante en la transición.

Los productos ecológicos generalmente se asocian con la reducción de la contaminación y la preservación del medio ambiente, en comparación con sus contrapartes convencionales (Hamwey *et al.*, 2013). Los productos verdes tienen como objetivo reducir el impacto ambiental de un diseño de fabricación, uso y eliminación (Berchicci y Bodewes, 2005). Según la Comisión

1 En particular, por productos verdes entendemos una amplia gama de insumos/productos asociados a energías alternativas, tecnologías más limpias, materiales reciclados, gestión del agua y gestión de residuos, entre otros aspectos (OCDE, 2011).

de las Comunidades Europeas, los productos verdes consumen menos recursos, tienen menos impactos y riesgos para el medio ambiente y evitan la generación de residuos en la etapa de concepción (Sdrolia y Zarotiadis, 2019). Sin embargo, la eficiencia de los productos verdes no se limita a la fase de producción, sino que se extiende a todo el ciclo de vida del producto (Albino *et al.*, 2009). Clasificar productos ecológicos es una tarea difícil; de hecho, hasta la fecha no existe una definición estándar universalmente acordada sobre el concepto de bienes ambientales. No obstante, la OCDE (1999) ha definido que “la industria de bienes y servicios ambientales consiste en actividades que producen bienes y servicios para medir, prevenir, limitar, minimizar o corregir el daño ambiental al agua, el aire y el suelo, así como los problemas relacionados con los desechos, el ruido y los ecosistemas. Esto incluye tecnologías, productos y servicios más limpios que reducen el riesgo ambiental y minimizan la contaminación y el uso de recursos”.

Por otra parte, APEC (2012) indica que los bienes y servicios ambientales son un sector industrial dedicado a resolver, limitar o prevenir problemas ambientales, mientras que la UNCTAD (1995) remarca que los productos verdes son aquellos que causan significativamente menos daño ambiental en alguna etapa de su ciclo de vida (producción, procesamiento, consumo o eliminación de residuos) que los productos alternativos que sirven al mismo propósito, o los productos cuya producción y venta contribuyen significativamente a la preservación del medio ambiente.

Reinsch *et al.* (2021) subrayan que la amplia cobertura de los bienes ambientales en la mayoría de las clasificaciones incluye tanto los bienes que tienen una función ambiental obvia (por ejemplo, las células fotovoltaicas) como los bienes que tienen un doble uso, es decir, que pueden utilizarse tanto para fines medioambientales como no medioambientales (por ejemplo, bombas). Las clasificaciones de bienes ambientales pueden incluir productos básicos (por ejemplo, cal), mientras que el otro extremo del espectro, que abarca productos manufacturados complejos, puede incluir varios subcomponentes y servicios en su cadena de valor (por ejemplo, paneles solares). Un producto puede considerarse ambiental si: a) se produce de una manera que causa menos daño ambiental que un producto comparable o similar (por ejemplo, productos orgánicos), b) su uso o consumo tiene un efecto final beneficioso

para el medio ambiente (por ejemplo, bicicletas), o c) contribuye a limpiar o reducir los daños al medio ambiente (por ejemplo, equipos de tratamiento y monitoreo de la contaminación al final de la tubería).

Dichos productos verdes ya se encuentran disponibles en el mercado. Algunos cuentan con aranceles preferenciales, otros se vislumbran con potencial de crecimiento a raíz de políticas que tienden a favorecer la transición hacia una economía con menor impacto en el ambiente. Al momento de analizar el mercado de productos verdes, la economía de la complejidad (Hidalgo *et al.*, 2007; Hidalgo y Hausmann, 2009) ofrece un instrumental que puede ser aplicado a tal fin. Su lógica permite integrar nociones de diversificación de actividades gracias a la afinidad de estas y a la posición de dichas actividades en la red (Ferraz *et al.*, 2021).

Tabla 4. Listados de productos verdes.

Listas de productos verdes	Contenido
Lista combinada de productos verdes (Mealy y Teytelboym, 2020).	543 productos verdes clasificados a seis dígitos (HS 1992).
WTO (2010): Reference Universe.	408 productos que representan un universo de productos potencialmente verdes propuestos por diferentes Estados miembros de la OMC.
WTO: Lista de productos verdes.	26 productos verdes con amplio respaldo de los Estados miembros de la OMC.
APEC (2012): Lista de productos ambientales. ²	54 productos verdes para los cuales los estados miembros de APEC acordaron reducir las tasas arancelarias aplicadas al 5% o menos para finales de 2015. La lista de bienes ambientales de APEC abarca principalmente bienes que reducen el daño ambiental (equipo de tratamiento y monitoreo de la contaminación al final de la tubería).

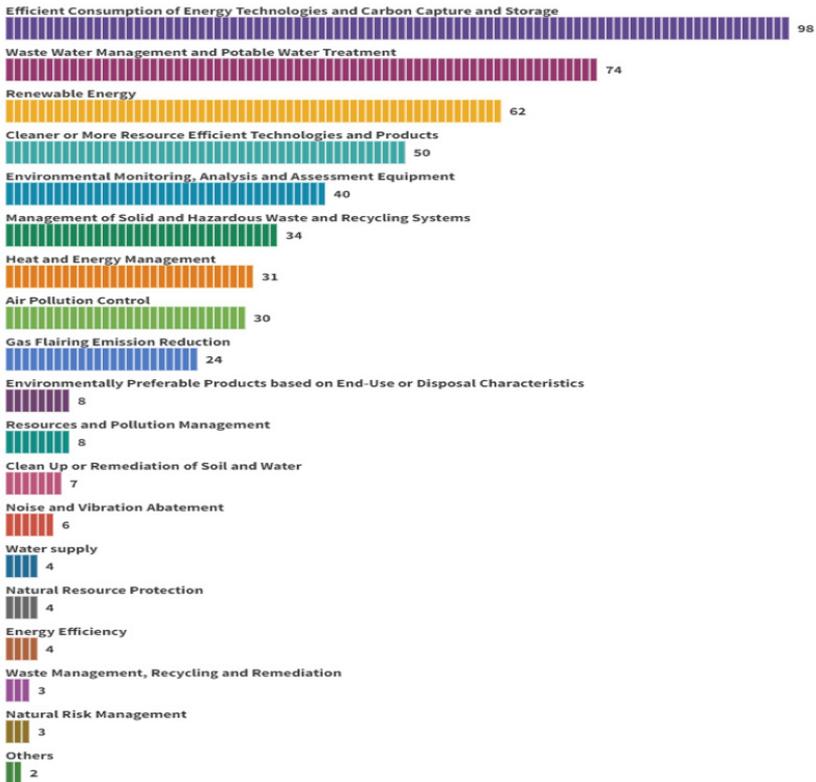
OECD (1999): Lista de productos amigables con el ambiente.	Lista de 121 productos ambientales ilustrativos desarrollados por el Grupo de Trabajo Informal de la OCDE/Eurostat.
Sauvage (2014): Lista combinada de productos ambientales.	Lista de 257 productos personalizados desarrollados por la OCDE.
WTO (2016).	Lista filtrada de 304 productos verdes.
EGA (2014).	Lista de 650 productos candidatos a bienes ambientales.
Transport Environment (2015).	Lista de 140 productos ambientales con impactos positivos significativos.

Fuente: elaboración propia con base en Reinsch *et al.* (2021) y Bucher *et al.* (2014).

Está claro que los bienes y servicios ambientales son esenciales para un cambio hacia una economía verde y desempeñan un papel de liderazgo en la transición hacia una economía verde. En realidad, estos bienes y servicios pueden abarcar cualquier número de ámbitos: control de la contaminación del aire, eficiencia energética, equipos de monitoreo, análisis y evaluación ambiental, abastecimiento de agua, limpieza o remediación de suelo y agua, tecnologías y productos más limpios y eficientes en el uso de los recursos, gestión del calor y la energía, etcétera. Varios de los productos pueden pertenecer a dos o más categorías, tal como se muestra a continuación:

2 En este punto cabe destacar que, al igual que la lista de productos verdes de la APEC, la lista de la WTO también se ocupó principalmente de los componentes. Por ejemplo, los paneles solares como producto final no están incluidos en la lista, pero sí varios de sus componentes.

Figura 1. Clasificación de los productos verdes.



Fuente: elaboración propia con base en Mealy y Teytelboym (2020). Consultar: <https://public.flourish.studio/visualisation/8646630/>.

Conexión hacia productos ambientales

El principio del relacionamiento indica que la probabilidad de que los países ingresen a nuevas tecnologías, productos y actividades se asocia a las actividades relacionadas presentes en el territorio (Hidalgo *et al.*, 2018). En esta línea, numerosos estudios muestran que a través de la red del “espacio-producto” es posible identificar las categorías de productos (tecnologías o áreas científicas) con mayor interrelación junto con patrones de especialización y posibilidades de diversificación (Hamwey *et al.*, 2013; Boschma *et al.*, 2015; Hartmann *et al.*, 2019; Catalán *et al.*, 2020). Asimismo,

se destaca que el paradigma de la complejidad contribuye a la realización de diagnósticos base para el diseño de políticas públicas (Balland *et al.*, 2022).

Recientemente, Mealy y Teytelboym (2020), con base en las nociones de complejidad económica, desarrollaron nuevas medidas relacionadas a la economía verde y sus capacidades productivas. En Latinoamérica, esta metodología ha sido aplicada a nivel subnacional en México (Pérez-Hernández *et al.*, 2021) y en Argentina (Palazzo, 2021; Belmartino, 2022). Los trabajos mencionados proveen evidencia empírica para promover el potencial productivo verde de dichas regiones.

Huberty y Zachmann (2011) analizaron el crecimiento en la ventaja comparativa revelada (VCR) de productos verdes exportados por países europeos (células solares, turbinas eólicas, plantas de energía nuclear y sus partes y medidores eléctricos), apoyados por medidas de política nacional. Estos autores encontraron que la proximidad de los productos era la única variable que influye en el crecimiento de estos. El crecimiento en VCR de productos verdes es mayor para países donde el producto verde tenía una fuerte cercanía o proximidad a otros productos con VCR mayor a 1.

En la investigación desarrollada por Fraccascia *et al.* (2018), basada en el espacio-producto, muestra la proximidad entre los productos y captura la similitud de las capacidades requeridas para producirlos. Bajo este contexto, un país estará en mayor posibilidad de desarrollar productos verdes cuanto más cerca esté un producto con $VCR > 1$, es decir, un país puede tener las capacidades requeridas para producir ese producto verde. En el contexto verde, cuanto más cerca esté el producto verde de un producto con $VCR > 1$, más probable es que el país posea las capacidades para producir ese producto verde de manera eficiente. Los productos verdes con mayor potencial para el crecimiento de un país se acercan a los productos con una VCR alta, es decir, una VCR mayor a uno.

Dordmond *et al.* (2020) crearon el índice de empleos verdes para analizar el desarrollo en 27 estados de Brasil y demostrar la dificultad de transitar hacia un espacio ocupacional verde. Los resultados muestran que un alto índice de empleos verdes en el período anterior tiene un efecto positivo en el índice en el período posterior. Los estados con muchos empleos verdes tendrán el mismo comportamiento en el próximo período. De esta forma, la

complejidad de un estado tiene un coeficiente positivo y es estadísticamente significativo, además de que demostraron que los estados económicamente complejos tienen un espacio ocupacional más verde.

De igual manera, se identifica que las plataformas digitales de visualización siguen siendo un instrumento para difundir este tipo de investigaciones y ayudan a permear las herramientas que relacionan la complejidad económica con la economía verde.

Tabla 5. Plataformas de visualización de la complejidad económica y la economía verde.

Nombre	Plataforma
Green Transition Navigator	https://green-transition-navigator.org/
Complejidad Económica Verde en Argentina	https://complejidadeconomicaverde.fund.ar/
Data Verde en México	https://sites.google.com/uaeh.edu.mx/dataverde/visualizar

Fuente: elaboración propia.

Complejidad económica y economía verde en México

En esta sección se mencionarán los hallazgos generales detectados por Pérez-Hernández *et al.* (2021), quienes, por medio de las técnicas de complejidad, lograron calcular el Índice de Complejidad Verde (ICV), el Potencial de Complejidad Verde (PCV) y las oportunidades de diversificación verde en México. Para obtener detalles sobre el proceso metodológico y las fórmulas ocupadas, es posible consultar el extenso de su documento de investigación.

Mealy y Coyle (2021) argumentan que una forma más precisa de pensar sobre el proceso metodológico de la complejidad económica es verla como un tipo de herramienta de reducción de la dimensión. Los algoritmos de reducción de dimensionalidad tienen como objetivo reducir los datos de alta dimensión (datos con un gran número de variables aleatorias) a

un espacio de dimensiones mucho más bajas. Una analogía es el Sistema Decimal Dewey para clasificar libros, ya que este último tiene como objetivo colocar libros sobre temas similares muy juntos en el estante de la biblioteca, para que las personas que estén interesadas en un tema determinado sepan dónde buscar. Las técnicas de complejidad son similares en espíritu, cuando se aplica a los datos de exportación de países.

Pérez-Hernández *et al.* (2021) aplicaron métodos de la literatura de complejidad económica para analizar las fortalezas industriales y las oportunidades de crecimiento futuro en materia de productos ambientales en el contexto mexicano, en donde existe una brecha de investigación a nivel regional,³ ya que sorprendentemente existen pocos estudios que apliquen métodos de complejidad económica en conexión con elementos de economía verde en México.

Para efectos del cruce entre complejidad económica y economía verde en México se partió de una pregunta: ¿qué estados tienen capacidades de producción “verdes”? Poder dar respuesta a dicha interrogante resulta útil para identificar las capacidades productivas (industriales) relacionadas con la economía verde. En la figura 2-A podemos ver la evolución del *ranking* del ICV en todos los estados durante el período 2004-2018. El ICV refleja la existencia de capacidades fácticas de una entidad para fabricar productos ecológicos. En 2018, Nuevo León ocupó el primer lugar, seguido de Baja California, Chihuahua, Estado de México y Tamaulipas. Los últimos lugares incluían estados como Baja California Sur, Chiapas, Colima, Guerrero, Nayarit, Oaxaca y Tlaxcala. A lo largo de quince años, Nuevo León mantuvo de manera impresionante su primera posición en toda la serie temporal; algunos estados, como Jalisco y Zacatecas, lograron avances significativos en sus capacidades de producción verde, mientras que otros, como Durango, experimentaron una disminución sustancial en su posición dentro del *ranking* de ICV.

Por otra parte, el PCV resume el posible adyacente verde de cada estado en un solo número y nos permite comparar entidades en términos

3 Los estudios regionales generalmente hacen alusión al territorio subnacional o bien subestatal.

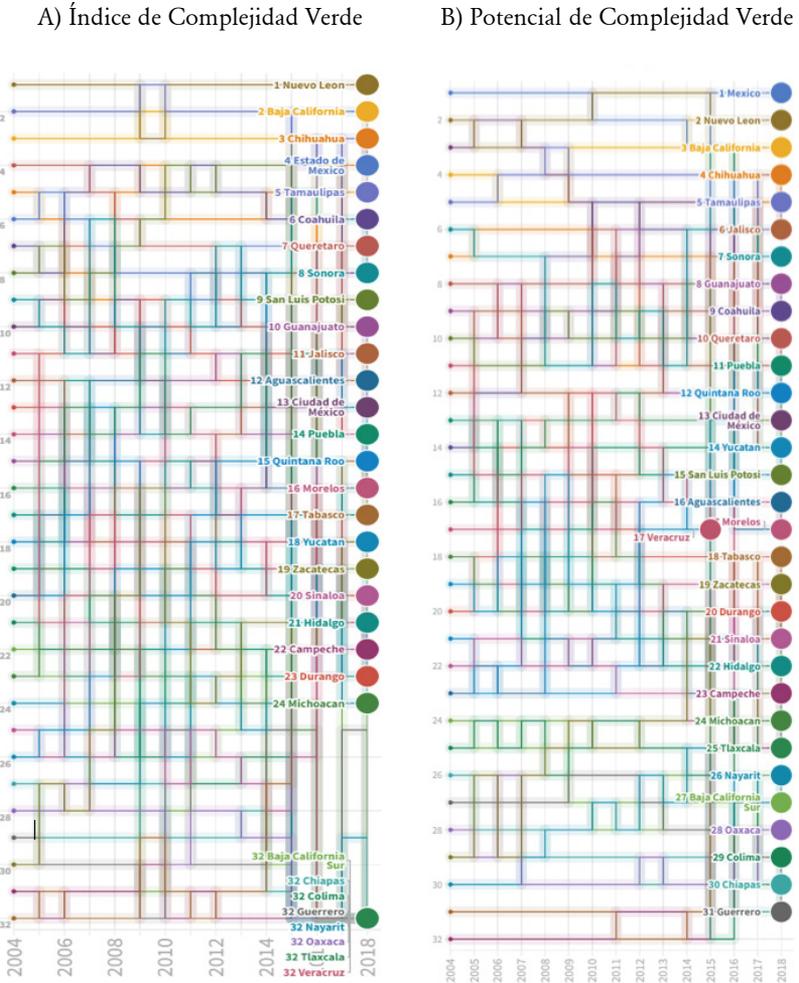
de su potencial general para diversificarse hacia productos verdes y tecnológicamente sofisticados. La figura 2-B muestra los estados que son consistentes con un alto grado de PCV: Estado de México, Nuevo León, Baja California y Tamaulipas, mientras que Chihuahua, Coahuila y Jalisco han mejorado su posición dentro del índice de complejidad verde potencial.

Este documento también contribuye a una nueva comprensión conceptual del Índice de Complejidad Económica y el Índice de Complejidad del Producto en entornos regionales y enfocados en un subconjunto de datos (productos verdes). Aquí se describe cómo estas medidas deben interpretarse y aplicarse en el contexto de los datos regionales (como los datos de ventas internacionales en México), lo cual tiene implicaciones teóricas clave para el desarrollo económico regional.

La complejidad económica verde muestra la virtud de poder trabajar con subconjuntos de datos que tengan un énfasis especial, en este caso productos verdes, pero puede prestarse a subconjuntos de productos de biotecnología, productos de agua virtual, productos ambientales específicos de algún sector, etcétera, dado que “la medida es completamente general y puede aplicarse a cualquier subconjunto de datos” (Mealy y Teytelboym, 2020, p. 11).

Empíricamente, Pérez-Hernández *et al.* (2021) demostraron que existe una correlación fuerte y significativa entre el Índice de Complejidad Económica y el ICV, lo cual revela que para enverdecer la economía en México se tiene que migrar hacia productos que por lo general son más complejos y sofisticados. No obstante, tal como indica Hidalgo (2020), la complejidad no implica abandonar las materias primas: se pueden sumar actividades económicas más complejas sin la necesidad de abandonar actividades rentables. Los datos muestran que los encadenamientos más exitosos van hacia atrás en la cadena de valor, no hacia adelante; por ejemplo, en el sector agrícola, no se trata de pensar “de la fruta a la mermelada”, sino en la creación de robots de cosecha.

Figura 2. Rankings de complejidad y potencial verdes (2004-2018).



Fuente: elaboración propia con base en Pérez-Hernández *et al.* (2021).

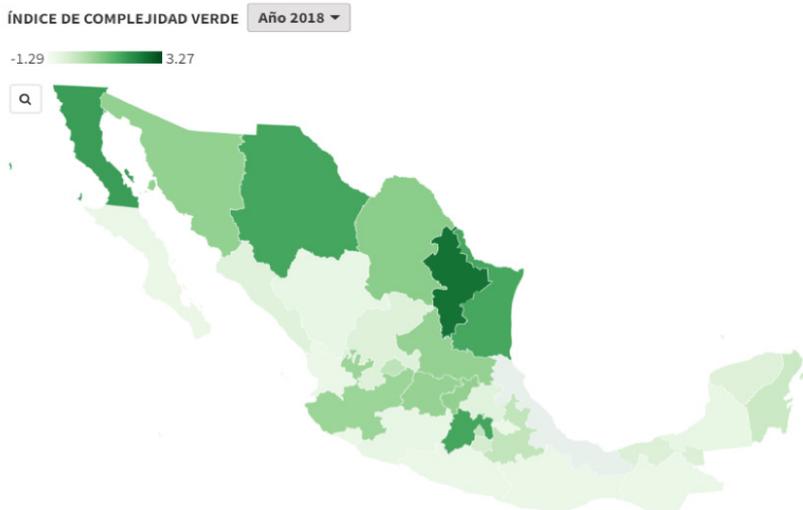
La economía verde no solo se basa en la generación de energías renovables. Actualmente México se encuentra entre uno de los principales productores-exportadores orgánicos de América y es el primero en producción de café orgánico (ICOA, 2020). A través del diseño de agro-sistemas

diversificados y el uso de tecnologías de bajos insumos, el área dedicada a la producción orgánica pasó de 501,364 hectáreas a 1'141,651 hectáreas en 2020 (Rindermann, 2015). Los estados de Veracruz, Chiapas y Oaxaca son los líderes en producción orgánica, seguidos de Michoacán, Querétaro y Guerrero. Los productos con mayor superficie agrícola orgánica son el café, las frutas tropicales y semitropicales, las hortalizas, el cacao en grano y los cítricos (Bustamante *et al.*, 2017). Lo anterior podría también detonar la economía verde donde la *cadena de valor hacia atrás* permite generar estos productos con beneficios ambientales que muchas veces están relacionados con la economía verde y la circular.

En ese sentido se considera pertinente emprender investigación no solo en materia de productos verdes, sino también en cuanto a servicios verdes y actividades económicas ambientalmente sostenibles. Sobre todo, se prevé necesario iniciar estudios empíricos usando las diversas taxonomías de bienes circulares o amigables con el medio ambiente, tales como las propuestas por Mulder y Albaladejo (2020), y hacer su homologación al nuevo Sistema Armonizado, versión 2022 (World Customs Organization, 2022). Lo mismo con respecto de otras taxonomías importantes para el “pacto verde”, tales como las de la UE (2020), la European Commission (2020), Eurostat (2020), Deloitte (2019) y De Jong (2016), todas las cuales son listas de productos circulares que señalan una contribución sustancial a la mitigación del cambio climático.

La Figura 3 muestra el mapa del ICV 2018. Se puede observar que la región del norte del país presenta mejores niveles en dicho indicador, lo que revela que dichas entidades cuentan con capacidades para la realización de productos ambientales, los cuales, a su vez, son más complejos y sofisticados.

Figura 3. Mapas de complejidad verde (2018).



Fuente: elaboración propia con base en Pérez-Hernández *et al.* (2021).

Pérez-Hernández *et al.* (2021) adaptaron la Lista Combinada de Bienes Ambientales (CLEG, por sus siglas en inglés) desarrollada por la OCDE (Sauvage, 2014), usando las siguientes categorías: REP = planta de energía renovable; CRE = tecnologías y productos más limpios o más eficientes en el uso de los recursos; SWM = gestión de residuos sólidos y peligrosos y sistemas de reciclaje; y WAT = gestión de aguas residuales y tratamiento de agua potable y otros (APC = control de la contaminación del aire; EPP = productos ambientalmente preferibles basados en el uso final o las características de eliminación; HEM = gestión del calor y la energía; MON = equipo de evaluación, análisis y monitoreo ambiental; NRP = protección de recursos naturales; NVA = reducción de ruido y vibraciones; y SWR = limpieza o remediación de suelo y agua). Después de revisar los 257 productos propuestos dentro de la CLEG, se finalizó con una lista de 106 productos verdes. La reducción en el número de productos se debió principalmente a que la canasta exportadora en México solo contó con 106 de los 257 productos de la lista CLEG a cuatro dígitos; sin embargo, todas las categorías de productos verdes estaban presentes en la lista.

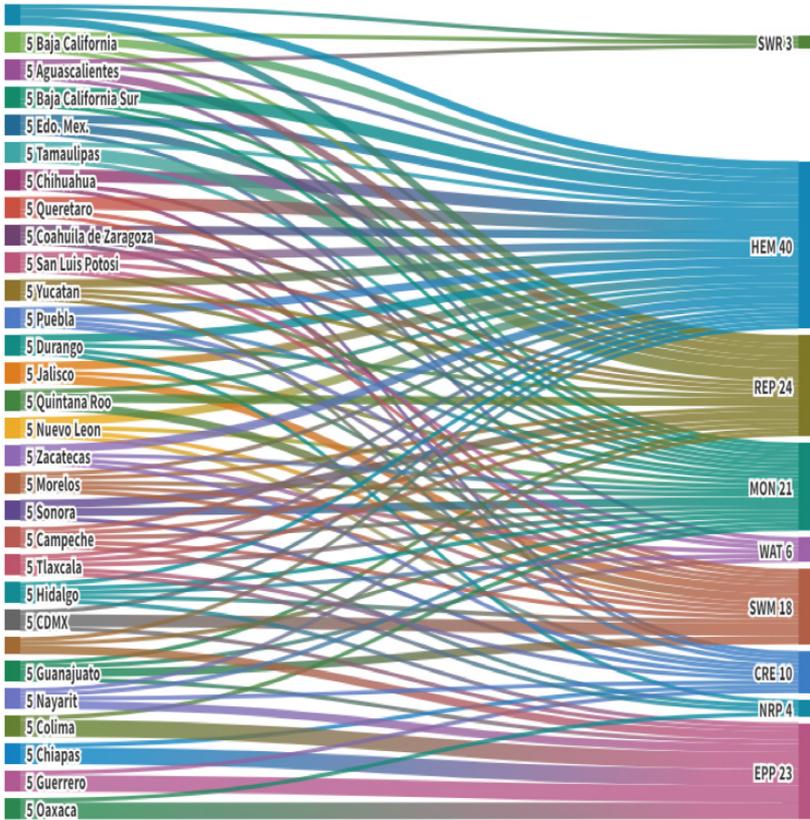
Los productos clasificados como EPP (productos ambientalmente preferibles basados en las características de uso o disposición final) son oportunidades de diversificación verde de regiones, como Chiapas, Colima, Guerrero, Hidalgo, Michoacán, Nayarit y Oaxaca. Las regiones con mayores capacidades tecnológicas tienen un futuro posible adyacente hacia productos verdes más sofisticados y complejos, mientras que las regiones rezagadas en complejidad económica, complejidad verde y complejidad verde potencial mostraron limitadas posibilidades de diversificación hacia productos verdes desde sus vocaciones actuales.

Algunas entidades tienen potencial para dar el salto a productos más sofisticados, como equipos de seguimiento, análisis y evaluación ambiental (MON) o plantas de energías renovables (REP), lo que implica que pueden dar ese salto con mayor factibilidad.

La Figura 4 muestra las oportunidades de diversificación verde más factibles por entidad. Se observa que la categoría de productos verdes denominada Gestión del calor y la energía (HEM, por sus siglas en inglés) es la más abundante, lo que implica que el país puede diversificarse/sofisticarse hacia productos verdes relacionados con esa categoría. En tanto, la categoría con menos afluencia de posibilidades de diversificación es Productos de limpieza o remediación de suelo y agua (SWR).

Lo anterior concuerda con la idea de que un desarrollo económico “verde” en México, es decir, la búsqueda de nuevos caminos hacia la sustentabilidad, no significa únicamente incentivar sectores vinculados a las energías renovables o a la electromovilidad: incluye la promoción de una variada gama de productos, como aquellos relacionados con la categoría Gestión del calor y la energía, productos relacionados con la categoría de Plantas de energía renovable o bien con la de Equipos de seguimiento, análisis y evaluación ambiental. Reconocer las capacidades verdes a nivel subnacional resulta crucial para trazar de mejor manera las hojas de ruta en materia de política industrial que busquen impulsar la economía verde en el país.

Figura 4. Top five de productos verdes con oportunidades de diversificación.



Acrónimos (tipos de productos verdes)	Cleaner or More Resource Efficient Technologies and Products (CRE)	Renewable Energy Plant (REP)
Heat and Energy Management (HEM)		
Environmentally Preferable Products Based on End Use or Disposal Characteristics (EPP)	Management of Solid and Hazardous Waste and Recycling Systems (SWM)	Environmental Monitoring, Analysis and Assessment Equipment (MON)

Clean Up or Remediation of Soil and Water (SWR)	Wastewater Management and Potable Water Treatment (WAT)	Natural Resources Protection (NRP)
---	---	---------------------------------------

Fuente: elaboración propia con base en Pérez-Hernández *et al.* (2021).

Conclusiones y reflexiones

En el presente documento se mostró la importancia de la complejidad económica y su relación con la economía verde. Se hace evidente la necesidad de contar con estudios más amplios, complementarios o particulares que exploren las relaciones entre la complejidad y la sustentabilidad.

El trabajo desarrollado por Pérez-Hernández *et al.* (2021) muestra una hoja de ruta hacia las posibilidades de diversificación verde; no obstante, es tarea de las agendas estatales de innovación identificar los sectores a los cuales se debe migrar y cuestionarse qué tan verdes son dichos sectores, no solo bajo la óptica de productos ambientales, sino también bajo la perspectiva de su proceso de producción o huella ecológica.

Queda claro que aún hay mucho por hacer en materia de economía verde, ya que hoy en día los debates sobre los listados de productos verdes siguen vigentes. Un grupo europeo de defensa del medio ambiente afirmó que, de una lista de 665 productos tentativamente ambientales, únicamente 140 artículos (el 20% de la lista) serían beneficiosos para el medio ambiente (World Trade, 2017).

Lo anterior revela la necesidad de reflexionar sobre las taxonomías de productos verdes y reconocer que la nomenclatura del Sistema Armonizado (HS) a seis dígitos muchas veces no es capaz de capturar productos verdes como los alimentos orgánicos derivados de la agricultura o aquellos productos que están inmersos en modelos de negocio verdes o circulares (EcoCanvas).

Otra sugerencia de investigación estaría ligada al estudio de los servicios verdes. En México esto sería posible haciendo uso de la información censal que no solo captura las actividades industriales, sino también las comerciales y de servicios. Aprovechar dicha información así como el alto nivel de granularidad con el que se cuenta una vez desglosada sería un complemento ideal para reconocer las posibilidades de diversificación en materia de servicios verdes.

Adicionalmente, se prevé necesario implementar estudios desde la óptica cualitativa que permitan indagar en las ecoinnovaciones y las capacidades tecnológicas requeridas para implementarlas, o bien en aquellos sectores que, en México, actualmente no se encuentran regulados,⁴ como es el caso de la industria de los insectos, la cual no está desglosada en el sistema armonizado. No obstante, se sabe que, bajo modelos de negocio sustentables, dichos sectores pueden ayudar a generar impactos positivos tanto en el plano ambiental como en el social, pero bajo modelos de negocio sin una perspectiva sustentable pueden provocar graves deterioros en el ecosistema.

Monitorear la economía verde, la economía circular y las actividades económicas que mitigan los impactos del cambio climático son temas fundamentales que deben ser atendidos mediante investigaciones interdisciplinarias bajo métodos novedosos, como lo es la complejidad económica, que ha demostrado poder explicar los procesos de transformación estructural. Para México, migrar de una economía marrón a una economía verde supondría transitar hacia la sustentabilidad.

Referencias

- Albino, V., Balice, A., y Dangelico, R. M. (2009). Environmental Strategies and Green Product Development: An Overview on Sustainability-driven Companies. *Business Strategy and the Environment*, 18(2), 83-96. DOI: <https://doi.org/10.1002/bse.638>.
- APEC (2012). *APEC Leaders Declaration: Annex C. Technical Report*. Asia-Pacific Economic Cooperation.
- Balland, P.-A., Broekel, T., Diodato, D., Giuliani, E., Hausmann, R., O'Clery, N., y Rigby, D. (2022). The Bew Paradigm of Economic Complexity.

4 Por ejemplo, en México existe la industria de insectos comestibles (ejemplos de empresas mexicanas en este sector son Totolines, Griyum y Nutrinsectos, que ofrecen productos derivados del chapulín). Otros productos que no se contabilizan son las ecoinnovaciones que aún no se exportan al espacio global de productos pero que existen en la economía nacional (por ejemplo, la empresa GECCO, de Nuevo León, que produce bioplástico de cáscara de naranja).

- Research Policy*, 51(3), 104450. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.respol.2021.104450>.
- Berchicci, L., y Bodewes, W. (2005). Bridging Environmental Issues with New Product Development. *Business Strategy and the Environment*, 14(5), 272-285. DOI: <https://doi.org/10.1002/bse.488>.
- Belmartino, A. (2022). *Green Complexity and Relatedness: Challenges and Diversification Opportunities for Regional Economies in Argentina* [material no publicado]. Gran Sasso Science Institute.
- Boschma, R., Balland, P.-A., y Kogler, D. F. (2015). Relatedness and Technological Change in Cities: The Rise and Fall of Technological Knowledge in US Metropolitan Areas from 1981 to 2010. *Industrial and Corporate Change*, 24(1), 223-250. DOI: <https://doi.org/10.1093/icc/dtu012>.
- Bustamante, T. I. B., Chávez, B. C., y Rindermann, R. S. (2017). Sostenibilidad de pequeños productores en Tlaxcala, Puebla y Oaxaca, México. *Cuadernos de trabajo de estudios regionales en economía, población y desarrollo*, 0(37), Article 37. <http://erevistas.uacj.mx/ojs/index.php/estudiosregionales/article/view/1531>.
- Bucher, H., Drake-Brockman, J., Kasterine, A., y Sugathan, M. (2014). *Trade in Environmental Goods and Services: Opportunities and Challenges*. International Trade Centre Technical Paper.
- Catalán, P., Navarrete, C., y Figueroa, F. (2020). The Scientific and Technological Cross-Space: Is Technological Diversification Driven by Scientific Endogenous Capacity? *Research Policy*, 5(1), 104016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.respol.2020.104016>.
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (2019). *La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: Una oportunidad para América Latina y el Caribe*.
- Deloitte (2019). *Quick Scan: Taxonomy Circular Economy*. Government of the Netherlands <https://www.government.nl/documents/reports/2019/06/27/the-taxonomy-circular-economy-report-provides-recommendations>.
- De Jong, S. (2016). *The Circular Economy and Developing Countries*. Centre of Expertise on Resources. https://hcass.nl/wp-content/uploads/2016/07/CEO_The-Circular-Economy.pdf.

- Dordmond, G., De Oliveira, H. C., Silva, I. R., y Swart, J. (2020). The Complexity of Green Job Creation: An Analysis of Green Job Development in Brazil. *Environment, Development and Sustainability*, 5(1). DOI: <https://doi.org/10.1007/s10668-020-00605-4>.
- European Commission (2020). *Categorisation System for the Circular Economy: A Sector Agnostic Categorisation System for Activities Substantially Contributing to the Circular Economy*. Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2777/172128>.
- Eurostat (2020). *Circular Economy Indicators*. https://ec.europa.eu/eurostat/cache/metadata/en/cei_srm020_esmsip2.htm.
- Ferraz, D., Falguera, F. P. S., Mariano, E. B., y Hartmann, D. (2021). Linking Economic Complexity, Diversification, and Andustrial Policy with Sustainable Development: A Structured Literature Review. *Sustainability*, 13(3), 1-29. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13031265>.
- Fracascia, L., Giannoccaro, I., y Albino, V. (2018). Green Product Development: What Does the Country Product Space Imply? *Journal of Cleaner Production*, 170, 1076-1088. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.190>.
- Hamwey, R., Pacini, H., y Assunção, L. (2013). Mapping Green Product Spaces of Nations. *The Journal of Environment & Development*, 22(2), 155-168. DOI: <https://doi.org/10.1177/1070496513482837>.
- Hartmann, D., Bezerra, M., y Pinheiro, F. L. (2019). Identifying Smart Strategies for Economic Diversification and Inclusive Growth in Developing Economies: The Case of Paraguay. *SSRN Electronic Journal*. DOI: <https://doi.org/10.2139/ssrn.3346790>.
- Hidalgo, C. A., Klinger, B., Barabási, A.-L., y Hausmann, R. (2007). The Product Space Conditions the Development of Nations. *Science*, 317(5837), 482-487.
- Hidalgo, C. A., y Hausmann, R. (2009). The Building Blocks of Economic Complexity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(26), 10570-10575. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.0900943106>.
- Hidalgo, C. A. (2021). Economic Complexity Theory and Applications. *Nature Reviews Physics*, 3(2), 92-113. DOI: <https://doi.org/10.1038/s42254-020-00275-1>.

- Hidalgo, C. A., Balland, P.-A., Boschma, R., Delgado, M., Feldman, M., Frenken, K., Glaeser, E., He, C., Kogler, D. F., Morrison, A., Neffke, F., Rigby, D., Stern, S., Zheng, S., y Zhu, S. (2018). The Principle of Relatedness. En A. J. Morales, C. Gershenson, D. Braha, A. A. Minai y Y. Bar-Yam (eds.). *Unifying Themes in Complex Systems IX* (451-457). Springer International Publishing. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-96661-8_46.
- Huberty, M., y Zachmann, G. (2011). *Green Exports and the Global Product Space-Prospects for EU Industrial Policy*. Bruegel.
- ICOA (2020). *Report of the Inter-American Commission on Organic Agriculture 2019-2020*. http://apps.iica.int/SReunionesOG/Content/Documents/CE2020/en/132d9deb-07f4-49d6-a237-f3a8ccf17629_id01_report_of_the_icoa_rev_2.pdf.
- Mealy, P., y Teytelboym, A. (2020). Economic Complexity and the Green Economy. *Research Policy*, 103948. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.respol.2020.103948>.
- Mealy, P., y Coyle, D. (2021). To Them That Hath: Economic Complexity and Local Industrial Strategy in the UK. *International Tax and Public Finance*. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10797-021-09667-0>.
- Medina, S. (2019). *Economía verde en México: Transformación económica, desarrollo social incluyente y cuidado del medio ambiente*. LID.
- Mulder, N., y Albaladejo, M. (2020). *El comercio internacional y la economía circular en América Latina y el Caribe*. CEPAL.
- OECD (1999). *Future Liberalisation of Trade in Environmental Goods and Services: Ensuring Environmental Protection as well as Economic Benefits. Joint Working Party on Trade and Environment*.
- OECD (2011). *Towards Green Growth: Technical Report*.
- Palazzo, G., Feole, M., Gutman, M., Bercovich, S., Pezzarini, L., Lourenco, M. B. D., y Mascarenhas, T. B. (2021). *El potencial productivo verde de la Argentina*. Fundar.
- Pegels, A., y Altenburg, T. (2020). Latecomer Development in a “Greening” World: Introduction to the Special Issue. *World Development*, (135), 105084.
- Pérez-Hernández, C. C., Salazar-Hernández, B. C., Mendoza-Moheno, J., Cruz-Coria, E., y Hernández-Calzada, M. A. (2021). Mapping

- the Green Product-Space in Mexico: From Capabilities to Green Opportunities. *Sustainability*, 13(2), 945. <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/2/945>. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13020945>.
- PNUMA (2011). *Hacia una economía verde: Guía para el desarrollo sostenible y la erradicación de la pobreza*.
- Reinsch, W. A., Benson, E., y Puga, C. (2021). *Environmental Goods Agreement*. Center For Strategic & International Studies. <https://www.csis.org/analysis/environmental-goods-agreement-new-frontier-or-old-stalemate>.
- Rindermann, R. S. (2015). La Red Mexicana de Tianguis y Mercados Orgánicos - Renovando sistemas de abasto de bienes de primera necesidad para pequeños productores y muchos consumidores. *Revista Ciencias de la Salud*, 24(4), 100-114.
- Sauvage, J. (2014). The Stringency of Environmental Regulations and Trade in Environmental Goods. *OECD Trade and Environment Working Papers*. https://www.oecd-ilibrary.org/trade/the-stringency-of-environmental-regulations-and-trade-in-environmental-goods_5jxrjn7xsnmq-en.
- Sdrolia, E., y Zarotiadis, G. (2019). A Comprehensive Review for Green Product Term: From Definition to Evaluation. *Journal of Economic Surveys*, 33(1), 150-178. DOI: <https://doi.org/10.1111/joes.12268>.
- Transport Enviroment (2015). *Enviromental Goods Agreement* https://insidetrade.com/sites/insidetrade.com/files/documents/sep2015/wto2015_2762b.pdf.
- UE (2020). *TEG Sistema de clasificación de la UE para actividades económicas ambientalmente sostenibles*. https://ec.europa.eu/info/files/200309-sustainable-finance-teg-final-report-taxonomy_en.
- World Customs Organization (2022). *Trade Tools: Harmonized system*. <https://www.wcotradetools.org/en/harmonized-system>.
- World Trade (2017). *Green products*. <https://insidetrade.com/daily-news/ngo-leaks-ega-product-list-finds-only-20-percent-items-would-help-environment>.



Hacia una innovación social estratégica: construcción de una hoja de ruta de tendencias enfocada en el ecoturismo en México

*Marisol Hernández Latorre
Carla Carolina Pérez-Hernández*

Introducción

El turismo de naturaleza en México representa una actividad económica de gran importancia al implementarse como estrategia para el desarrollo de las comunidades, al ofrecer una alternativa en la creación de fuentes de trabajo y promover el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2021). De acuerdo con información emitida por la Secretaría de Turismo (Sectur),

en 2016 arribaron a México 35 millones de visitantes internacionales, de los cuales el 25 por ciento (8.7 millones, o uno de cada cuatro turistas) realizó al menos una actividad relacionada con el turismo de naturaleza (Secretaría de Gobernación, 2021). Este tipo de turismo, si es planeado y gestionado de acuerdo con las características culturales y ecosistémicas de las regiones, representa beneficios socioeconómicos para los involucrados, en tanto debe considerar, entre otras cuestiones, los puntos contenidos en la Carta de Turismo Sostenible firmada en la Conferencia Mundial de Turismo Sostenible en Lanzarote, España (1995), los cuales resaltan la “solidaridad, el respeto mutuo y la participación de todos los actores implicados en el proceso, tanto públicos como privados”, y según la cual el desarrollo deberá “repercutir de forma efectiva en la mejora de la calidad de vida de la población e incidir en el enriquecimiento sociocultural de cada destino” (Secretaría de Turismo, 2002, p. 11).

El ecoturismo es una de las modalidades del turismo de naturaleza y un instrumento de desarrollo sostenible, siendo, según datos de la Secretaría de Turismo (2016, citada por Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2021), la más ofertada en el país, y que, de acuerdo con el interés del turista, se refiere a “los viajes que tienen como fin el realizar actividades recreativas de apreciación y conocimiento de la naturaleza a través del contacto con la misma” (Secretaría de Turismo, 2016, citado por Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2021). El ecoturismo debe lograr incluir los principios de sostenibilidad (eficacia económica, equidad social y sostenibilidad ambiental), evitando utilizar el término únicamente para señalar que una empresa se ubica en un área natural, sin que ello asegure el equilibrio entre las esferas económica, social y ambiental.

Por otra parte, y atendiendo a los beneficios que persigue el ecoturismo, se puede encontrar relación entre este y la innovación social. Este último concepto se refiere (de forma muy general, ante la diversidad de conceptos para este término) al proceso que se lleva para poner en práctica una idea novedosa (para el contexto) que responda a una necesidad social, la cual involucra y moviliza a sus beneficiarios (directos e indirectos) transformando sus relaciones sociales (empoderamiento, cohesión social, solidaridad, participación ciudadana, etcétera) para el mejoramiento de la calidad de vida.

Siguiendo a Parada *et al.* (2017), la innovación social encara el vigente sistema económico voraz “en búsqueda de una sociedad más equitativa y de mayores oportunidades para todos” (p. 3), donde los recursos locales son potencializados para el logro de “economías micro fortalecidas” (p. 2) mediante el esfuerzo y compromiso de los miembros de una comunidad y agentes externos (instituciones públicas, privadas o educativas, emprendedores o innovadores), cuyas aportaciones permitan la solución de las necesidades sociales prioritarias, procurando por consiguiente, el bienestar y la satisfacción de las necesidades individuales, tanto materiales como morales y emocionales, de los integrantes.

De la concepción teórica, el análisis y los estudios realizados por el Parque Científico y de Innovación Social (PCIS) de Cundinamarca, Colombia, sobre la innovación social, se han propuesto las bases para la elección de sus componentes y el desarrollo experimental de algunos indicadores. Los componentes de la innovación social resaltados por el PCIS son: calidad de vida, empoderamiento, apropiación social del conocimiento, sostenibilidad, replicabilidad y escalabilidad. Aquí, la correspondencia entre el ecoturismo y la innovación social se presenta una vez más, puesto que la innovación social es un proceso que se conforma de diversas etapas, que son, a grandes rasgos, “la identificación de posibles problemáticas sociales, la solución a estas problemáticas y la puesta en marcha de pilotos que permitan hacer seguimiento a la evolución de las innovaciones planteadas y, por último, la réplica y puesta en práctica de las innovaciones” (Méndez *et al.*, 2015, p. 21).

Estas etapas igualmente se desarrollan durante el ciclo de vida de un emprendimiento ecoturístico en el que, por consiguiente, es posible visualizar los componentes de la innovación social anteriormente señalados. Por lo anterior, tanto el ecoturismo como la innovación social pretenden mejorar la calidad de vida de las personas involucradas en dicha actividad, permitiéndoles satisfacer sus necesidades sociales, actuando bajo un enfoque de sostenibilidad.

Ante los retos por los que atraviesa la actividad ecoturística, resulta importante establecer oportunidades de mejora en las esferas económica, social y medioambiental en las que esta opera, ya que, debido a la falta de estrategias y objetivos claros, emergen latentes diferencias entre los

involucrados y las debilidades en torno a las empresas. Con base en lo anterior, y en atención a la correspondencia que existe entre el ecoturismo y la innovación social, la aplicación de herramientas estratégicas, como la generación de un *trend roadmap* (hoja de ruta de tendencias) del ecoturismo —que muestra las tendencias que enfrentará esta actividad en determinado horizonte temporal (futuro)—, coadyuvaría a establecer y alcanzar objetivos, así como potencializar sus resultados y beneficios, pudiendo trascender a un ecoturismo e innovación social *estratégicos* en las empresas ecoturísticas.

Breve revisión de la literatura

Innovación social

Existen múltiples enfoques y perspectivas que buscan situar a la innovación social como una categoría independiente o no de la innovación tradicional. Algunos estudios, como los realizados por Pol y Ville (2009, citados por Valle, 2017), expresan que ambas innovaciones “comparten el fin de mejorar la calidad o cantidad de vida” (p. 93) y presentan nuevas formas para relacionarse y colaborar.

Javier Echeverría (2008), en su artículo “El Manual de Oslo y la innovación social”, distingue que la innovación “no es un fin en sí misma, sino un medio” (p. 610) que permite incrementar la productividad, la competitividad y la producción, reducir costos e introducirse en nuevos mercados, haciendo énfasis en valores económicos y empresariales, mientras que la innovación social, además, debe referirse a valores sociales, “por ejemplo el bienestar, la calidad de vida, la inclusión social, la solidaridad, la participación ciudadana, la calidad medioambiental, la atención sanitaria, la eficiencia de los servicios públicos o el nivel educativo de una sociedad” (p. 610). Investigadores del Proyecto Europeo de Innovación Social la definen como “nuevas soluciones (productos, servicios, modelos, mercados, procesos, etcétera) que responden simultáneamente a una necesidad social (de manera más efectiva que las soluciones existentes) y que llevan a nuevas y mejoradas capacidades y relaciones y a un mejor uso de los recursos” (Tepsie, 2016, citado por Valle, 2017, p. 93).

Roadmap (hoja de ruta): una herramienta estratégica y de innovación

Tomando como referencia los estudios realizados por Innobasque (2011), un *roadmap* aporta “una visión estratégica de alto nivel sobre el tema o foco de interés que se analiza” (p. 8). Su diseño descansa sobre un gráfico de dos ejes. La variable tiempo se encuentra contenida dentro del eje horizontal (corto, mediano y largo plazo), mientras que las perspectivas que serán analizadas se colocan dentro del eje vertical, formándose un esquema modular en el que se logra visualizar la posición actual de la empresa (origen) y la trayectoria hacia la visión establecida (futuro). Esto sirve como una herramienta de planificación visual y flexible (Innobasque, 2011; Simonse, 2017). El *roadmap* no solo otorga una fuerte visualización y apoyo para la toma de decisiones, sino que además permite idear creativas respuestas para futuros desafíos. En esencia, ofrece un plan táctico para el diseño de innovaciones que logren convertir la visión en realidad (Simonse, 2017, pp. 10-12).

Las empresas necesitan contar con estrategias de negocio que les permitan dar respuesta a la pregunta “¿cómo vamos a llegar a cumplir nuestra visión?”. Al elegir una estrategia, la administración formula un plan de acción para poder competir con éxito y llevar a la empresa en la dirección deseada mediante el análisis de su entorno y el emprendimiento de acciones particulares. Para Porter (2011), la estrategia competitiva “consiste en ser diferente. Significa la selección deliberada de un conjunto de actividades distintas para entregar una mezcla única de valor” (p. 103). Una estrategia fructífera requiere de la toma de decisiones de entre un cúmulo de información que señala diversas formas de conducción de las que puede disponer una empresa, y elegir aquella(s) que la ayude(n) a “fortalecer su posición en el mercado y su competitividad, y mejorar su desempeño... un elemento distintivo que capte la atención de los clientes y genere una faceta competitiva” (p. 9).

El análisis del entorno en una organización consiste en descubrir cómo influirán los factores y el medio de una organización, ya sea directa o indirectamente (proveedores, clientes, competidores, ambiente sociocultural, político y económico, etcétera). Como sistemas abiertos, las organizaciones no se encuentran exentas a los cambios, de ahí que el

análisis de su entorno se pueda dividir en dos partes: análisis interno y análisis externo (Gallardo, 2012).

De acuerdo con Albiol y Lloveras (2010), la arquitectura básica de un *roadmap* contiene perspectivas de mercado, producto-servicio y tecnología; sin embargo, este podrá contener las perspectivas necesarias y horizontes específicos sobre los que se desee reflexionar en su construcción (Innobasque, 2011). La Tabla 1 muestra el diseño estándar de un *roadmap* (horizontes y perspectivas básicos), el cual previamente ha sido adoptado por Hernández *et al.* (2020) para su aplicación dentro de un estudio de caso sobre parque ecoturísticos.

Tabla 1. Arquitectura típica de un *roadmap*.

Aspectos o perspectivas básicas	Horizonte temporal		
	Corto: certezas <i>Objetivos de evolución</i> ¿Dónde estamos ahora?	Medio: apuestas <i>Abrir nuevos campos</i> ¿Qué camino seguiremos?	Largo: incertidumbres <i>Explorar</i> ¿Dónde queremos ir?
Mercado	¿Por qué? Detectar las necesidades y problemáticas del mercado. Se analizan el contexto global, la cadena de valor de la industria y el usuario o consumidor.		
Producto-servicio	¿Qué? Perfilar los productos o servicios que responden a los porqués (mercado) identificados. Identificar la percepción del cliente.		
Tecnología	¿Cómo? Modo de construcción de los qué (productos y servicios) y determinación de tecnologías y conocimientos requeridos. Se incluye el análisis de los recursos.		

Fuente: adaptado de Innobasque (2011, pp. 7, 10-11).

Roadmapping

Es un proceso de reflexión compuesto de tres etapas: asignación de valor, mapeo de ideas y mapeo de rutas/caminos. Cada una de estas etapas se compone de diversas actividades que dan forma al esquema modular del *roadmap*. El presente artículo aborda únicamente la primera etapa del

roadmapping, en específico la exploración de tendencias, la cual permitirá construir un *trend roadmap* (hoja de ruta de tendencias) del ecoturismo.

Primera etapa: asignación de valores. Construye las perspectivas valor para el usuario y mercado. Se concentra en analizar los ejes de influencia y las motivaciones que ayuden a identificar la dirección que debe tomar la empresa (Innobasque, 2011).

Exploración de tendencias. Implica la búsqueda de información sobre las megatendencias que rodean el mercado global para establecer un panorama futuro de su ambiente de una forma creativa. Identificar las megatendencias proveerá opciones potenciales de nuevas oportunidades en la creación de valor para el usuario.

De acuerdo con Lianne Simonse (2017), autora del libro *Design roadmapping*, existen estrategias para la “exploración del medioambiente” con el propósito de que la organización no pierda de vista posibles cambios. La técnica de tendencias STEP (Sociales, Tecnológicas, Económicas y Políticas) ofrece la exploración global de grandes tendencias que marcan oportunidades o posibles amenazas respecto a desarrollo social, novedades en ciencia y tecnología, desarrollo económico y cambios políticos y regulatorios, en aras de posibilitar la toma de decisiones estratégicas. Se han creado variantes de esta técnica que engloban los aspectos Demográfico y Ecológico (DESTEP), respondiendo al aumento de interés por la sustentabilidad.

Cuatro técnicas creativas para la exploración de tendencias. Lianne Simonse, Niya Stoimenova y Dirk Snelders (Simonse, 2017) definen la exploración de tendencias creativas como “el acto de comprender al combinar y unificar los datos aislados de la sensación, en una tendencia reconocible” (p. 52). Las cuatro técnicas son:

- 1) Escenarios de tendencias.
- 2) Temas en tendencia o *trend topics*.
- 3) Visualización de tendencias.
- 4) Patrones en tendencia.

Estas utilizan la síntesis de tendencias, que se diferencia del análisis de tendencias (DESTEP) debido a que compila toda la información con creatividad, combinando algunas partes para generar nuevas unidades de tendencias. En la Figura 1 es posible visualizar, a grandes rasgos, estas cuatro técnicas y las principales herramientas de las que se vale cada una para la creación de tendencias.

Figura 1. Principales herramientas de las cuatro técnicas creativas para la exploración de tendencias.

<p>Entrevistas a expertos. Entrevistas a clientes internos. Talleres con expertos. Lluvia de ideas. <i>Storyboard</i> y videos.</p> <p style="text-align: center;">Escenario de tendencias</p>	<p>Elementos visuales. Opiniones publicadas en revistas y televisión. Agrupamiento de las imágenes (conectar sus hallazgos tanto con temas locales, como con temas de que trascienden la industria).</p> <p style="text-align: center;">Temas en tendencia</p>
<p>Voz de expertos. Inmersión en el contexto. Tomar fotografías. Relación con las personas del lugar. Grupos de discusión.</p> <p style="text-align: center;">Visualización de tendencias</p>	<p>Mapas mentales. <i>Stakeholders</i>. Entrevistas. Entrevistas a expertos. Trabajo de campo. Agrupamiento de los patrones.</p> <p style="text-align: center;">Patrones en tendencia</p>

Fuente: elaboración propia.

Horizontes temporales. En la construcción del eje horizontal, Simonse (2017) expone que el diseño de los intervalos de tiempo está guiado por decisiones sobre los horizontes estratégicos y los momentos de transición. La técnica comprende tres escenarios paralelos basados en tres ciclos de vida que se superponen para crear una innovación continua a largo plazo. Cada ciclo de vida conceptualiza el desarrollo de nuevos negocios. El primero comienza en

el negocio actual con el mercado y las tecnologías existentes y se concentra en innovaciones de mejora del valor del diseño. El tercer escenario proyecta nuevas propuestas de valor en un nuevo mercado con nuevas tecnologías. Y el ciclo intermedio es el trampolín hacia un nuevo mercado, mediante la segmentación del valor del nuevo usuario o aplicaciones tecnológicas totalmente nuevas que son probadas por el usuario en un mercado existente.

Metodología

La presente investigación es de carácter empírico con en un enfoque exploratorio y prescriptivo. Se encuentra basada en la metodología expuesta por Lianne Simonse⁵ (2017), para la implementación de la primera etapa del *roadmapping*. La Figura 2 resalta las actividades para su desarrollo y la construcción del *trend roadmap*. Como principales fuentes de información se utilizaron el análisis de contenido *web*, la lluvia de ideas y sesiones de trabajo.

Figura 2. Primera etapa del *roadmapping*: actividades.



Fuente: elaboración propia.

5 Investigadora, académica y autora. Enseña *Design Roadmapping* en el programa de Maestría en Diseño Estratégico de Producto. Tiene maestría y PhD en Gestión de la Innovación y ha combinado sus puestos académicos con 20 años de experiencia profesional en la industria. Ha liderado proyectos de *roadmapping* y ha trabajado con diferentes organizaciones corporativas y empresas emergentes.

Como resultado del análisis de las herramientas que se adecuan a las posibilidades de los investigadores para acceder a la información, la técnica *trend topics* (temas en tendencia) fue seleccionada para la exploración de las tendencias del ecoturismo, bajo los siguientes pasos (Simonse, 2017):

1. Definir el área de interés (ecoturismo) para iniciar la exploración de tendencias.
2. Búsqueda profunda de información (imágenes, videos, opiniones, noticias, informes, etcétera) en Internet.
3. Elegir al menos 30 recursos que de alguna manera capturen el futuro del área.
4. Con el uso del *software* ATLAS.ti 8, agrupar y etiquetar los recursos que tienen elementos similares. Realizar un segundo agrupamiento detectando patrones entre los anteriores grupos y designar un título para las tendencias agrupadas.
5. Organizar los grupos de tendencias y clasificarlos de alto a bajo impacto y urgencia de innovación.
6. Elegir las tendencias más significativas con un alto impacto en los valores de los usuarios y obtener una lista de los principales temas en tendencias.

Resultados

Los factores macroeconómicos impactan en diversas formas y grados al ambiente competitivo en el que opera una empresa. Por ello es importante determinar “los factores más importantes desde el punto de vista estratégico, es decir, que tienen el peso suficiente para afectar las decisiones finales de la empresa” (Thompson *et al.*, 2012, p. 50). La Tabla 2 expone los puntos más importantes como resultado del exhaustivo análisis de contenido y del entorno (estudio de vigilancia del entorno) realizado.

Tabla 2. Matriz DESTEP.

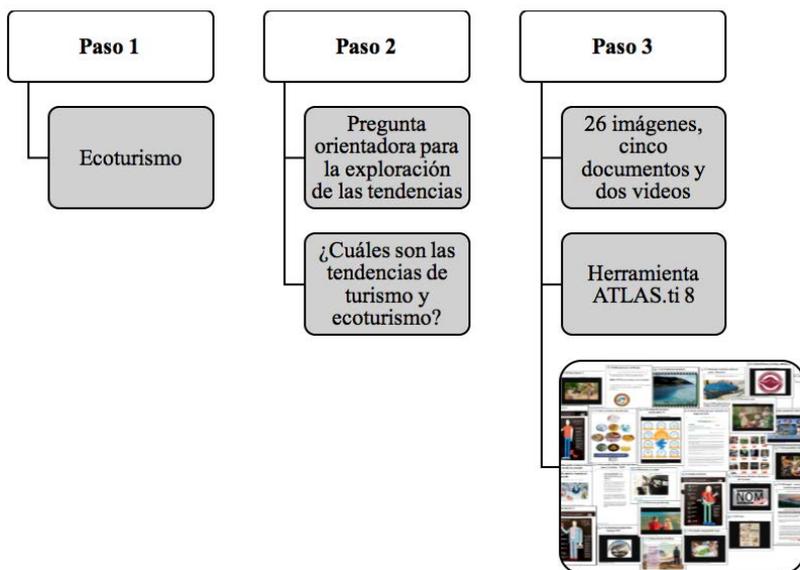
Demográfico	Ecológico	Social-cultural
<ul style="list-style-type: none"> • Disminución de la natalidad = disminución de la población joven en el futuro. • 2050, dos de cada diez personas estarán en el rango de edad 0-14 años (niños y adolescentes). • 2030, siete de cada diez personas estarán en el rango de edad 15-64 años (población joven y adulta). 	<ul style="list-style-type: none"> • Proceso intenso de degradación y pérdida de los ecosistemas terrestres. • El suelo es un recurso finito. • México enfrenta un problema serio y creciente de sobreexplotación de sus acuíferos. • Problemáticas en torno a la generación y manejo de los residuos. 	<ul style="list-style-type: none"> • En la vida de los jóvenes es muy importante la familia (58.3%) y la salud (57.7%). • Internet se ha convertido en una herramienta indispensable para la vida cotidiana de los jóvenes. • Factores que determinan el tipo de actividades que llevan a cabo las personas en su tiempo libre.
Tecnológico	Económico	Político
<ul style="list-style-type: none"> • Destinos Turísticos Inteligentes: es un espacio turístico innovador, accesible para todos. • Modelo <i>Smart Destination</i> (destino inteligente): ubica al turista en el centro de la estrategia y consta de cuatro pilares: tecnología, innovación, accesibilidad y sostenibilidad 	<ul style="list-style-type: none"> • Grave recesión económica. • Factores que inhiben el desarrollo del turismo, como la aversión de los turistas por situaciones de riesgo en los destinos vacacionales, así como la capacidad económica para asistir a determinados lugares en compañía de su familia (Quezada, 2020, p. 3). 	<ul style="list-style-type: none"> • La ONU sugiere que las políticas que adopten los países, a medida que se reanude el turismo, “podrían basarse en un enfoque centrado en las personas que diera protagonismo a los derechos, las normas internacionales del trabajo y el bienestar psicológico del personal en las estrategias de recuperación económica, social y ambiental”

(Secretaría de Turismo, 2018).		(Organización Mundial del Trabajo, 2021). <ul style="list-style-type: none"> • La Estrategia Nacional de Pueblos Mágicos (ENPM) es una iniciativa del gobierno de México clave para reactivar el turismo.
--------------------------------	--	---

Fuente: elaboración propia.

La Figura 3 muestra de forma sintética los pasos para la creación de la hoja de ruta de tendencias para el sector ecoturístico en relación con las posibilidades de innovación social del sector.

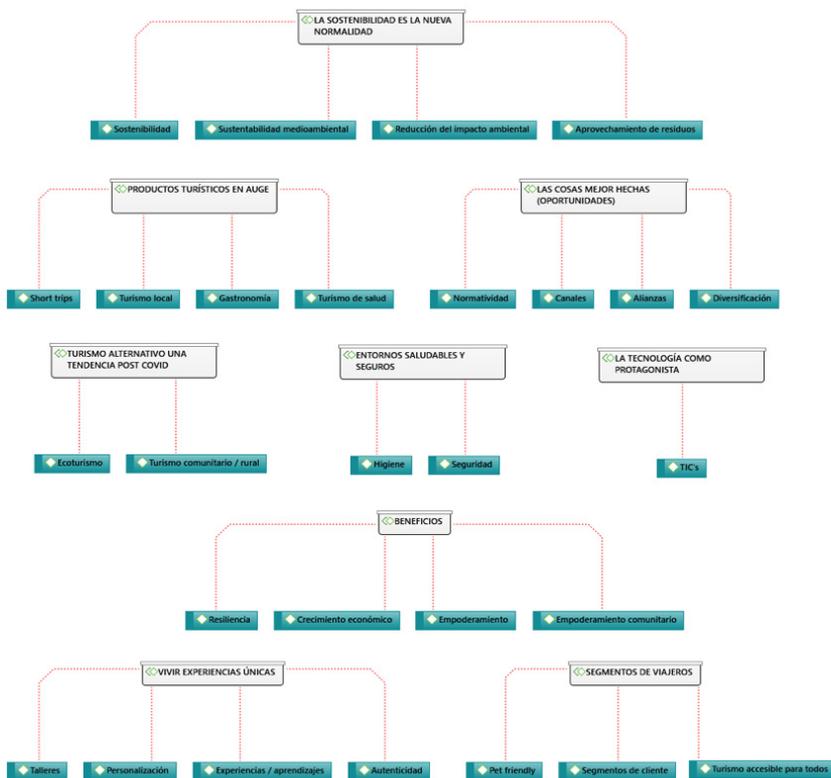
Figura 3. Creando trend topics: pasos 1, 2 y 3.



Fuente: elaboración propia.

En la ejecución del paso 4, y debido a la gran cantidad de información obtenida, fue utilizado el *software* ATLAS.ti 8 para la codificación abierta de los recursos recopilados en el paso 3. Posteriormente, se reagruparon los elementos con características similares y se les asignó un nombre distintivo con la finalidad de denominar las tendencias en torno al ecoturismo. La Figura 4 muestra las tendencias detectadas mediante ATLAS.ti 8.

Figura 4. Reagrupamiento de recursos, detección y titulación de patrones.



Fuente: elaboración propia.

Con base en la agrupación de los hallazgos, el paso 5 consistió en clasificar las tendencias según el impacto a largo plazo en el usuario. Esto proporcionó la inspiración y dirección necesarias para formular la visión de la hoja de ruta de tendencias: *Fortalecer la solidaridad, crecer mejor y encontrar el equilibrio entre las necesidades de las personas, la comunidad y el planeta, y la prosperidad* (apegado a las recomendaciones de la Organización Mundial del Trabajo, 2021), basado en la tendencia mejor clasificada: “La sostenibilidad es la nueva normalidad”. Posteriormente, se eligieron las tendencias que serían trazadas en el *trend roadmap* (perspectiva de mercado: macroambiente) con el fin de proporcionar los valores más exclusivos y prometedores (paso 6).

Disposición de las tendencias

La disposición de las tendencias a corto, mediano y largo plazo se determinó conforme a la teoría y metodología aportados por Simonse (2017):

- El *primer horizonte* implica evaluar los recursos y capacidades de la empresa para que, de forma inmediata, se identifiquen las fortalezas y debilidades que permitan establecer acciones en torno a la mejora continua de su ambiente socioecológico (sostenibilidad ambiental, económica y social).
- Para el *segundo horizonte*, la transición se refiere a la diversificación de productos y servicios, el impulso en el uso de TIC para elevar su potencial turístico y el entendimiento de su segmento de mercado con un enfoque de apertura a turistas con todo tipo de capacidades (accesibilidad).
- El *tercer horizonte* se dirige a alcanzar la visión propuesta en el *trend roadmap* para La Trucha del Zembo: Fortalecer la solidaridad, crecer mejor y encontrar el equilibrio entre las necesidades de las personas, la comunidad y el planeta, y la prosperidad. Como valores impulsores de esta visión se encuentran el uso sostenible de los ecosistemas, la economía circular y la innovación. Este horizonte es el más lejano y, siguiendo a Simonse (2017), abarca un lapso más extenso. Por lo anterior, y tomando como base las metas específicas a alcanzar en el año 2030 a nivel internacional como los Objetivos de Desarrollo

Sostenible (ODS) y el Acuerdo sobre el Cambio Climático de París de 2015, se seleccionó dicho año para lograr la visión a largo plazo de la hoja de ruta de tendencias.

Trend roadmap

Se dio forma a la dirección futura basándose en los intereses y los factores más importantes para los viajeros, bajo una conciencia ambiental en combinación con el impulso de la economía colaborativa. Para comunicar esto, se diseñó una hoja de ruta de tendencias que contiene tres horizontes temporales, durante un período de nueve años.

Descripción de las tendencias abordadas dentro del *trend roadmap*:

- Las cosas mejor hechas: se considera que la reactivación del turismo apunta en un primer momento al turismo local, seguido del turismo regional, por lo que se requiere un cambio que permita mejorar los procesos, los productos y los servicios ofertados, los valores (trato justo, integridad, conducta ética, sentido innovador, trabajo en equipo, calidad suprema, servicio superior al cliente, responsabilidad social y ciudadanía comunitaria, etcétera) y la normatividad en materia ecológica para lograr mantener al consumidor, a los colaboradores y al medio ambiente en el centro de la estrategia.
- Entornos saludables y seguros: sentirse y estar seguros representa una prioridad para todos los involucrados. Contar con protocolos de salubridad bien implementados y certificaciones expedidas por las autoridades competentes se traduce en la generación de confianza para los turistas y colaboradores de la empresa.
- La tecnología como protagonista: la tecnología y la innovación permitirán adoptar nuevas formas en la promoción, seguridad, personalización, flexibilidad, control de datos, generación de información, apoyo a la sustentabilidad, etcétera.
- Vivir experiencias únicas: las experiencias las protagonizan no solo los espacios, sino que los acompaña la calidad en el servicio, la actitud de los colaboradores, los aprendizajes y conocimientos compartidos y las vivencias genuinas.

- Segmento de clientes: es necesario entender las motivaciones, comprender las necesidades, hábitos y capacidades de los viajeros para ofrecerles una mejor experiencia, garantizando la accesibilidad de los turistas con requisitos de acceso específicos (personas con discapacidad).
- La sostenibilidad es la nueva normalidad: urge dejar de utilizar el término ecoturismo únicamente para señalar que una empresa se ubica en un área natural, sin que ello asegure que sea ecoamigable. Es necesario un cambio de paradigma que accione el desarrollo y la aplicación de ecotecnias, y que permita “aprovechar y conservar los recursos naturales, vincular al turista con los elementos sociales y ambientales de la localidad anfitriona a través de las instalaciones, servicios y actividades turísticas que realiza, sensibilizándolos sobre la importancia de su conservación” (Secretaría de Turismo, 2002, p. 17).

Figura 2. Trend roadmap del ecoturismo.



Fuente: elaboración propia con base en las tendencias seleccionadas resultantes de las técnicas DESTEP y *trend topics*.

Conclusiones

Utilizando la metodología para el diseño de hojas de ruta de Simonse (2017), en el que exponen las etapas para su construcción, el presente estudio desarrolló la primera de ellas, la cual apunta a la perspectiva de mercado enfocada al aspecto externo de su actividad ecoturística para la construcción de una hoja de ruta de tendencias a través de diversos pasos: recopilación de la información, selección, clasificación y descripción de las tendencias. Los resultados del análisis externo para este tipo de actividad turística señalan la necesidad de caminar de forma efectiva hacia el desarrollo sostenible, ofrecer experiencias únicas y aprendizajes, seguridad e higiene, así como mejorar su aspecto interno.

Finalmente, la construcción del *trend roadmap* dispone las tendencias seleccionadas durante un espacio de tiempo de nueve años, con base en la teoría adoptada que alude a los tres horizontes temporales y algunos puntos de transición en la línea de tiempo (en este caso, tianguis de pueblos mágicos 2021 y 2023, y el tianguis turístico digital 2021). Tras esto, fue posible obtener un esquema visual de las tendencias que impactan en el contexto ecoturístico, que a su vez permiten formular las acciones, tácticas, metas y estrategias para alcanzar los objetivos planteados. La flexibilidad de la hoja de ruta de tendencias radicará en las adecuaciones que las empresas del sector consideren pertinentes, con apego al examen de la información proporcionada y a la teoría para su diseño.

Resulta importante mencionar que las herramientas obtenidas derivadas del análisis de la información recopilada y procesada mediante el *software* ATLAS.ti 8 y las técnicas DESTEP y *trend topics* proporcionan validez y confianza a la estrategia de investigación utilizada.

En conclusión, la hoja de ruta de tendencias (*trend roadmap*) del ecoturismo proyectado al año 2030 es una herramienta de prospectiva visual y flexible que puede ser utilizada por diversos actores para la identificación de oportunidades genéricas dentro del sector.

Referencias

- Albiol, J., y Lloveras, J. (2010). Nueva guía metodológica de roadmapping para proyectos de innovación. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/10372>.
- Echevarría, J. (2008). El Manual de Oslo y la innovación social. *Arbor*, 184(732), 609-618. <https://doi.org/10.3989/arbor.2008.i732.210>.
- Gallardo, J. R. (2012). *Administración estratégica: De la visión a la ejecución*. Alfaomega.
- Méndez, E. L., Merino, C., y Rocha, D. (2015). Propuesta para formular indicadores de innovación social. *Corporación Universitaria Minuto de Dios*. <https://core.ac.uk/download/pdf/323209665.pdf>.
- Organización Mundial del Trabajo (2021). *La sostenibilidad es la nueva normalidad: una visión de futuro para el turismo*. Recuperado 21 de marzo de 2021 de <https://www.unwto.org/es/covid-19-oneplanet-recuperacion-responsable>.
- Parada, J., Ganga, F., y Rivera, Y. (2017). Estado del arte de la innovación social: Una mirada a la perspectiva de Europa y Latinoamérica. *Opción*, 33(82), 563-587. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6233641>.
- Porter, M. (2011). ¿Qué es la estrategia? *Harvard Business Review*, 5(1), 100-117. <https://www.ucipfg.com/Repositorio/MAES/MAES-03/Unidad1/ESTRATEGIA%20MPORTER%202011.pdf>.
- Aguirre-Quezada, P. (2020). Caída del turismo por la covid-19: Desafío para México y experiencias internacionales. *Mirada Legislativa*. <http://bibliodigitalibd.senado.gob.mx/handle/123456789/4882>.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2021). *Acciones y programas de turismo sustentable*. Recuperado el 8 de junio de 202 de <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/turismo-sustentable-116615>.
- Secretaría de Turismo (2002). *Turismo alternativo: "Una nueva forma de hacer turismo"*. Recuperado el 25 de abril de 2021 de <https://cedocvirtual.sectur.gob.mx/janium/Documentos/006145.pdf>.
- Secretaría de Turismo (2018). *Visión Global del Turismo a México*. <http://datatur.sectur.gob.mx/Documentos%20compartidos/VisionGlobalTurismoAMexAbr2018.pdf>.

- Secretaría de Gobernación (2021). Turismo de naturaleza, un mercado global con gran oferta: Sectur. <https://www.gob.mx/sectur/prensa/turismo-de-naturaleza-un-mercado-global-de-263-mmdd-mexico-cuenta-con-gran-oferta-sectur?idiom=es>.
- Simonse, L. (2017). *Design Roadmapping*. BIS Publishers.
- Thompson, A., Gamble, H., Peteraf, M., y Strickland III, A. J. (2012). *Administración estratégica. Teoría y casos*. McGraw-Hill; Interamericana.
- Valle, L. (2017). *Determinantes de la Innovación Social. Un estudio empírico en empresas de Economía Social* [tesis de doctorado]. Universidad de Murcia. https://digitum.um.es/digitum/bitstream/10201/55487/1/Tesis_Doct_Ledi%30%a1n%20Valle%20Mestre.pdf.

Nuevos retos y alternativas para la construcción de políticas públicas para enfrentar el cambio climático ante los resultados de la COP26⁶

Sócrates López Pérez

Juan Bacilio Guerrero Escamilla

Antecedentes

A mediados del siglo XVIII, la Revolución Industrial dio inicio a una de las etapas de desarrollo más importantes en la historia de las comunidades humanas, en la cual se encadenaron las revoluciones del pensamiento científico y de las ideas políticas, para la construcción de nuevas formas de convivencia y organización social, así como una gran transformación de la economía, el comercio, la diversificación de los mercados laborales, el desarrollo

de la agricultura y la industrialización de una amplia gama de actividades, que incluyen infraestructura y comunicaciones. La base del desarrollo de la economía la constituyen la innovación tecnológica, los nuevos procesos de producción más racionalizados, la integración de nuevos materiales, el progreso de la química y, en buena medida, el aseguramiento de energías estables, continuas, de fácil acceso y de generación masiva, entre las cuales se encuentran la energía obtenida de los hidrocarburos y la electricidad. Por otro lado, y una vez terminadas las experiencias de la construcción de las monarquías y la consolidación de una sociedad moderna, se dio la integración de los Estados nación y se configuraron la economía moderna, el derecho positivo, la construcción y el diseño de las instituciones actuales, la homogeneización de las poblaciones en la definición territorial y los nuevos procesos de globalización.

En la primera etapa de la Revolución Industrial se desarrollaron paralelamente las actividades de la metalurgia, la minería del carbón y la ingeniería mecánica, así como las bases para la construcción de conocimiento científico que será aplicado para la creación de nuevos campos tecnológicos. En las siguientes etapas de la Revolución Industrial, junto al crecimiento de la población, la emergencia de industria, las ciudades, la agricultura, las comunicaciones y la infraestructura, así como de nuevos capitales y de la innovación de procesos productivos. Con la entrada al siglo XXI, se inició una cuarta revolución industrial (4i), que se ha caracterizado por procesos radicales de innovación tecnológica, la incorporación de la ciencia moderna, la utilización de nuevos materiales y el desarrollo de competencias en el trabajo. Sin embargo, a lo largo de estas etapas de la Revolución Industrial se han mantenido las mismas formas de generación y utilización de energía en todos sus procesos, basados en la utilización del carbón, los hidrocarburos y la electricidad (a su vez generada a partir de procesos termoeléctricos), y las industrias de la refinación de petróleo, las termoeléctricas, las cementeras, del hierro y acero y de la química. En estas industrias se han desarrollaron tecnologías de motores de combustión interna, así como la química de energías fósiles, que hasta el momento han sido la base tecnológica de la producción de bienes, del movimiento de todo tipo de transporte, de la generación de electricidad y de gran diversidad de productos plásticos (polímeros).

La base energética de la Primera Revolución Industrial se dio a partir de la explotación de las fuentes carboníferas. Más adelante, con el desarrollo de las industrias química, metalmecánica y de los motores de combustión interna, se logró obtener energía mediante los hidrocarburos o fuentes fósiles (petróleo y combustibles derivados), las cuales han dominado desde principios del siglo XX, y mantienen una aplicación amplia en múltiples campos de la economía: transporte en todas sus formas, maquinaria y equipo industrial, producción de cemento, refinerías, en las termoeléctricas, industria química en general, metalurgia, automotriz, ganadería, agricultura y la construcción, principalmente (Hobsbawm, 1975, p. 89).

Producción de dióxido de carbono (CO₂) y cambio climático

Los procesos de industrialización antes descritos se ampliaron a lo largo del siglo XX y facilitaron el crecimiento de la población y, por lo tanto, la ampliación de los mercados, así como el fortalecimiento de los Estados nación, la integración de redes comerciales internacionales y cadenas de insumos, la aparición de capitales y empresas transnacionales y la globalización de la producción, sustentada en múltiples encadenamientos de insumos. Desde su inicio, esta revolución ha transformado grandes cantidades de los combustibles fósiles en energía, generando diversos gases, entre ellos el más importante, el dióxido de carbono (CO₂), que al integrarse a la atmósfera generó nuevos fenómenos climáticos, como el efecto invernadero, el incremento de la temperatura global y, por lo tanto, el cambio climático (IPCC-WGIII, 2002, p. 8).

El cambio climático es un fenómeno enlazado a la emisión de estos compuestos y gases efecto invernadero (CyGEI) de origen antropogénico y está relacionado directamente con estas revoluciones industriales, así como a todo el desarrollo de la economía actual. Desde la creación del IPCC, se ha encontrado que los efectos derivados del fenómeno del cambio climático son aquellas alteraciones extraordinarias de fenómenos climáticos (lluvias, calor, heladas, tormentas, sequías, etcétera) que se presentan esporádicamente, con mayor intensidad y fuera de tiempos regulares, y que tienen una fuerte relación con el incremento de la temperatura de la tierra. Estas alteraciones del clima están enlazadas al incremento de la temperatura global en el planeta, derivada

directamente del incremento del dióxido de carbono (CO₂) principalmente, y de otros compuestos, que se han acumulado, según el Segundo Informe del IPCC, en la atmósfera durante el último siglo. En este caso, bajo el modelo del IPCC, está demostrado que el CO₂ es un regulador natural del clima que, al incrementar sus volúmenes emitidos por fuentes antropogénicas, está provocando un incremento en la temperatura de la Tierra. El incremento y la acumulación del CO₂ en la atmósfera está provocando cambios en los procesos naturales del forzamiento radiativo, en este caso positivo, ya que hay una ganancia de energía solar en la diferencia entre la insolación absorbida por el planeta y la energía que rebota de regreso al espacio. Con este incremento de los CyGEI se altera el equilibrio radiativo de la Tierra, generando cambios en los rangos normales de la temperatura. El gas de mayor abundancia generado por los diversos procesos industriales es el CO₂; sin embargo, encontramos que otras actividades humanas están generando metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), óxido nítrico (NO_x), vapor de agua (H₂O), ozono (O₃) y otros tales como hexafluoruro de azufre (SF₆), hidrofluorocarbonos (HFC) y los perfluorocarbonos (PFC), los cuales se han acumulado en la atmósfera en forma más intensa desde la década de 1960, estresando el forzamiento radiativo, el efecto invernadero y por lo tanto el calentamiento global.⁷

Organización global para la intervención ante el cambio climático

Ante este escenario, y después de varias décadas de investigación científica a lo largo del siglo XX, de organización ciudadana, emergencia de movimientos sociales ambientalistas, diseño e implementación de regulaciones para el control de emisiones e intenciones de construir instituciones que operen nuevas leyes ambientales, se logró crear una organización internacional que reconoció la existencia del cambio climático. Así, el cambio climático se convirtió en un tema importante en tanto fenómeno de origen antropogénico de impacto global, y se reconoció la relación entre incremento de la

7 Ver Informe del Grupo de Trabajo I: Base de las Ciencias Físicas. En *IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007* (IPCC, 2007). Aquí se demuestran todos estos elementos señalados: https://archive.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/es/faq-2-1.html.

temperatura y emisión de gases efecto invernadero (GEI), su calificación, unidades de medida y fuentes de emisión, por parte del IPCC, tal y como se ha mencionado con anterioridad. Con ello, el cambio climático se comenzó a abordar como un problema público, global y de interés institucional de los Estados modernos para integrarlos a su agenda de gobierno.

El primer paso se dio a través de la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (UNFCCC), en 1992, en la Primera Cumbre de la Tierra en Rio de Janeiro, Brasil, donde se establecieron los tres primeros elementos biofísicos sobre las condiciones del ambiente en el planeta: la desertificación, la pérdida de biodiversidad y el cambio climático. Este último cobró mayor relevancia en la preocupación mundial y en torno a él se generaron los primeros acuerdos de la comunidad científica. Estas primeras acciones permitieron integrar la Conference of Parties (COP), donde los gobiernos de cada país son esas partes, que se desarrolló en Berlín, Alemania, en 1995. Ello dio paso a las diversas cumbres anuales para analizar el comportamiento del cambio climático y diseñar estrategias y acciones de intervención para su mitigación y la adaptación ante sus efectos a nivel global.

De las diversas conferencias de las partes (COP), la tercera, en Kyoto, Japón, en 1997, y la vigesimoprimera, de París, Francia, en 2015, han marcado los acuerdos más importantes para afrontar el cambio climático. Uno de los avances más importantes fue identificar los países con mayor emisión de CyGEI, con base en sus fuentes y niveles de desarrollo, para a partir de ello definir responsabilidades en los volúmenes de emisiones de aporte global e impacto sobre el efecto invernadero. Así, se ha obligado a estos países a reducir sus niveles de emisiones y a diseñar programas de intervención e inversiones para la mitigación de emisiones de CyGEI, con planes, objetivos y diversos mecanismos de evaluación para hacer efectiva esta intervención. Con el Acuerdo de París⁸ cambian estos elementos, pues

8 Por primera vez este acuerdo señala puntualmente todos los elementos de análisis científico y acuerdos tomados por los miembros de la COP21 y que cobran gran importancia para definir el futuro ambiental de la tierra como una entidad ambiental global. Se puede consultar en https://unfccc.int/sites/default/files/spanish_paris_agreement.pdf

ahora se considera que cualquier país —industrializado o en proceso de desarrollo— es igualmente emisor, y se confirma a China como el país de mayor aporte de CyGEL, al tiempo que se clasifica a los demás como emisores importantes en la misma escala. En consecuencia, se agregan reclamos de los países en desarrollo a ser obligados a reducir sus emisiones a costa de su propio crecimiento industrial y economía, siendo que están en la escala de menor aporte de CyGEL, tal y como se discute en cada COP y está definido en el Acuerdo de París, señalado anteriormente.

El Acuerdo de París dejará en manos de cada país, y en forma voluntaria, los volúmenes de emisiones, los niveles de mitigación y la voluntad de diseñar sus propios planes de acción e inversión para enfrentar el cambio climático. Por lo tanto, se pierden los compromisos globales y su desvinculación jurídica para el cumplimiento de acuerdos globales. De esta misma Conferencia de París (COP21) se desprenderá un logro importante, y que aún se mantiene, que es el acuerdo de disminuir las emisiones de CyGEL, de tal forma que el aumento de la temperatura del planeta se mantenga por debajo de los 2°C para finales del siglo, y, de preferencia, hacer el esfuerzo para mantener un límite máximo de 1.5°C, según el contenido del Acuerdo.

Las diversas COP han servido para establecer acuerdos y reglas amplias que orienten la implementación de acciones en cada país, pero que a su vez sean comunes y estén enfocadas a la mitigación y adaptación ante el cambio climático, para reducir el calentamiento global y en las escalas acordadas. Sin embargo, y desde su implementación en el año 2020, se dejaron de lado algunos elementos del Artículo 6 del Acuerdo de París, para homogeneizar los criterios de métodos y modelos de medir las emisiones de cada país.

5. Las Partes reconocen que la labor de adaptación debería llevarse a cabo mediante un enfoque que deje el control en manos de los países, responda a las cuestiones de género y sea participativo y del todo transparente, tomando en consideración a los grupos, comunidades y ecosistemas vulnerables, y que dicha labor debería basarse e inspirarse en la mejor información científica disponible y, cuando corresponda, en los conocimientos tradicionales, los conocimientos de los pueblos indígenas y los sistemas de conocimientos locales,

con miras a integrar la adaptación en las políticas y medidas socioeconómicas y ambientales pertinentes, cuando sea el caso.

Naciones Unidas FCCC/CP/2015/L.9 Convención Marco sobre el Cambio Climático. Distribución. Limitada, 12 de diciembre de 2015. Español (original: inglés). GE.15-21930 (S) 121215 121215 *1521930*. Conferencia de las Partes, 21er período de sesiones, París, 30 de noviembre a 11 de diciembre de 2015. Pág. 29.

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC)

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) fue creado por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y la ONU Medio Ambiente con la idea de diseñar un plan de intervención para incidir sobre la mitigación del cambio climático. Este panel, con base en estudios científicos, ha definido la situación actual como:

1. La emisión y concentración de GEI en la atmósfera terrestre está vinculada directamente con el comportamiento de la temperatura media mundial de la Tierra.
2. Mediante diversos modelos de simulación y grandes bases de datos de observatorios climáticos locales se ha demostrado que la concentración de GEI se ha incrementado progresivamente desde la Revolución Industrial y, con ella, la temperatura del planeta.
3. El dióxido de carbono (CO₂) es el gas más abundante, pues forma dos tercios de los tipos de GEI, resultado del uso de combustibles fósiles.

El IPCC, en su quinto informe de evaluación correspondiente al año 2014, calculó la emisión de CO₂ desde el periodo preindustrial hasta el año 2011 y determinó que ha generado cambios en el nivel medio anual del mar en cerca de 19 cm, un incremento en la temperatura media mundial de 0.85°C y una disminución en la extensión del hielo marino en el Ártico a razón de 1.07×10^6 km² de hielo por década. El cambio climático se refiere a cualquier cambio en el clima ocurrido con el tiempo, debido a la variabilidad

natural o como resultado de actividades humanas. La Convención Marco sobre Cambio Climático (CMCC), que entró en vigencia el 21 de marzo de 1994, estableció al cambio climático como un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana, que altera la composición de la atmósfera mundial e incide en los cambios naturales del clima, bajo datos en periodos de tiempo comparables.

Para el año 2021, en su Sexto Informe, el IPCC hizo señalamientos de gran importancia sobre las nuevas mediciones de incremento de la temperatura y los impactos sobre el clima del planeta. En dicho informe se incluyeron los diversos escenarios probables de colapso, niveles de temperatura y línea de inflexión, y con ello, los grandes retos de intervención y acciones para detener el incremento de la temperatura, los cuales deben ser asumidos en la COP26 de Glasgow, Escocia, en 2021.⁹

Los resultados más importantes de este informe nos muestran diversos escenarios de emisiones de GEI, incremento de los volúmenes de CO₂ así como presencia de CH₄ como un gas emergente y en constante incremento. Lo que más se destaca es:

1. Se confirma que el cambio climático es global, está cambiando su intensidad y aceleramiento y cada vez se observa que está cambiando más el sistema climático.
2. Estos cambios en el clima del planeta están sucediendo en todas las regiones y los datos obtenidos muestran cambios significativos en los datos en series de tiempo. En este caso muestran incremento de GEI, temperatura, niveles del mar, deforestación, pérdidas de especies y alteración de los fenómenos globales climáticos.
3. Se confirma que el calentamiento global se encuentra en 1.5°C y se mantendrá en las siguientes décadas. Las causas de este incremento —incluso se calcula en 2°C— son antropogénicas, por lo cual pueden ser controlables, en tanto se regulen y mitiguen las emisiones de GEI en forma inmediata.
4. Uno de los mayores impactos del cambio climático incide en el ciclo

⁹ Para ver a detalle y contar con los elementos necesarios para definir una agenda ambiental, consultar López Pérez *et al.* (2021b, pp. 13-48).

hidrológico, en tanto intensifica las precipitaciones, inundaciones, sequías intensas y golpes de calor. Los patrones de precipitaciones están cambiando: estas son más intensas en las partes altas y menos frecuentes en regiones subtropicales. Las zonas costeras presentan incrementos continuos en sus niveles del mar y erosiones costeras.

5. Cambios en las características de los mares, acidificación de los océanos, olas de calor marinas y alteración en los volúmenes de oxígeno que generan. A su vez, esto tiene relación con el derretimiento de glaciales y mantos de hielo a nivel global. Estos cambios repercutirán en la alteración de los ecosistemas de los océanos.
6. Estos cambios repercutirán en todas las comunidades humanas, principalmente en las ciudades, ya que actualmente representan los lugares que concentran la mayor población mundial y mantienen tasas de creciente continuo. Las repercusiones ya se han visto a través de las inundaciones, golpes de calor, tormentas irregulares e intensas, sequías y heladas que alteran la vida cotidiana de la población y ponen en riesgo sus viviendas y formas de vida (IPCC, 2021).¹⁰

En cuanto al comportamiento de emisiones de los CyGEI, y según la undécima edición del Informe sobre la Brecha en las Emisiones del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), con el reporte del programa para el Medio Ambiente-ONU (Informe sobre la Brecha en las Emisiones de 2020), el diagnóstico señala:

1. Incremento de emisiones a nivel global de GEI durante los tres últimos años, a 2020. Actualmente se encuentran en 52.4 GtCO₂e (dentro de un rango de ±5.2), más las emisiones por cambio de uso de la tierra, y 59.1 GtCO₂e (dentro de un rango de ±5.9). En este caso, la tendencia señala que estas emisiones fósiles de CO₂ alcanzaron en 2019 el nivel más alto hasta el momento de: 38 GtCO₂e (rango de ±1.9).

¹⁰ Estos resultados hasta el momento no han quedado señalados en ningún documento oficial de la COP26, como el Sexto Informe del IPCC, pues son declaraciones de conclusión de la reunión.

2. La tendencia de la emisión de GEI desde 2010 ha mantenido un crecimiento promedio anual del 1.3%. Hay que agregar la emisión derivada del cambio de suelo, con el 11% global, y que en estos años se incrementó 2.6%, como consecuencia de los últimos incendios forestales.
3. En este periodo se mantienen los mismos países emisores de la mayor cantidad de GEI, China, Estados Unidos de América, la Unión Europea y la India, que emitieron el 55% de los gases totales. A estos países se agregan la Federación de Rusia, Japón y el transporte internacional, con el 65% de las emisiones. Los países del G20 generaron el 78% del total al año 2020.
4. El incremento de CO₂ se está dando en iguales proporciones que otros GEI, entre ellos del metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O). Sin embargo, no se les ha dado la misma importancia, por lo cual deben analizarse los elementos de intervención para reducirlos en forma equilibrada para el logro de cero emisiones de carbono, pues estas emisiones, al igual que el CO₂, generan calentamiento global, solo que en diversas escalas y potencia.
5. En el periodo de pandemia por Covid-19 se ha tenido gran esperanza en que se pueden reducir las emisiones de GEI. Sin embargo, esta sería a costa de cambios en la economía mundial y en los hábitos de consumo. La Agencia Internacional de la Energía (AIE) ha proyectado que, con base a esta tendencia, y manteniendo los mismos niveles de consumo y producción bajo pandemia, se lograrían emisiones cerca de las 44 GtCO₂e para el año 2030, lo que implicaría una reducción del 25% de emisiones, es decir, cerca de 15 GtCO₂e menos.¹¹
6. La reducción de la movilidad, hasta el momento, sí ha logrado disminuir las emisiones de CO₂ por el consumo de combustibles fósiles (gasolina, diésel, gas); en 2019 estaban en 33.62 GtCO₂,

11 El CO₂e se refiere al potencial de calentamiento global (GWP), cuya relación es CO₂eq=masa del gas × potencial del calentamiento global. Hoy se utiliza esta equivalencia derivada de que el CO₂ es el gas de mayor presencia, además de tener un potencial de calentamiento mucho menor que el de otros gases, como el metano o los óxidos nitrosos.

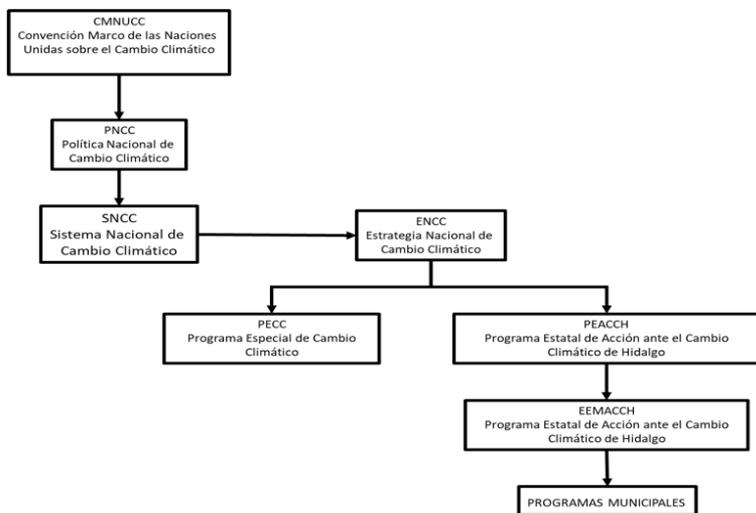
alcanzando un máximo de 33.63 Gt el año anterior. Siguiendo el patrón de años anteriores, las emisiones en China siguieron aumentando con un crecimiento interanual del 1.7% en 2019. Por el contrario, las emisiones en Estados Unidos disminuyeron un 3.3% en 2019, reanudando la disminución de tres años que se interrumpió brevemente en 2018. Las emisiones en la India apenas disminuyeron en 2018 después de aumentos constantes durante muchos años. Finalmente, las emisiones de CO₂ en la Unión Europea continúan su tendencia a la baja, con un descenso interanual del 4.9%. Estados Unidos y Alemania lideraron el camino, con caídas interanuales del 9.7% y 9.1% respectivamente. Las emisiones de CO₂ también cayeron en Brasil (-6.2%), la Federación Rusa (-5.2%) y Japón (-3%) (Agencia Internacional de Energía, 2022).

Construcción del Sistema Nacional de Cambio Climático en México

Como parte de los acuerdos tomados en las diversas COP en las que ha México ha participado, sobre todo a partir de los Acuerdos de París, se han diseñado diversas leyes e instituciones que definen en forma interna estos compromisos. En este caso, los principales están orientados hacia las formas en cómo se debe diseñar una política pública para la mitigación y adaptación ante el cambio climático, qué elementos debemos diseñar para dejar de emitir GEI y cómo regular las fuentes de emisión. Para ello se diseñaron, de principio, la Ley General de Cambio Climático en 2012, así como la Estrategia Nacional de Cambio Climático (ENCC) en 2013. Posteriormente se crearon las instancias e instituciones que operan dichas Ley y la Estrategia: el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) es un organismo operativo, público y descentralizado de la administración pública federal, con personalidad jurídica, patrimonio propio y autonomía de gestión, sectorizado en la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat), de conformidad con las disposiciones de la Ley Federal de las Entidades Paraestatales (*Diario Oficial de la Federación*, 6 de junio de 2012, pp. 5).

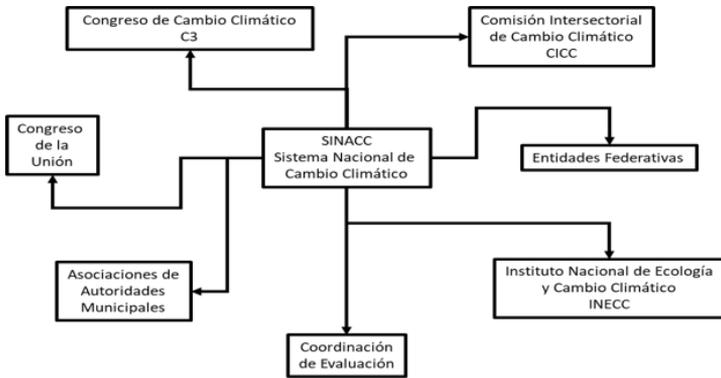
Dentro de esta estructura jurídica e institucional se deben crear a nivel estatal las mismas instituciones que hagan operativos estos acuerdos internacionales para desarrollar sus propios planes y programas de mitigación y adaptación ante el cambio climático. De esta forma se han diseñado, construido e implementado para el estado de Hidalgo la Ley Estatal de Cambio Climático y la Ley de Mitigación ante los Efectos del Cambio Climático para el Estado de Hidalgo (última reforma: julio de 2017), de donde se genera el programa rector de la política estatal en el mediano plazo para enfrentar los efectos del cambio climático: se trata del Programa Estatal de Acción ante el Cambio Climático (PEACCH), siendo la Estrategia Estatal de Mitigación y Adaptación ante el Cambio Climático de Hidalgo (EEMACCH) el instrumento que le dará operatividad (*Diario Oficial de la Federación*, 2013, pp. 1-29).

Figura 1. Sistema Nacional de Cambio Climático: sistema jurídico.



Fuente: elaboración propia con base en López Pérez *et al.* (2021c, pp. 13-48).

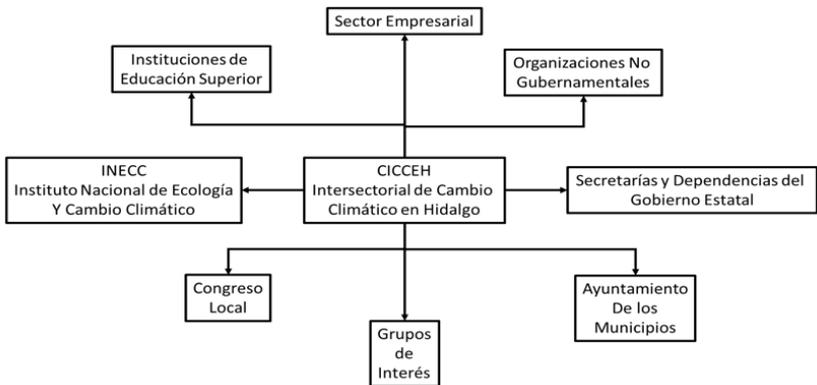
Figura 2. Sistema Nacional de Cambio Climático: instituciones.



Fuente: elaboración propia con base en López Pérez *et al.* (2021a, pp. 13-48).

Esta estrategia debe integrarse entre los diversos actores e instituciones que intervienen en el espacio territorial y administrativo, en el cual se encuentran las fuentes antropogénicas que aportan los diversos GEL, además de sus niveles de vulnerabilidad, los cuales han sido definidos por los modelos y analizados bajo el siguiente esquema de participación:

Figura 3. Transversalidad de la Estrategia Estatal de Mitigación y Adaptación ante el Cambio Climático de Hidalgo (EEMACCH).



Fuente: elaboración propia con base en López Pérez *et al.* (2021b, pp. 13-48).

Para el desarrollo de la estrategia de mitigación a nivel estatal se desarrollaron la Línea Base y los Inventarios de los Gases de Efecto Invernadero (GEI), los cuales básicamente son aquellas fuentes que aportan la mayor cantidad de CO_2 . De estos, el GEI más importante para Hidalgo, señalado en la Estrategia Estatal de Mitigación y Adaptación ante el Cambio Climático de Hidalgo (EEMACCH), ya que aporta emisiones netas en el estado por categoría de GEI (Gg de CO_2 eq), con un total de 24,225.42 Gg anuales. En tanto, el total de emisiones de CO_2 anuales para Hidalgo es de 32,194.62 Gg, lo cual que constituye el 75.24% del aporte estatal (PEACCH, 2013-2016).

A su vez, las fuentes que determinan este aporte son el combustible quemado en la industria generadora de electricidad (7,342.58 CO_2 eq), la producción de cemento (como procesos industriales, con 3,710.84 CO_2 eq), combustibles quemados en la industria química (2,708.970 CO_2 eq) y el sector de móviles, en su fuente de transporte terrestre (2,671.46 CO_2 eq), que en conjunto aportan el 59.77% de las emisiones en cuestión. A nivel municipal las distribuciones de los aportes son muy dispersos, es decir, quedan concentrados principalmente en las mayores ciudades y zonas metropolitanas (Pachuca, Tulancingo y Tula, y que hoy se toman como Cuencas Atmosféricas, según la CAME) que tienen desarrollos de la industria (termoeléctrica, refinería, cementeras, industria química y riego mediante aguas residuales), a la vez que cuentan con grandes cantidades de vehículos y transporte diverso, grandes volúmenes de aguas residuales, residuos sólidos y ganadería intensiva.¹²

Línea base e inventario de GEI para el estado de Hidalgo

Los diversos trabajos de investigación que se han desarrollado los últimos veinte años han logrado definir la composición y las características de las emisiones y fuentes de los diversos gases de efecto invernadero. En estado de Hidalgo, estos resultados han permitido identificar el aporte de GEI en la agricultura, actividad en la que se concentran las emisiones de CH_4 , N_2O y, en menor medida, CO_2 , aportado por maquinaria agrícola, aguas

12 Ver con más amplitud en López Pérez *et al.* (2021b, pp. 13-48).

residuales para el riego y fertilizantes. En este tipo de fuente la estrategia debe orientarse hacia acciones de mitigación del 30% de las acciones de sustancias químicas que se aplican durante los cultivos. En este caso, las regiones que están aplicando grandes cantidades de químicos son el Valle del Mezquital (en los cultivos de forraje) y, en menor medida, la Huasteca y Sierra (en diversos cultivos de consumo humano). Sin embargo, el metano se ha concentrado derivado de los años de aplicación de agua residual proveniente de la Ciudad de México para la agricultura.

Como consecuencia de ello, el CH_4 ha atraído grandes recursos y esfuerzos para su mitigación, mayormente hacia las aguas residuales, ya que estas emiten más de 21 millones de toneladas de metano anualmente y casi un millón de toneladas de N_2O . En este caso se presenta con mayor volumen en la región del Valle del Mezquital: en 21 de sus municipios se irrigan los cultivos con aguas residuales emitidas por la Ciudad de México desde finales del siglo XIX, y con el crecimiento de la población y la apertura de más áreas de cultivo esto se ha incrementado significativamente. Este aporte se ha concentrado los últimos años en la región de Tula-Tepeji y en la red de presas de los Distritos de Riego 03 y 100, en Hidalgo.

En este tipo de fuente de área, se señala con claridad la marca de los tres principales GEI del cambio climático: dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y dióxido de nitrógeno (N_2O). Para el caso del estado de Hidalgo, son aquellos en los que la estrategia de mitigación y el diseño de acciones focalizadas deben enfocarse con especial atención. Hasta el momento, los aportes son derivados del manejo inadecuado de los residuos sólidos urbanos (RSU) en las tres zonas metropolitanas de Hidalgo: Pachuca, Tulancingo y Tula. A estas se suma la emergencia de nuevas ciudades como Huejutla, Ixmiquilpan, Apan, Ciudad Sahagún, Tizayuca, Zacualtipán y Zimapán, que no cuentan con alternativas de manejo de RSU.

La ganadería está aportando las mayores cantidades de metano en Hidalgo, ya que genera 13'832,720 de toneladas anuales. Destacan la producción de aves y ganado menor. Las unidades de producción se encuentran distribuidas en la mayor parte de los municipios. Como parte de la estrategia de mitigación, se debe contemplar la construcción de alternativas eficaces y urgentes para el manejo de las excretas, ya que hasta el momento siguen incrementándose

sus volúmenes y no existen alternativas para su manejo y control. Hasta el momento no existe un manejo adecuado de las excretas y sus lixiviados.

Las fuentes de móviles están más concentradas en su aporte de CO_2 y NO_x , en todos los vehículos de consumo de gasolinas (energías fósiles). Sin embargo, dado el tamaño del parque vehicular, tienen poco aporte a los volúmenes estatales. En este caso hay un rango de emisiones que no se agrega, pues se desconocen las cantidades de vehículos no registrados en el estado, principalmente del Estado de México y la Ciudad de México.

Las emisiones biogénicas se relacionan con la vegetación y constituyen una fuente importante de compuestos orgánicos volátiles, los cuales, sometidos a determinados procesos químicos, tienen una elevada reactividad con diversos compuestos. los cuales hasta el momento están relacionados con la formación de ozono y se les atribuye el 88 y 77% de las emisiones de isopreno y monoterpenos, respectivamente, a la biomasa foliar. Por tanto, las mediciones obtenidas son muy bajas y están dispersas en un territorio amplio, siendo poco significativas en los aportes de GEI (Molina, 2017, pp. 3-7).

Las fuentes puntuales son las de mayor importancia para establecer líneas de acción para la mitigación de GEI, ya que tienen alto impacto sobre el cambio climático. El IPCC ha señalado, en la metodología que se encuentra en los seis informes publicados, que el aporte más importante de emisiones de GEI en el mundo en los últimos cien años lo hacen las industrias termoeléctricas, refinerías de combustibles fósiles, las cementeras y las diversas industrias que se derivan de ellas, y que en el inventario nacional del INECC ocuparon el 64% del aporte nacional. En Hidalgo, el aporte anual de GEI de estas industrias en las fuentes puntuales es de 1'961,767.19 toneladas/anales, distribuidas en PM (30,045.53 tn/año), SO_2 (621,004.33 tn/año), CO_2 (1,147,779.91 tn/año), NO_x (68,472.37 tn/año), CH_4 (15,000.71 tn/año) y N_2O (79,464.35 Tn/año). En este caso, las industrias que tienen mayor aporte son las de generación de energía eléctrica, la química, la de cemento y cal, la metalúrgica (incluida la siderúrgica), la del petróleo y la petroquímica, las cuales están concentradas territorialmente en la región Tula-Tepeji en Hidalgo.¹³

13 En este caso, las toneladas son directas por cada gas, y para la integración se debe hacer

Finalmente, al integrar los diversos resultados obtenidos de aporte de GEI para la conformación de planes de acción y del diseño de la planeación de mitigación, se observa que el CH₄, el CO₂ y el N₂O son los gases de mayor volumen, en diversas fuentes a nivel internacional y según los resultados de los informes del IPCC. Llama la atención que la situación de Hidalgo no se corresponde a esos modelos, pues en él el CO₂ domina en las emisiones. Esto se puede explicar por la concentración de estos volúmenes en la zona del Valle del Mezquital, región que está integrada por una amplia red de canales de riego con aguas residuales y de presas que la distribuyen en los Distritos de Riego 03 (Tula), 100 (Alfajayucan) y 112 (Ajacuba). En este caso, es la lixiviación de los lodos del agua residual lo que provoca dichas cantidades de CH₄, así como la producción de ganado, principalmente. El CO₂ concentrado en la misma región emana de la Termoeléctrica de CFE, la Refinería de Pemex y las diversas cementeras y caleras como Cemex, Cruz Azul, Tolteca y Fortaleza (EEMyACC, 2018, pp. 38-160).

Políticas públicas para enfrentar el cambio climático, ante los resultados de la COP26

Para finales de 2021 terminaron las reuniones de la COP26 y fueron entregados los resultados del Informe IPCC-6. Esta Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (COP26) se desarrolló en Glasgow, con la participación de 120 líderes mundiales y más de 40,000 asistentes. Esta cumbre es la más importante para resolver y tomar acuerdos en torno al cambio climático; en ella se discute y analiza con bases científicas, y se proponen soluciones, a la vez que se definen acciones globales para implementar medidas de intervención y programas de acción para incidir sobre el clima a nivel territorio de los Estados-Nación.¹⁴

la conversión a CO₂eq. Se debe utilizar la siguiente relación: los gases de efecto invernadero distintos del dióxido de carbono (metano, óxido nitroso, hidrofluorocarburos, etcétera) son convertidos a su valor equivalente en dióxido de carbono, multiplicando la masa del gas en cuestión por su potencial de calentamiento global (GWP).

14 Para mayor información revisar y consultar en: <https://www.un.org/es/climatechange/cop26>.

Estos informes y resultados presentan un gran desfase entre lo que debe hacerse y lo que se está dispuesto a hacer. Es decir, los resultados de la COP26 han quedado reducidos a diversas acciones de poco impacto y sin ambición para enfrentar el cambio climático, en tanto los resultados de IPCC-6 muestran escenarios en los cuales se han rebasado los límites llamados irreversibles. Por tanto, no hay coherencia entre estas los lineamientos estipulados por estas instancias y la toma consecuente de decisiones, y su acompañamiento global sobre las mismas problemáticas. Esta COP26 una vez más confirmó las limitaciones y el poco interés de los países que mayor aporte hacen de CO₂ para implementar soluciones y hacer inversiones para reducir esas emisiones y detener el calentamiento global. Los resultados principales de esta reunión son:

1. Se confirman los acuerdos de París para desarrollar acciones orientadas a limitar el incremento de la temperatura media mundial a 2°C, tratando de ajustarse por encima del nivel preindustrial y, de preferencia, asegurar que no se superen los 1.5°C. La escala principal alcanzada está en relación con las actividades humanas que han provocado un incremento de 1.1°C en las temperaturas hasta el momento, con los efectos relacionados y con base al Sexto Informe del IPCC.
2. Intensificación de la acción por mejorar el clima. El objetivo principal son las emisiones de dióxido de carbono y su reducción sobre un 45% a fin de alcanzar las emisiones netas cero para mediados del presente siglo. Diseño y desarrollo de planes nacionales más focalizados y seguros para los próximos años.
3. Reducción inmediata del consumo de combustibles fósiles, principales emisores de GEI, a través del desarrollo de modelos propios que aseguren la reducción gradual de uso y consumo de carbón. Este acuerdo no tuvo una buena recepción por parte de algunos países y organizaciones, por lo cual expresaron su descontento, ya que los términos planteados relativos al uso y consumo de carbón se suavizaron significativamente (pasó de eliminar a reducir gradualmente) y, por tanto, se dejó en cada país la decisión sobre el uso o reducción del consumo de carbón para la generación de electricidad y aplicación en procesos industriales.

4. Financiación para la acción climática, la cual no ha sido cumplida del todo, e incluso en algunos casos se han cancelado recursos, que es el caso de la COP26, cuyos objetivos de aportes por 100,000 millones de dólares al año, que era lo acordado, no se cumplieron. Como parte de los resultados de Glasgow, como una expresión de arrepentimiento, se reafirmó la promesa de los montos por aportar, por lo cual se urge a los países desarrollados a facilitar los recursos financieros comprometidos. Para corregir los acuerdos anteriores, se propuso el incremento del apoyo a la adaptación y reorientación de estos recursos para financiar acciones puntuales para la adaptación ante los efectos del CC y focalizar el fortalecimiento de la resiliencia de los diversos sistemas que resienten el impacto al calentamiento global. En este caso se aseguró que el 25% de los recursos sean dirigidos a acciones de países pobres y el resto para el desarrollo e investigación para las tecnologías limpias.
5. Se lograron ajustes de carácter normativo para hacer operativos los acuerdos tomados en París, pues hasta el momento se han tomado en forma general, por lo cual era necesario crear las normas adecuadas a cada país y en torno a las emisiones, el mercado de carbono y la regulación amplia con respecto a las diversas emisiones y volúmenes por GEI. Esto llevará a tener claridad en cuanto a los avances concretos sobre mitigación y reducción de emisiones, a través del seguimiento a los programas locales de cada país.
6. Se mejorará la asistencia técnica a través del fortalecimiento de las redes de apoyo. Se asegurará el intercambio de conocimientos técnicos, proveedores y asistencia para ajustar las acciones a las propias condiciones locales y con elementos científicos, a fin de enfrentar en mejores condiciones los riesgos del cambio climático. En este acuerdo se agregó un diálogo para asegurar apoyos para el financiamiento de actividades destinadas a reducir los efectos y daños derivados de efectos del CC.
7. Algunos nuevos agregados y compromisos de la COP26 se enfocaron en la recuperación de bosques y la intervención para reducir la degradación de tierras hacia 2030. Además, se logró integrar doce

mil millones de dólares públicos y 7.2 mil millones de dólares de aportes privados. A esto se agregó la revisión y reducción de diversas inversiones que actualmente están provocando deforestación, consecuencia de la industrialización de diversas actividades, lo que contempla 8.7 billones de dólares en acciones. A esto se añadieron compromisos para reducir en 30% —en la relación 2020-2030, y sobre el incremento actual, que ocupa cerca de la tercera parte de los GEI— las actuales emisiones de metano en diversas industrias y actividades económicas. A estas propuestas se agregaron —claro, a nivel buenas intenciones— ajustes en la venta de vehículos de motores de combustión interna de energías fósiles, por aquellos de emisiones cero en un periodo transitorio y en los grandes mercados internacionales entre 2035 y 2040. Con ello se tendrá un impacto sobre el 10% de emisiones de carbono en el transporte de grandes volúmenes. En cuanto a las emisiones de carbono derivado de las termoeléctricas, se acordó en focalizar las ayudas hacia Sudáfrica, para reducir las emisiones de esta industria; en esta reconversión se aplicarán 8,500 millones de dólares. Este tipo de apoyo fue reconsiderado en una nueva orientación hacia la inversión de 450 empresas con un monto de 130 billones de dólares en 45 países participantes, los cuales tendrán programas de inversión sobre ciencia y tecnología de energías limpias y acciones de mitigación para reducir emisiones de GEI.

Bases de una transición energética y cambio climático: ¿Es posible una sincronización de procesos y fenómeno para lograr esta transición?

Los cambios más importantes en cualquier ámbito social y económico —como la ampliación del financiamiento, la actualización de las leyes ambientales, el desarrollo de nuevas tecnologías limpias, los cambios en la cultura ambiental, el diseño de planes de mitigación y adaptación ante el cambio climático, la innovación de procesos de creación de energía, el diseño de políticas públicas, la reconversión industrial, entre otros fenómenos y procesos— se han estado desarrollando en los grandes países

bajo diversos modelos, recursos e intereses. Esto muestra, sin lugar a dudas, una preocupación real para reconocer y enfrentar los efectos del cambio climático y por diseñar formas de mitigación y reducción de emisión de carbono. Las diversas COP, los hallazgos del IPCC en torno al clima y los acuerdos internacionales para enfrentar en conjunto el calentamiento global ha sido un gran acierto. Sin embargo, hay también gran diversidad de intereses políticos y económicos en torno a este fenómeno, de los capitales transnacionales, de empresas de generación de energía eléctrica, de países de gran emisión de GEI, así como de los grandes productores de energías fósiles y de áreas de inversión en transporte internacional, abasto y enlace de cadenas de insumos. En este caso, los fenómenos se han desarrollado bajo diversas temporalidades, en forma fracturada, incompletas, con diferencias ideológicas y con gran dispersión en sus acciones e intereses, por lo cual es necesaria su sincronización.¹⁵

En este caso, nuestro análisis integra los diversos fenómenos relacionados con el cambio climático y no lo reduce a la simple tarea de mitigación a través de focalizar acciones sobre las fuentes. Implica tener un diagnóstico amplio de la economía del país, las condiciones en el sistema nacional energético, un balance entre este y las bases de producción según la fuente de generación, composición e inventario de CyGEI por fuente, diversos indicadores sociodemográficos de la población, condición y niveles de tecnología y campos científicos de dominio, tipo y cantidad de recursos naturales (petróleo, minerales, litio, carbón, uranio, etcétera) y número de patentes nacionales de tecnologías de generación de energías limpias (generadores eólicos, fotoceldas solares, baterías eléctricas, motores eléctricos, procesos de refinación de litio y tecnología de nuevos materiales, nanotecnología, automatización y control).

15 El modelo de sincronización se refiere al análisis de los fenómenos sociales y la participación de cada uno de ellos, tratando de evaluar cómo ocurre la interrelación entre ellos, pero bajo el sustento de la cohesión social, la intensidad de sus interacciones y la regla de que cada elemento define su estado en cada paso de tiempo. Y solo se logra la sincronización en sus puntos de cohesión, consenso, armonización de hegemonía por dominio de principios o reglas, así como legitimidad.

De ahí que, para incidir sobre el cambio climático, la mitigación de los GEI, la revisión de políticas públicas ambientales y el diseño de programas de acción a nivel territorial, sea necesario definir los diversos escenarios de la transición energética. La mejor forma de incidencia sobre el cambio climático solo se logrará a través de la sincronización de los diversos fenómenos económicos, sociales y culturales y los programas de acción bajo un sistema de indicadores que señalen las mejores condiciones, capacidad institucional, cantidad de recursos y maximización de sus beneficios. Eso solo se podría lograr bajo los siguientes componentes:

1. Fortalecimiento de la economía local a través del aseguramiento de un crecimiento continuo del PIB, sustentado en una primera etapa de aporte de emisiones de GEI por procesos industriales y de base en energías fósiles, hasta asegurar un punto de equilibrio entre la capacidad de consumo mínimo de carbono y los límites de los recursos de inversión en energías limpias, en tanto se identifican las oportunidades entre las emisiones y la captura de CO₂.
2. Fortalecimiento de unidades de formación profesional, nuevas profesiones y cambios básicos en la educación superior, desarrollo de centros de investigación y tecnología, creación de incentivos y asignación de recursos para la investigación, en busca de una transición del sector energético a cero emisiones netas de CO₂ para 2070, con base en una transformación tecnológica radical del sector energético, con diversidad de tecnologías adicionales para lograr emisiones netas cero. Construcción de políticas públicas del sector, sustentadas en cadenas de valor de tecnología que contribuyan a la electrificación amplia de los sectores de uso final (como las baterías avanzadas), y a la captura, utilización y almacenamiento de carbono (CCUS), hidrógeno y combustibles relacionados con el hidrógeno y la bioenergía.
3. Integración y reorganización del sistema jurídico a fin de que fortalezca las bases de la autonomía y la autosuficiencia energéticas; armonización de las diversas áreas de gestión y administración para asegurar la creación de instituciones que hagan efectiva la gobernabilidad de la producción, la oferta y el consumo de energías.

Estas regulaciones sobre las energías deben asegurar procesos y etapas sostenibles y bajo su propio equilibrio de transición para un mayor uso de energías limpias que aseguren la descarbonización. Para el logro de esta autosuficiencia debe contemplarse la futura demanda de energía, el crecimiento de población, el comportamiento de las áreas de industrialización y la expansión de las redes de comunicación y transporte, así como, y en forma integral, los futuros escenarios del crecimiento territorial. Por ello debe integrarse la participación de la demanda de electricidad en diversos escenarios, con un crecimiento —acordado— del 50% para 2070, y contribuir con una quinta parte de los ahorros acumulados de CO₂. Esta expansión de demanda en electricidad deberá estar solo los 30,000 TWh. Estos elementos deben integrar una política pública que asegure el impulso de las energías solar, eólica y nuclear, y la ampliación de plantas hidroeléctricas.

4. Desarrollo de un plan integral de consolidación de tecnologías mediante la ampliación y apertura de centros de investigación sobre energías, formación de ingeniero perfilada hacia las energías limpias, ciencias de los materiales, minería, física y ciencias ambientales. Creación y desarrollo de parques científicos y tecnológicos sobre energías y de parques industriales, enlazamiento de cadenas de insumos a nivel nacional, desarrollo de un Sistema Nacional de Energías con la inclusión de financiamiento y prospectiva sobre energías y nuevas tecnologías. Desarrollo de nuevas plantas de captura, utilización y almacenamiento de carbono (CCUS), enfocadas a la reducción de emisiones de las termoeléctricas y diversas industrias que estén orientadas a la generación de CO₂ neutral en carbono para producir combustibles. Incluir nuevas plantas de bioenergías con captura de carbono y que estén orientadas hacia los niveles acordados en la COP26 sobre el almacenamiento de 3Gt de emisiones negativas en 2070. Estas actividades deben incluir propuestas específicas para generar bioenergías para la aviación y parte del transporte. Para el transporte pesado, aviación, producción química y del acero, así como para el transporte marítimo, y su propuesta de descarbonización, deben desarrollarse las tecnologías

suficientes que posibiliten alcanzar la participación del hidrógeno en un 13%, según lo acordado para 2070.

5. Incremento y diseño de políticas públicas con enfoque hacia la utilización y participación de la biomasa. Integración de centros de desarrollo, plantas generadoras, proyectos generales, incluyendo materiales agrícolas y forestales, uso y transformación de la materia orgánica de las aguas residuales y los lodos de las depuradoras, así como la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU) y otros residuos derivados de las industrias. Integración de diversas tecnologías con proyectos específicos para alcanzar el 20% de participación en 2070, así como fabricación de biocombustible para transporte, viviendas y comercio, que consume energías fósiles y que puedan ubicarse en un 15% en la reducción de emisiones.¹⁶
6. Desarrollo y diseño consensuado de modelos de financiamiento, con la participación de múltiples actores de un Sistema Nacional de Eficiencia Energética, sustentado en leyes secundarias y estatales, en redes de desarrollo tecnológico y financiamiento diverso (público, privado e internacional). Este sistema, además de tener bases jurídicas y financieras, debe incluir un Sistema Nacional de Indicadores de Evaluación Energética, que incluya todos los elementos que componen la energía primaria, secundaria y de uso final, armonizada bajo los tres pilares de la sostenibilidad.

16 La biomasa se refiere al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables. Se define la biomasa como la fracción biodegradable de los productos, residuos y desechos de origen biológico procedentes de actividades agrarias, incluidas las sustancias de origen vegetal y de origen animal, de la silvicultura y de las industrias conexas, incluidas la pesca y la acuicultura, así como la fracción biodegradable de los residuos, incluidos los residuos industriales y municipales de origen biológico (Parlamento Europeo, 11 de diciembre de 2018).

Conclusiones

Bajo estos elementos, y tras los acuerdos de la COP26, se deben reconstruir en México lo jurídico, lo institucional, lo financiero y la participación social, contemplando los escenarios propuestos por el IPCC en torno al calentamiento global. Asimismo, es necesario considerar la inclusión de la sostenibilidad social, en cuanto a que las energías facilitan el bienestar social y mejoran los indicadores de calidad de vida, movilidad, salud, educación, producción de bienes y acceso. Debe quedar clara la transición de energías fósiles a energías limpias que aseguren una economía sustentable y sostenible, que consoliden la autonomía, autosuficiencia y competitividad frente a otros Estados nación y que sean las bases seguras de las actividades económicas en México. Las economías modernas incluyen la dinámica de los mercados y la cultura del consumo, así como influyen sobre hábitos y se sostienen en su disposición de energía, la cual debe ser abundante, sostenible, de bajo costo y accesible. El sector de uso final es uno de los de mayor atención en forma inmediata, ya que ha sido desatendido o bien no ha sido incluido dentro de la visión de mitigación y adaptación como un gran sector, aun cuando representa el 55% de las emisiones de CO₂ en una comparación de emisiones de 2019.

Tal vez los resultados de la COP26 han sido escépticos, limitados, intervenidos por muchos intereses políticos y económicos, y hay una gran brecha entre ellos y los resultados del Sexto Informe del IPCC, al tiempo que se han dejado de lado muchos temas centrales sobre cambio climático para posteriores reuniones de la COP. Además, no se dio la integración plena de los países con las emisiones de CO₂ más altas de GEI (como China, Estados Unidos, la India y la Unión Europea) ni hubo compromisos con acciones firmes y definición de aporte financiero. Sin embargo, esta es una gran oportunidad para México de retomar los principios de los Acuerdos de París, así como para hacer reformas a las leyes e iniciar una reestructuración nacional de la producción de energía, bajo una sincronización de todos los fenómenos políticos, sociales, económicos y ambientales que consoliden a mediano plazo un Sistema Nacional de Energía y Cambio Climático con autonomía, independencia y soberanía sobre sus energías.

Referencias

- Arredondo, S. M. J. C. (2005). *Project Climate Change in Mexico: Subproject Inventory Improvement*. The United States-Mexico Foundation for Science.
- Comisión Intersecretarial de Cambio Climático (CICC) (2006). *Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero 1990-2002*. Comité Intersecretarial Sobre el Cambio Climático; Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) (2007). *Cambio climático 2007: Informe de síntesis*. [Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de Evaluación del Equipo de Redacción Principal: R. K. Pachauri y A. Reisinger.]
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) (2013). *Cambio Climático 2013: Resumen para responsables de políticas, resumen técnico y preguntas frecuentes* GI; OMM; PNUMA.
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) (2014). *Cambio Climático 2014: Impactos, adaptación y vulnerabilidad; resumen para responsables de políticas* (2014). GII; OMM; PNUMA.
- Hobsbawm, E. (1975). *En torno a los orígenes de la revolución industrial*. Siglo XXI.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2022). *Working Group III contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. WMO; UNEP. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_Full_Report.pdf.
- Ley de Mitigación y Adaptación ante los Efectos del Cambio Climático para el Estado de Hidalgo (2013). *Diario Oficial del Estado de Hidalgo*, decreto no. 5345646. [Última reforma publicada en el alcance del Periódico Oficial, 13 de septiembre de 2021. Ley publicada en el Periódico Oficial, 26 de agosto de 2013.]
- Ley para la Protección al Ambiente del Estado de Hidalgo (2022). *Diario Oficial del Estado de Hidalgo*, CXLVIII(7). [Con última reforma publicada en alcance uno, del Periódico Oficial: 23 de mayo de 2022. Ley publicada en el Periódico Oficial 7 Bis: 16 de febrero de 2015.]
- López Pérez, S., Guerrero Escamilla, J. B., (2021a). *Metodología para la construcción de la Estrategia de Mitigación y Adaptación a nivel municipal: El caso del estado*

- de Hidalgo*. Congreso del Estado de Hidalgo; Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
- López Pérez, S., Guerrero Escamilla, J. B. (2021b). *Procesos de integración de las zonas metropolitanas a la megalópolis de México*. Congreso del Estado de Hidalgo; Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
- López Pérez, S., Guerrero Escamilla, J. B. (2021c). *Elementos para la construcción de una Agenda Megalopolitana. El caso de México*. Congreso del Estado de Hidalgo; Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
- Molina, M. (2013). Cambio Climático: ¿Qué es el cambio climático? Recuperado el 10 de mayo de 2016 de <http://centromariomolina.org/cambio-climatico/temas/educacion-en-cambio-climatico/>
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) (2005). *Manual de ciudadanía ambiental global. Cambio climático*.
- Programa Estatal de Acción ante el Cambio Climático de Hidalgo (2013). Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo; Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales del Estado de Hidalgo.
- Quiroga Martínez, R. (2009). *Guía metodológica para desarrollar indicadores ambientales y de desarrollo sostenible en países de América Latina y el Caribe*. CEPAL.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2013). *Estrategia Nacional de Cambio Climático*.



Modelamiento matemático del calentamiento global a través de la actividad humana de 1880 a 2020

Juan Bacilio Guerrero Escamilla

Sócrates López Pérez

Introducción

El calentamiento global es resultado del aumento del efecto invernadero, el cual hace referencia al calentamiento que experimenta la atmósfera de la Tierra. La atmósfera es una capa delgada de gases que rodea al planeta; en ella residen determinados gases que son la base fundamental para el desarrollo de la vida terrestre.

La composición química de la atmósfera se conforma, principalmente por dos gases: nitrógeno (79%) y oxígeno (20%). El restante que lo componen el argón (0.90%) y el

dióxido de carbono (0.03%); este último es la base fundamental del calentamiento de la atmósfera (Caballero, 2007). Debido a que los gases de la atmósfera están en función de la atracción gravitacional de la Tierra, estos se concentran cerca de la superficie terrestre, en particular, en los primeros 50 km de circunferencia, por tanto. Se pueden distinguir dos capas (Benavides y León, 2007):

- La tropósfera. Es la capa adyacente a la superficie terrestre, en la cual se presentan los fenómenos meteorológicos. En ella se concentra el 80% de toda la masa de los gases de la atmósfera. Aquí ocurren los fenómenos meteorológicos, tales como las lluvias, los vientos y las nevadas, entre otros. Está conformada por el oxígeno y el vapor del agua.
- La estratósfera. Es la capa inferior de la atmósfera. Se encuentra entre la tropósfera y la mesósfera¹⁷ y es la encargada de generar la estabilidad climática y biótica del planeta, pues en ella se sustenta la mayor cantidad de energía. Sin ella, aumentaría considerablemente el calor. Se encuentra a una altitud variable de entre 9 km y 20 km de altura, dependiendo la región.

La función de estas capas (tropósfera, estratósfera y mesósfera) es el calentar la superficie de la tierra, posteriormente la transforma en la luz solar, a través de radiación de baja energía en ondas de longitud grande, se cargan hacia el infrarrojo y que se refleja hacia la atmósfera, esa energía es absorbida por algunos gases atmosféricos, principalmente en CO₂, siendo ésta la principal fuente de calor, de allí que la temperatura más alta de la tropósfera sea justamente el punto de contacto con la superficie del planeta (Benavides y León, 2007, p. 4 - 8).

Sin el efecto invernadero, el planeta se congelaría, pues alcanzaría una temperatura de -15°C, en lugar de los 15°C que es la temperatura media del planeta. Por tanto, la estructura de la atmósfera incide en la dinámica del

17 La mesósfera es la capa de la atmósfera que se caracteriza por la disminución de la temperatura a medida que la altura va aumentando, hasta que llega a unos 80°C, a unos 80 kilómetros (Benavides y León, 2007, p. 7).

clima: en la medida en que se incrementen los gases de invernadero (como el CO₂) se incrementará la temperatura global del planeta, dando origen al calentamiento global (Benavides y León, 2007, pp. 4-8).

El calentamiento global es resultado del incremento de la temperatura media del planeta. Según el último informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC), en el último siglo las temperaturas en la cuenca mediterránea han subido 1.4°C, el nivel de mar ha subido 6 cm y la acidez del agua ha subido. Todo esto ha generado efectos negativos en algunos sectores productivos, entre ellos el turismo, la agricultura, los alimentos y el sector inmobiliario (Greenpeace, 2018).

Los efectos del calentamiento global sobre la biodiversidad se traducen en la modificación de algunos organismos dentro de los procesos de crecimiento, reproducción y la supervivencia. Algunos casos, según Greenpeace (2018), son:

- El coral australiano, pues dos tercios de su población ha muerto por el aumento de las temperaturas generadas por el cambio climático.
- El oso pardo de España está en peligro de extinción, pues ya no cuenta con las condiciones adecuadas para su supervivencia.
- Los corales marinos tienden a desaparecer debido a que el agua incrementa la concentración de CO₂, debido al cambio pH del agua.
- Las algas tienden a desvanecerse debido al incremento de la temperatura. Forman parte de la oxigenación del mar. Sin ellas morirían muchas especies marinas.
- La posidonia es el organismo más longevo del mundo. Debido al incremento de la temperatura, más de 1,400 especies desaparecerían.
- En Europa se han quemado más de tres millones de hectáreas de bosque mediterráneo en los últimos quince años, como resultado del incremento de la temperatura media del planeta. Esto ha generado el incremento de la deforestación y, con ella, la disminución de la capacidad de recuperación de los bosques.
- Incremento de las sequías: en los últimos 20 años este fenómeno se ha presentado con mayor frecuencia. Esto ha generado la degradación del suelo, por lo cual los cultivos tienden a disminuir. Esto hace que se incrementen los problemas agroalimentarios.

- En los últimos 30 años se han perdido alrededor de tres cuartas partes del volumen de hielo en el Ártico. Esto ha hecho que se incremente el nivel del mar, por tanto, son más frecuentes las inundaciones de las ciudades costeras. Aunado a esto, han desaparecido algunas especies marianas.
- La subida del nivel del mar a consecuencia del deshielo ha sido de 10 a 68 cm. Este efecto se ha reflejado con mayor intensidad en la pérdida de playas dentro de las zonas costeras. Este efecto también se ha reflejado en algunas ciudades, como Barcelona, Nueva York y San Francisco, que han perdido espacio debido al incremento del nivel del mar.

En la Convención Marco sobre el Cambio Climático (CMCC) de 2014 se definió al cambio climático como el conjunto de modificaciones o alteraciones ambientales que ha sufrido el planeta en relación con la temperatura media del planeta (15°C). Este resultado es atribuido directa o indirectamente a la actividad humana y se refleja en el incremento que ha experimentado la temperatura media del planeta.

La actividad humana se puede definir como el conjunto actividades productivas que conforman a una economía, que es el estudio del modo en que la sociedad gestiona sus recursos escasos y que son contabilizados a través del producto interno bruto (PIB). Estas actividades utilizan los recursos ambientales transformándolos en bienes y servicios con valor de mercado, internalizando o apropiándose de sus beneficios y traspasando o externalizando los costos a la sociedad (Rabasco y Toharía, 2002). Entre esas actividades se encuentran:

- La dinámica demográfica. La población continúa creciendo y este comportamiento ha generado un gran impacto ambiental sobre la tierra y los recursos naturales, ya que en la medida en que se incremente la población se incentiva la demanda de bienes y servicios (agua, alimentos, electricidad y vivienda, entre otros) y se acelera la explotación de recursos.
- Con base en la población mundial de 1950, se observa que el tamaño de esta se ha duplicado en las últimas cuatro décadas, hasta llegar a

más de siete mil millones de personas, este comportamiento ha tenido mayor presencia en los países pobres, lo cual ha hecho que los gastos en consumo se dupliquen y, a pesar de eso, la mitad de la población en el planeta vive con menos de dos dólares al día. Con el paso del tiempo ha aprendido a extraer recursos para su uso (alimentos, combustibles, medicamentos, y materiales diversos, entre otros). Sin embargo, no ha aprendido a regenerarlos (Cousteau, 1992).

- La intensidad energética. Es considerada como el motor que mueve el desarrollo de los países; sin embargo, en la actualidad los estándares de la economía y la vida rural muestran una estrecha relación con los elevados niveles de consumo energético (Carpio y Castro, 2017). Bajo este contexto, urge que se apliquen medidas encaminadas al uso eficiente de la energía. La Agencia Internacional de Energía (AIE) tiene calculado que el consumo mundial para el año 2025 superará en un 30% al actual. Esta proyección demuestra que el ritmo de consumo se incrementará, y con ello, el consumo de los recursos fósiles continuará siendo la principal fuente de energía primaria (Yépez y López, 2017)
- Minería. En un cielo abierto, es uno de los peores enemigos del medio ambiente. Es una actividad industrial que provoca grandes y serios problemas ambientales, sociales y culturales. Su impacto recae sobre la esencia de su actividad, la cual se basa en la remoción, a cielo abierto, de importantes cantidades de suelo y subsuelo que luego se procesan para extraer el mineral. Destruye y cambia a la forma de la corteza terrestre, formando grandes cantidades de materiales de desecho, alterando la morfología local. Genera grandes cantidades de materia fina (“polvillo” tóxico), constituida por químicos pesados que son absorbidos por animales y seres humanos. Su proceso de excavación elimina todo tipo de flora existente, y al no ser tratados sus residuos químicos, estos se pueden infiltrarse en el subsuelo, ocasionando la contaminación de los yacimientos de agua subterránea (Geoinnova, 2016).
- Agricultura y ganadería. La utilización de fertilizantes y pesticidas y la presencia de animales grandes genera daños como compactación

y contaminación del suelo, provocando la pérdida de la capacidad de almacenamiento de agua en páramos o la erosión y falta de productividad en suelos ácidos como la altillanura (Rico, 2017). Estos sectores (aunque principalmente el ganadero) generan más gases de efecto invernadero (alrededor de 18% más, medido en su equivalente en dióxido de carbono, que el sector del transporte), reveló un informe divulgado por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) (Organización de las Naciones Unidas, 2006).

- Industria manufacturera. La causa principal de la contaminación industrial es la quema a gran escala de combustibles fósiles como el petróleo, el carbón y el gas, más el agua residual que contamina tierra, ríos y lagunas. En la actualidad, cerca del 17% de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a nivel mundial se debieron a las actividades relacionadas con las industrias manufactureras y de la construcción (García, 2015).
- Parque vehicular. Los efectos de la contaminación ambiental sobre el ser humano y sobre los seres vivos son devastadores. Las emisiones tóxicas de los motores de automóvil generan problemas de salud, tales como el asma, la bronquitis, la laringitis, la faringitis, y el enfisema, entre otras enfermedades (Lira, 2000). Todo esto se debe a los altos niveles de contaminación del aire.
 - o Estos elevados índices de emisiones (monóxido de carbono, hidrocarburos, óxidos de nitrógeno y humo) revelan el grave problema de la salud pública y de la degradación de la calidad de vida de la población mundial. Se tiene estimado que a nivel mundial los automóviles producen tres cuartas partes del monóxido de carbono, casi todos los hidrocarburos, aproximadamente la mitad de los óxidos de nitrógeno y casi el 40% de las emisiones tóxicas (Lira, 2000).
- Turismo. En la actualidad representa una de las principales actividades económicas a nivel mundial, pues crea empleos, incentiva los ingresos económicos y las inversiones en la conservación de espacios naturales, evita la migración de la población local y

estimula la comercialización de productos locales. Sin embargo, también trae efectos negativos sobre el medio ambiente (Santamarta, 2000), tales como:

- o Modificación y destrucción del hábitat de flora y fauna terrestre y acuática y cambios de uso de suelo forestal.
- o Generación de residuos peligrosos y contaminación de suelos y cuerpos de agua por emisiones líquidas (aguas residuales, aceites, lubricantes e hidrocarburos).
- Residuos. Se definen como los materiales o productos que se desechan ya sea en estado sólido, semisólido, líquido o gaseoso, que se contienen en recipientes o depósitos, y que necesitan estar sujetos a tratamiento o disposición final (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2010). Entre ellos se encuentran:
 - o La generación de biogases, que suelen ser también gases de efecto invernadero: metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), nitrógeno (N_2) y sulfuro de hidrógeno (H_2S), entre otros.
 - o Liberación de sustancias agotadoras de ozono. Son compuestos que afectan la capa de ozono y contribuyen a su destrucción. Entre ellos se encuentran los clorofluorocarbonos (CFC), los hidroclorofluorocarbonos (HCFC) y los hidrofluorocarbonos (HFC).
 - o Contaminantes de los suelos y de los cuerpos de agua. Son líquidos de descomposición y se conocen como lixiviados y se caracterizan por la fuga de los materiales que se elaboran a través de pilas.

Al depender las economías de los recursos naturales, las actividades humanas presionan y provocan diversas transformaciones e impactos al ambiente y a la sociedad en aspectos de salud y bienestar, además de alterar la disponibilidad y calidad de dichos recursos. Una de las discusiones actuales sobre la crisis ambiental se encuentra enmarcada por la “irracionalidad económica”, en la que los recursos escasos son utilizados para generar nuevas necesidades en vez de satisfacer las ya existentes (Sánchez *et al.*, 2019). A partir de esto, la libertad humana ha hecho que cada individuo satisfaga sus intereses

mediante la búsqueda de beneficios, sin darse cuenta de las “externalidades” que han ocasionado en el medio ambiente, pues la acumulación de riqueza en una nación se cuantifica en el grado de explotación hacia los recursos renovables y no renovables (Sánchez *et al.*, 2019).

Para los ecologistas del Grupo Intergubernamental de Expertos de Cambio Climático (IPCC), el crecimiento económico (acumulación de la riqueza mediante el PIB) lleva a una sobreexplotación del hábitat, ya que, en la actualidad, las economías emergentes pelean por conseguir estatus a la altura de los países desarrollados, lo cual hace que el consumo de bienes y servicios se incremente. Estas economías están desafiando al crecimiento insostenible, es decir, se están aglutinando en lo material, lo cual no es condición deseable para experimentar el desarrollo social (López, 2012).

Planteamiento del problema

Si se parte de la relación que existe entre la temperatura media del planeta (T_p) y la actividad humana en el tiempo (1880 a 2020):

$$T_p = f(A_h;t) \quad (1)$$

donde:

- T_p es la temperatura media del planeta
- A_h es la actividad humana
- t es el tiempo (1880 a 2022)

La actividad humana (A_h) en el tiempo está en función de D_d , P_p , C_e , M_n , A_g , I_m , P_v , T_m y R_s :

$$A_h = f(D_d, P_p, C_e, M_n, C_g, F_t, C_t, P_m, P_a, T_m, R_s) \quad (2)$$

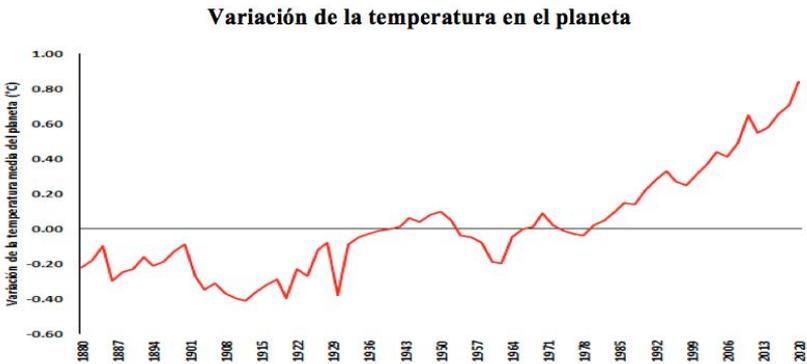
donde:

- D_d es la tasa de crecimiento demográfico
- P_p es la producción de barriles de crudo
- C_e es el consumo de energía en KWH
- M_n es la minería y se expresa la extracción y producción de metales en toneladas
- C_g es el total cabezas de ganado en sector agrícola (ovinos, caprinos, porcinos y aves de granja, entre otros)
- F_t es la utilización de fertilizantes en las tierras agrícolas en toneladas

- Ct es la producción de cemento en toneladas
- Pm es la producción de motores de combustión (autos, camiones, motocicletas y maquinaria pesada)
- Pa es la producción de alimentos en toneladas
- Tm es el total de desplazamiento de personas a raíz del turismo
- Rs son los desechos sólidos en toneladas

Según el Informe de Cambio Climático Global presentado por el Centro EULA-Chile (2015), el calentamiento global en la actualidad ha experimentado un crecimiento de forma exponencial ya que la temperatura media del planeta ha aumentado en 0.91°C de 1860 a 2020 (Figura 1).

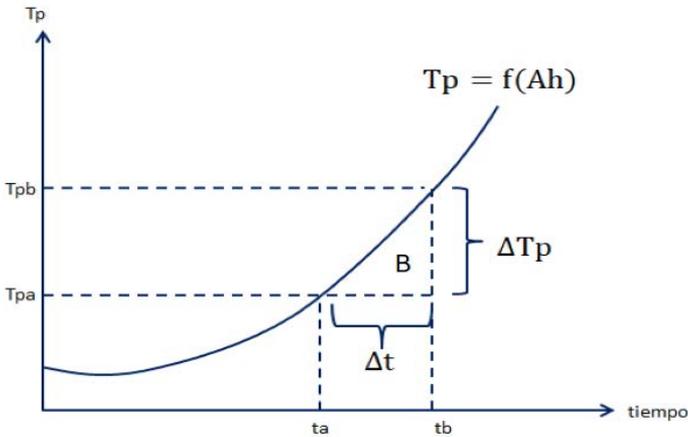
Figura 1. Comportamiento de la variación de la temperatura en el planeta.



Fuente. NASA GISS (Iza, 2020).

A través de la Figura 2 se observa que la razón de cambio de la variación promedio de la temperatura con respecto al tiempo se llamaría variación marginal de la temperatura, la cual se puede interpretar como el cambio que experimenta la variación de la temperatura media del planeta ante un cambio en la actividad humana en el tiempo:

Figura 2. Dinámica exponencial de la variación de la temperatura global.



Fuente: elaboración propia.

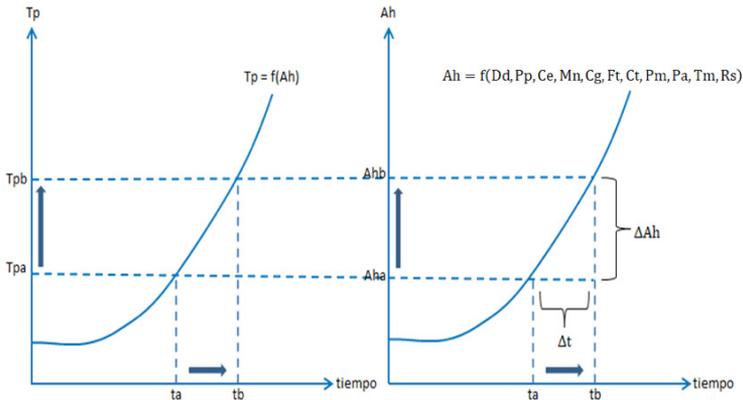
$$B = \frac{dT_p}{dAh} = \frac{\Delta T_p}{\Delta t}$$

Por cada punto porcentual que se incremente (el crecimiento demográfico, la intensidad energética, la minería, la agricultura y ganadería, las manufacturas, el parque vehicular, el turismo y los residuos sólidos), se incrementará la actividad humana, y con ello se acrecentaría la temperatura media del planeta

En la Figura 3 se puede observar que la actividad humana incide en el incremento de temperatura. Esto fue documentado por Gitay (2002), quienes especifican que “es difícil cuantificar qué proporción del Calentamiento Global es atribuible a causas naturales y qué proporción es atribuible a causas humanas, pero los resultados de modelados climáticos, tomando en cuenta todas las posibles causas, indican que solo considerando la contribución por Actividades Humanas es viable explicar la tendencia tan marcada al calentamiento que se observa, sobre todo durante las últimas décadas” (NASA, 2017). Esto se ratificó como una de las principales conclusiones de la contribución del Grupo de Trabajo I al Quinto Informe de Evaluación (GTI

IE5) en 2014, que establece que “es sumamente probable que la influencia humana haya sido la causa dominante del calentamiento observado desde mediados del siglo XX” (NASA, 2017).

Figura 3. Comportamiento de la temperatura media del planeta.



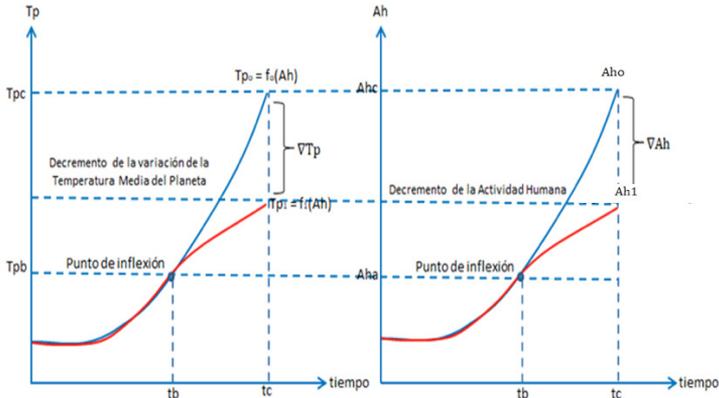
Fuente: elaboración propia.

A partir de la Figura 3 se puede conjeturar lo siguiente: en la medida en que se incentive la Actividad Humana, se incrementará la Temperatura Media Planeta. Estimular la Actividad Humana se traduce en mayores emisiones de gases, dando origen al efecto invernadero cuyo mecanismo consiste en calentar la atmósfera de la tierra, la cual se compone de una delgada capa de gases que rodea al planeta y que son fundamentales para el desarrollo de la mayor parte de la vida (Caballero, 2007).

Según la Figura 4, la minimización del calentamiento global va a estar en función del crecimiento controlado de la actividad humana $[TP_0]$, la cual podría alcanzar un punto máximo en TP_c en el tiempo t_c , por tanto, sus efectos se traducirían en el decremento de la temperatura media del planeta $[\nabla TP]$, y esto, en la minimización del calentamiento global, lo cual se expresaría de la siguiente forma:

$$\nabla TP = [f_0(Ah) - f_1(Ah)]; \text{ talque } f_0(Ah) > f_1(Ah) \quad (3)$$

Figura 4. Minimización de la variación de la temperatura media del planeta.



Fuente: elaboración propia.

Para lograr esto es fundamental que se minimice la actividad humana:

$$\nabla Ah = [f_0(Ah) - f_1(Ah)] \quad (4)$$

Tal que:

$$f_0(Ah) > f_1(Ah) \quad (5)$$

Si la actividad humana depende del crecimiento demográfico (Dd), la intensidad energética (Ie), la industria minera (Mn), el sector agrícola y ganadero (Ag), la industria manufacturera (Im), el parque vehicular (Pv), el sector turismo (Tm) y de los residuos sólidos (Rs), sería fundamental que se estime la dinámica de Ah. Por lo tanto, se debe hacer lo siguiente:

1. Construir el indicador de la actividad humana (Ah), en el periodo de 1880 a 2022.
2. Una vez construido el indicador de la Ah en el tiempo, se plantea la relación lineal entre este y la temperatura media del planeta (Tp) con la finalidad de identificar cuáles factores de la Ah inciden en la dinámica de Tp.

Actividad humana y escalamiento multidimensional

Para el análisis de las variables que han incidido sobre la dinámica de la actividad humana durante 140 años (Dd, Pp, Ce, Mn, Cg, Ft, Ct, Pm, Pa, Tm, Rs) se requiere de grandes bases de datos, por tanto, es fundamental la utilización de técnicas multivariantes, como el escalamiento multidimensional (MDS).

El MDS es una técnica que tiene por objetivo elaborar la representación espacial de un conjunto de objetos mediante la visualización de la posición relativa de cada uno de ellos. Su propósito es convertir los juicios de similitud o preferencia llevados a cabo por una serie de objetos sobre un conjunto o estímulos en distancias susceptibles de ser personificadas en un espacio multidimensional (Guerrero y Ramírez, 2012).

Para la construcción del modelo general de MDS se parte de una matriz de proximidades (Guerrero y Ramírez, 2012):

$$\Delta \in M_{n \times n}, \text{ tal que "n" es el número de estímulos} \quad (6)$$

Tal que:

$$\Delta = \begin{bmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} & \dots & \delta_{1n} \\ \delta_{21} & \delta_{22} & \dots & \delta_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \delta_{n1} & \delta_{n2} & \dots & \delta_{nn} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Cada elemento de δ_{ij} de Δ representa la proximidad entre el estímulo i y el estímulo j . A partir de esto, la salida sería la matriz:

$$X \in M_{n \times m}, \text{ tal que "m" es el número de dimensiones} \quad (8)$$

Para cada valor x_{ij} , esto significa la coordenada del estímulo i en la dimensión j . Con base en la matriz X , se calcula la distancia entre dos estímulos i y j , tal que $i \neq j$, es decir (Guerrero y Ramírez, 2012):

$$d_{ij} = \left[\sum_{t=1}^m (x_{it} - x_{jt})^p \right]^{1/p}; 1 \leq p \leq \infty \quad (9)$$

Con estas distancias se obtiene la matriz $D \in M_{n \times n}$:

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{1n} \\ d_{21} & d_{22} & \dots & d_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{n1} & d_{n2} & \dots & d_{nn} \end{bmatrix} \quad (10)$$

La solución que proporciona el MDS es la máxima correspondencia entre la matriz de proximidades inicial Δ y la matriz D .

Existen dos modelos básicos de MDS: escalamiento métrico (los datos están a una escala de razón o de intervalo) y escalamiento no métrico (los datos están medidos en escala ordinal).

Si se parte del hecho de que $X_i \in R$, entonces los datos de la Ah son métricos, por tanto, se parte de la idea de que las distancias son una función de las proximidades, tal que:

$$d_{ij} = f(\delta_{ij}) \quad (11)$$

Bajo el supuesto de que la relación entre las proximidades y las distancias son lineales:

$$d_{ij} = a + b\delta_{ij} \quad (12)$$

Cuyo procedimiento consiste en (Guerrero y Ramírez, 2012):

1. A partir de una matriz de distancias $\Delta \in M_{n \times n}$, se obtiene una matriz $B \in M_{n \times n}$ de productos escalares entre vectores.
2. Se transforma la matriz $\Delta \in M_{n \times n}$ en una matriz de distancias $D \in M_{n \times n}$, en la cual se verifiquen los siguientes axiomas de la distancia euclídea.

$d_{ij} \geq 0 = d_{ii}$	No negatividad
$d_{ij} = d_{ji}$	Simetría
$d_{ij} \leq d_{ik} + d_{jk}$	Desigualdad triangular

Partiendo de la desigualdad triangular, se hace la estimación de la constante, de tal forma que:

$$c_{\min} = \max_{(i,j,k)} \{ \delta_{ij} - \delta_{ik} - \delta_{kj} \} \quad (13)$$

Por tanto, las distancias se obtienen sumando a las proximidades de la constante c:

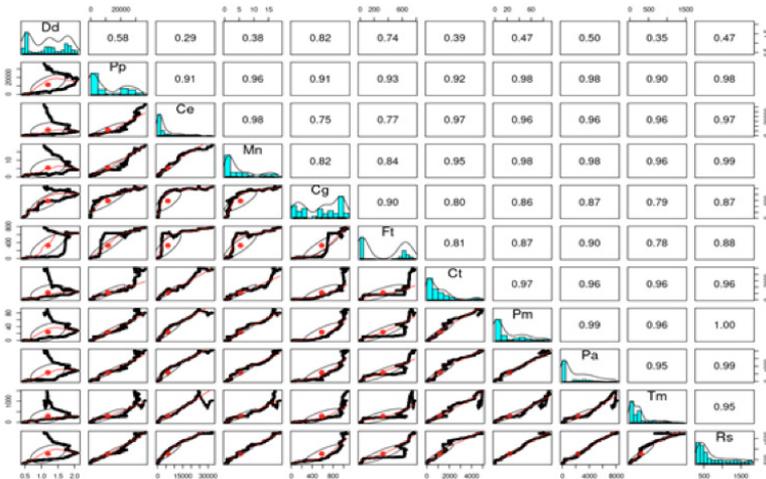
$$d_{ij} = \delta_{ij} + c \quad (14)$$

Con base en lo anterior, y mediante la utilización del lenguaje de programación en R - estudio, se puede afirmar que el índice de actividad humana está en función de once variables:

$$Ah = f(Dd, Pp, Ce, Mn, Cg, Ft, Ct, Pm, Pa, Tm, Rs) \quad (15)$$

Partiendo del gráfico 1 y de la matriz de correlaciones, se obtiene la matriz de distancias:

Figura 5. Matriz de correlaciones.



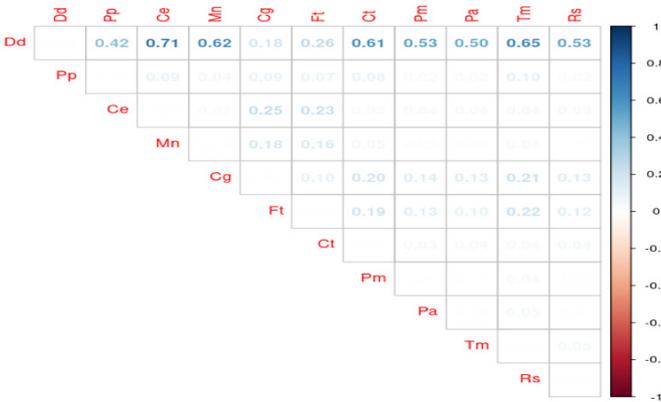
Fuente: elaboración propia.

Tal que la matriz de distancia se obtendría de la siguiente forma:

$$D = 1 - \text{Corr}(Ah) \quad (16)$$

Por tanto:

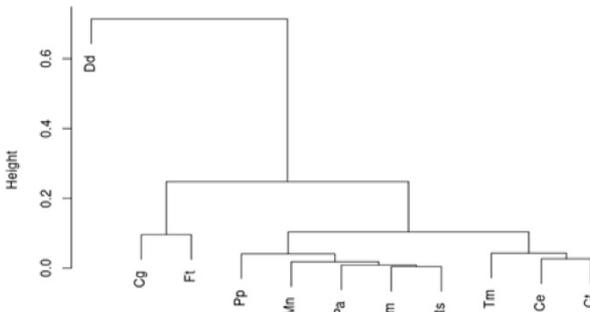
Figura 6. Matriz de distancias.



Fuente: elaboración propia.

Con base en la matriz de distancias D y el dendograma de nuevas variables, la agrupación de las nuevas variables que estiman la dinámica la Ah.

Figura 7. Dendograma de nuevas variables.



Fuente: elaboración propia.

Con base en lo anterior, se determina que el comportamiento de la Ah está en función de cuatro indicadores:

- El primer grupo lo conforman Pp, Mn, Pa, Pm y Rs. Hace referencia a la extracción de producción. Se denomina Índice de Extracción y Producción (IEP).
- El segundo grupo lo forman Tm, Ce y Ct. Hace referencia a la producción de cemento y consumo de energía. Se denomina Índice del Cemento y de Energía (ICE).
- El tercer grupo contiene a Cg y Ft. Hace hincapié en las cabezas de ganado y la utilización de fertilizantes. Se denomina Índice de Producción Agrícola (IPA).
- El cuarto grupo contiene a Dd, que corresponde al crecimiento demográfico. Se denomina Índice de Crecimiento Demográfico (ICD).

Por tanto:

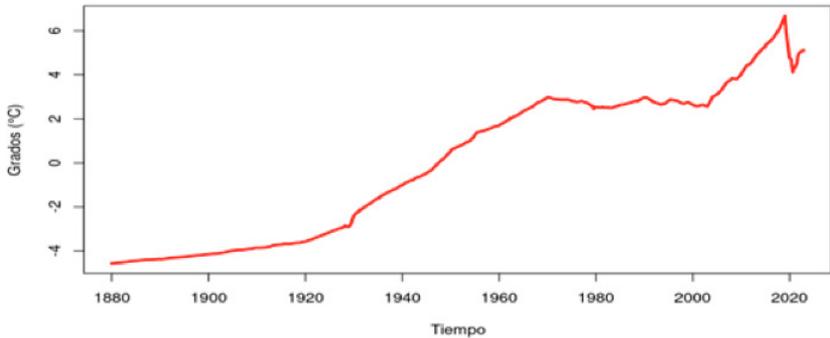
$$Ah = f(\text{IEP}, \text{ICE}, \text{IPA}, \text{ICD}) \quad (17)$$

De tal forma que:

$$Ah = \text{IEP} + \text{ICE} + \text{IPA} + \text{ICD} \quad (18)$$

A través de la Tabla 1 se puede ver que Índice de Extracción y Producción (IEP) es la actividad de mayor incidencia sobre la Ah, pues conserva el 98.02% de la variabilidad de la información. Partiendo de lo anterior y de la expresión algebraica 18, es posible determinar que el comportamiento de dichos indicadores adopta la siguiente forma:

Figura 8. Comportamiento del índice de actividad humana (Ah).



Fuente: elaboración propia.

Al sumar ambos indicadores, se tiene que la dinámica de la Ah ha sido creciente. Ese comportamiento se ha visto afectado por una serie de eventos, tales como:

- La crisis económica de 1929.
- La Segunda Guerra Mundial de 1939 a 1945.
- La crisis inmobiliaria de 2008.
- La crisis sanitaria por la pandemia SARS-CoV-2, de 2020 a la actualidad.

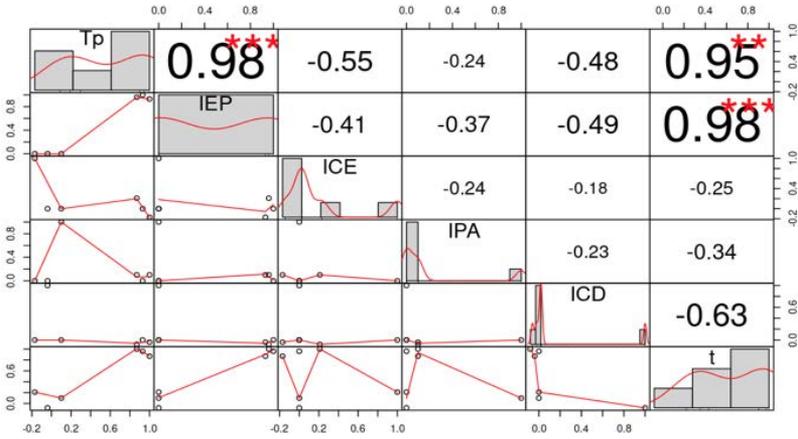
Modelamiento del calentamiento global a partir de la actividad humana

Partiendo del Índice de Actividad Humana (Ah), para estimar el calentamiento global es necesario plantear la temperatura media del planeta (T_p) en función del Índice de Extracción y Producción (IEP), del Índice del Cemento y de Energía (ICE), del Índice de Producción Agrícola (IPA), del Índice de Crecimiento Demográfico (ICD) y del tiempo (t):

$$T_p = f(\text{IEP}, \text{ICE}, \text{IPA}, \text{ICD}, t) \quad (19)$$

Mediante la matriz correlación se tiene que:

Figura 9. Matriz correlación de factores de la actividad humana (Ah).



Fuente: elaboración propia.

Como se puede ver en la Figura 9, los factores detonantes de la temperatura media del planeta (Tp) son el Índice de Extracción y Producción (IEP), el tiempo (t) y, en menor medida, el Índice del Cemento y de Energía (ICE).

Al plantear el modelo de regresión y haciendo simétrico el tiempo se tiene que:

$$\hat{T}_p = \hat{B}_0 + \hat{B}_1 IEP + \hat{B}_2 ICE + \ln(t + 1) + u_i \quad (20)$$

Donde:

- \hat{T}_p = es el valor esperado de la temperatura media del planeta a estimar
- \hat{B}_0 ; $i = 0,1,2$ y 3 = son los parámetros a estimar
- u_i = es el margen de error que no puede ser explicado por la relación lineal

Si T_p es una variable aleatoria continua (v.a.c.), su forma de modelamiento será a través de la regresión gamma. Si T_p tiene una distribución gamma con parámetros $\alpha > 0$ y $\lambda > 0$, entonces $T_p \sim \Gamma(\alpha, \lambda)$, por tanto, su función de densidad sería (Wackerly y Mendenhall, 2008):

$$f_{Tp}(tp) = \frac{\lambda(\lambda tp)^{\alpha-1} e^{-\lambda tx}}{\Gamma(\alpha)} \quad (21)$$

Para toda $t > 0$ donde:

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} t^{\alpha-1} e^{-t} dt \quad (22)$$

Tal que:

- $\Gamma(2) = \Gamma(1) = 1$
- Para cualquier $\alpha > 0$ se cumple que $\Gamma(\alpha + 1) = \alpha \Gamma(\alpha)$
- Si $n \in \mathbb{Z}^+$ entonces $\Gamma(n + 1) = n!$
- $\Gamma\left(\frac{1}{2}\right) = \sqrt{\pi}$
- Si $n \in \mathbb{Z}^+$ entonces $\binom{n}{2} = \frac{\sqrt{\pi} (n-1)!}{2^{n-1} \left(\frac{n-1}{2}\right)!}$

Planteando la regresión, a partir de los modelos lineales generalizados (GLM), se tiene que (Durbán, 2012):

$$E(Tp) = \mu = g^{-1}(XB) \quad (23)$$

Por lo tanto, Tp debe conformarse por tres elementos (Durbán, 2012):

- Una función de distribución f perteneciente a la familia exponencial
- Un predictor lineal: $\mu = B_0 + \sum_{i=0, j=1}^n B_i X_j : i \neq j$
- Una función liga, tal que: $E(Tp) = g^{-1}(n)$

La función liga va a permitir modelar relaciones no lineales entre las variables dependiente e independientes; para la regresión gamma, la función liga puede tomar las siguientes denominaciones (Durbán, 2012):

Tabla 2. Función liga.

Función de vínculo canónica	Otras funciones
Recíproco	Identidad, logarítmica y raíz cuadrada

Fuente: Modelos lineales generalizados (GLM) (Durbán, 2012).

El ajuste de los GLM toma en cuenta las siguientes etapas (Durbán, 2012):

- Etapa 1. Es la comparación de dos o más modelos y se elige el de mayor ajuste con base en los siguientes indicadores:
 - o Mayor significancia de los parámetros estimados dentro del modelo.
 - o Criterio de Información Akaike (AIC): cuanto más pequeño AIC, mejor ajuste.
- Etapa 2. Los residuales de la devianza deben aproximarse a una distribución asintótica ji-cuadrada con $N - p$ grados de libertad, de tal forma que su prueba de hipótesis es:

$$H_0: u_i \sim \chi^2(k) \text{ vs. } H_a: u_i \neq \chi^2(k)$$

Si el P - valor $< \alpha$, tal que $\alpha = 0.05$, por tanto, se rechaza H_0 .

- Etapa 3. No debe existir colinealidad entre las variables independientes, lo cual se determina a través de la siguiente prueba de hipótesis:

H_0 : No hay colinealidad vs. H_a : Hay colinealidad

Mediante el factor de influencia de la varianza (VIF), si $VIF > 10$ unidades, se rechaza H_0 .

- Etapa 4. La devianza GLM se define como el grado de variabilidad de los datos, tal que:

$$D^2 = \left(\frac{\text{Devianza nula} - \text{Devianza de los residuales}}{\text{Devianza nula}} \right) * 100 \quad (24)$$

Tras la estimación de la temperatura media del planeta (\hat{T}_p) a partir de las distintas funciones de ligas del modelo de regresión gamma, y en particular, mediante la raíz cuadra se tiene que:

Tabla 3. Primera corrida del modelo.

Call:glm(formula = (Tp) ~ IEP + ICE + log(t + 1), family = Gamma(link = "sqrt"), data = data.frame(Model))

Deviance Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-0.0179972	-0.0049235	-0.0009913	0.0047580	0.0302178

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	3.880e+00	4.190e-03	926.096	<2e-16 ***
IEP	1.449e-02	1.938e-04	74.757	<2e-16 ***
ICE	-7.487e-03	4.116e-04	-18.189	<2e-16 ***
log(t + 1)	6.673e-05	6.470e-04	0.103	0.918

Null deviance: 1.04893 on 1715 degrees of freedom

Residual deviance: 0.10537 on 1712 degrees of freedom

AIC: -2455.3

Fuente: elaboración propia.

Con nivel de significancia al 0.05, se puede observar (Tabla 3) que la variable tiempo (t) no es significativa, por tanto, no incide en la dinámica de la temperatura media del planeta (Tp), por lo cual se saca del modelo.

Tabla 4. Segunda corrida del modelo.

Call:glm(formula = (Tp) ~ IEP + ICE + log(t + 1), family = Gamma(link = "sqrt"), data = data.frame(Model))

Deviance Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-0.018006	-0.004929	-0.000988	0.004757	0.030220

Coefficients:

Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
----------	------------	---------	-----------

(Intercept)	3.8804639	0.0003680	10544.17	<2e-16 ***
IEP	0.0145047	0.0001201	120.74	<2e-16 ***
ICE	-0.0074638	0.0003459	-21.58	<2e-16 ***

Null deviance: 1.04893 on 1715 degrees of freedom

Residual deviance: 0.10537 on 1713 degrees of freedom

AIC: -2457.3

Fuente: elaboración propia.

Con nivel de significancia al 0.05 (Tabla 4), todas las variables independientes son significativas, por tanto, predicen la dinámica de la temperatura media del planeta (T_p). Es decir:

$$\sqrt{\hat{T}_p} = 3.8805 + 0.0145IEP - 0.0074ICE \quad (25)$$

Despejando:

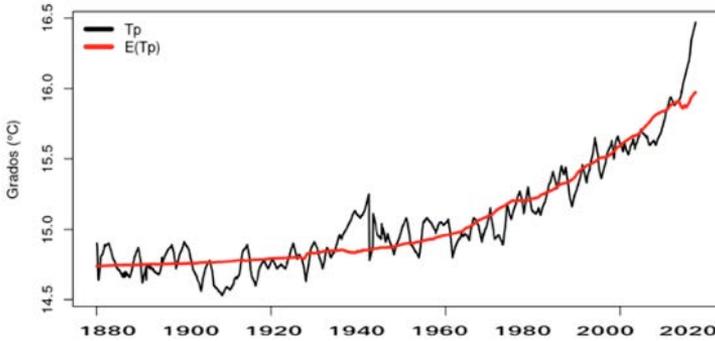
$$\hat{T}_p = (3.8805 + 0.0145IEP - 0.0074ICE)^2; \quad D^2 = 0.9011 \quad (26)$$

Con un nivel de confianza al 0.95 y con un nivel de significancia al 0.05, la expresión algebraica explica el 90.11% de la variabilidad de los datos, es decir, la expresión algebraica explica el 90.11% del comportamiento que experimenta la temperatura media del planeta (T_p).

Con base en la expresión algebraica (26), la interpretación de los parámetros es la siguiente:

- Si el IEP y el ICE son constantes, la temperatura media del planeta (T_p) sería de aproximadamente 15.05°C.

Figura 9. Comportamiento del índice de actividad humana (Ah).



Fuente: elaboración propia.

$$\hat{T}_p = (3.8805 + 0.0145I(0) - 0.0074I(0))^2; \text{ IEP} = \quad (27)$$

ICE=0

$$\hat{T}_p = (3.8805)^2 = 15.0544$$

- Si IEP = 1 y ICE = 0, por cada unidad que se incremente el Índice de Extracción y Producción (IEP) y permanezca constante el ICE, la temperatura media del planeta (T_p) se va a incrementar en 0.12°C .

$$\hat{T}_{p\text{IEP}} = (3.8805 + 0.0145I(1) - 0.0074I(0))^2; \text{ IEP} = \quad (28)$$

1, ICE=0

$$\hat{T}_{p\text{IEP}} = (3.895)^2 = 15.171$$

Tal que:

$$\Delta \hat{T}_p = \hat{T}_{p\text{IEP}} - \hat{T}_p = 15.171 - 15.0544$$

$$\Delta \hat{T}_p = 0.117 \sim 0.12$$

- Si ICE = 1 y IEP = 0, por cada unidad que de incremento en los índices del Cemento y de Energía (ICE), y mientras permanezca constante IEP, la temperatura media del planeta (T_p) va a decrecer -0.05 .

$$\hat{T}_{p\text{ICE}} = (3.8805 + 0.0145I(0) - 0.0074I(1))^2; \text{ IEP} = 0, \text{ ICE} = \quad (29)$$

1

$$\hat{T}_{p\text{ICE}} = (3.8731)^2 = 15.000$$

Tal que:

$$\nabla \hat{T}_p = \hat{T}_{pICE} - \hat{T}_p : = 15.000 - 15.0544$$

$$\nabla \hat{T}_p = - 0.0544 \sim - 0.05$$

Conclusiones

Como se puede observar, estimar el calentamiento global a partir del tiempo genera incertidumbre, pues pareciera ser que el tiempo es determinante para explicar la dinámica que experimenta la temperatura media del planeta, sin tomar en cuenta los factores que podrían incidir en ello, como la actividad humana.

Con la construcción de este modelo se pudo ver que la actividad humana es elemento que incide en el comportamiento, pues a través de la matriz correlación (figura 9) y la expresión algebraica 29, la dinámica del indicador de actividad humana incide en un 90.11% sobre el comportamiento de la Temperatura Media del Planeta; en mayor medida lo hacen la producción y extracción de materiales para la generación de materias primas y, con ello, la producción de cemento y de energía.

Con este modelo se tienen los elementos necesarios para la creación de escenarios alternativos para poder afrontar el calentamiento global, mediante el control de la actividad humana.

Referencias

- Carpio, E., y Castro, J. (2017). *Intensidad Energética. Del Ecuador y Estimación de la Huella de Carbono*. Universidad Técnica de Machala. Republica de Ecuador.
- Benavides, H., y León, G. (2007). *Información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- Caballero, M., Lozano, S., y Ortega, B. (2007). Efecto invernadero, calentamiento global y cambio climático: Una perspectiva desde las ciencias de la Tierra. *Revista Digital Universitaria*. https://www.revista.unam.mx/vol.8/num10/art78/oct_art78.pdf.

- Cousteau, J (1992). Impacto ambiental: El planeta herido. <http://assets.mheducation.es/bcv/guide/capitulo/8448167155.pdf>.
- Durbán, M. (2012). *Modelos lineales generalizados*. Universidad Autónoma de Barcelona.
- García, S. (2015). Contaminación industrial. *El Financiero*. <https://www.elfinanciero.com.mx/opinion/salvador-garcia-linan/contaminacion-industrial/>.
- Geoinnova (2016). *Minería a cielo abierto y sus impactos en el medio ambiente*. <https://geoinnova.org/blog-territorio/mineria-cielo-abierto-impactos/>.
- Greenpeace (2018). *Imágenes y datos: Así nos afecta el cambio climático. Cumbre climática en Polonia, una apertura que no podemos perder*. Universidad de Huelva.
- Organización de las Naciones Unidas (2006). *La ganadería produce más gases contaminantes que el transporte*. <https://news.un.org/es/story/2006/11/1092601>.
- Guerrero, M., y Ramírez, M. (2012). *El análisis de escalamiento multidimensional: Una alternativa y un complemento a otras técnicas multivariantes*. Universidad Pablo de Olavide.
- Iza, M. (2020). El Ártico registró temperatura 8°C superiores a la normal para el mes de abril. *El tiempo*. <https://www.eltiempo.es/noticias/el-artico-registro-temperaturas-8oc-superiores-a-lo-normal-para-el-mes-de-abril>.
- Lira, G. (2000). *Impacto ambiental del parque automotor*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- López, C. (2012). Los países emergentes ante el reto de la sostenibilidad. <http://www.profesiones.org/var/plain/storage/original/application/5bee201e55097ef4e954620cfdb07c87.pdf>.
- NASA (2017). *Las causas del cambio climático*. <https://climate.nasa.gov/causas/>.
- Rabasco, E., y Toharía, L. (2002). *Principios de Economía*. McGraw-Hill.
- Santamarta, J. (2000). Turismo y medio ambiente: El turismo es hoy la mayor industria mundial y una de las que más afecta al medio ambiente. Dialnet. <https://www.nacionmulticultural.unam.mx/mezinal/docs/6372.pdf>.

- Rico, G. (2017). Colombia: la ganadería extensiva está acabando con los bosques. <https://es.mongabay.com/2017/01/colombia-ganaderia-deforestacion/>.
- Sánchez, J., Domínguez, R., León, M., Samaniego, J., y Sunkel, O. (2019). *Recursos naturales, medio ambiente y sostenibilidad. 70 años de pensamiento de la CEPAL*. CEPAL. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/44785/1/S1900378_es.pdf.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2010). *Informe de la situación del medio ambiente en México*. https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/pdf/Cap7_Residuos.pdf.
- Yépez, A., y López, D. (2017). La energía en el 2040. <https://blogs.iadb.org/energia/es/la-energia-en-el-2040/>.
- Wackerly, D., y Mendenhall, W. (2008). *Estadística matemática con aplicaciones*. Cengage Learning.

Mitigación de la emisión de CO₂ mediante REDD+: una estrategia para frenar el cambio climático y el potencial de almacenamiento de carbono en un bosque montano de Hidalgo, México

*Numa P. Pavón
Judith Galván-Juárez
Jessica Bravo-Cadena*

Introducción

El principal problema ambiental que enfrenta la humanidad actualmente es el cambio climático. Este fenómeno ha sido provocado por un aumento en la temperatura global atmosférica, como consecuencia del incremento en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) (Panel Intergubernamental de Expertos para el

Cambio Climático, 2006). Los principales GEI son el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄), el óxido nitroso (N₂O) y los clorofluorocarbonos (CFC).

Las actividades en los sectores de la agricultura, la silvicultura y otros usos de la tierra (AFOLU) representan el 23% del total de las emisiones antropogénicas netas de gases de efecto invernadero (Convención Marco De Las Naciones Unidas Sobre el Cambio Climático, 2022). Los bosques actúan como sumideros de carbono, disminuyendo el dióxido de carbono de la atmósfera y almacenándolo en forma de biomasa; al destruir los bosques, el carbono se libera a la atmósfera. Por esto, mantener e incrementar la superficie forestal es una estrategia fundamental de mitigación del cambio climático, ya que por un lado se mantienen los depósitos de carbono y por el otro este se captura (Sedjo, 1990; Perry, 1994).

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC) en la Conferencia de las Partes (COP) de Bali, Indonesia (2007), acordó explorar políticas e incentivos financieros para promover proyectos de Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación de los bosques (REDD). Posteriormente se convirtió en REDD+, el signo + o plus por el beneficio extra de la conservación de la biodiversidad. México ha sido uno de los países que la han adoptado. Sin embargo, tal como cualquier instrumento de política, los pagos por servicios ambientales requieren ciertos requisitos para ser implementados eficazmente (Wunder, 2008).

En México existen grandes extensiones de áreas forestales con gran potencial para la conservación y el almacenamiento de carbono, como las zonas con bosques templados (Masera *et al.*, 2000; Nívar-Cháidez *et al.*, 2005). Uno de estos ecosistemas lo representa el bosque mesófilo de montaña, aunque solo cubre 1% de la extensión territorial del país. El estado de Hidalgo ocupa el tercer lugar nacional en cuanto a extensión de este tipo de vegetación (Ortega y Castillo, 1996). El municipio de San Bartolo Tutotepec, Hidalgo, posee fragmentos de bosque mesófilo, que son de suma importancia por su alta diversidad y riqueza de especies; mantiene alta riqueza de especies arbóreas, algunas en peligro de extinción, como el *Fagus grandifolia* var. *mexicana*. Además, este bosque almacena grandes cantidades de carbono y ofrece servicios hidrológicos fundamentales para las comunidades.

En este trabajo mostramos los resultados de una evaluación del potencial de una zona de bosque mesófilo mediante el análisis de las políticas forestales mexicanas para determinar si cumple con los requerimientos para ser propuesta dentro del programa REDD+. La intención es apoyar a los poseedores de la tierra con información básica que les permita establecer proyectos y solicitar apoyo para incorporarse a REDD+ y así obtener beneficios económicos.

Concepto y origen de REDD+

El REDD+ se refiere a las actividades que reducen las emisiones de bióxido de carbono con la finalidad de evitar la deforestación y la degradación forestal. Por otro lado, contribuye a la conservación y al manejo sostenible de los bosques, lo que conlleva a generar beneficios tanto sociales como ambientales. El Panel Intergubernamental de Expertos para el Cambio Climático identifica a REDD+ como la actividad con el mayor potencial para reducir las emisiones de AFOLU (Convención Marco De Las Naciones Unidas Sobre el Cambio Climático, 2022) que se ha desarrollado a diferentes escalas (global, nacional y local) a través de negociaciones ambientales internacionales.

Uno de los aspectos clave de REDD+ es que paga a los dueños y usuarios de los bosques por los créditos de carbono forestal, por reducir las emisiones GEI, por un manejo sustentable y su conservación forestal (Angelsen *et al.*, 2010). La idea es que los países en desarrollo deben ser compensados económicamente por preservar sus bosques y por reducir las emisiones de bióxido de carbono por deforestación y degradación forestal (Banco Mundial, 2008). La iniciativa surgió por primera vez durante la 11^a Conferencia de las Partes de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático en Nueva Guinea y Costa Rica, en 2005. Este acuerdo solo se limitó a la reducción de las emisiones generadas por la deforestación (RED). Posteriormente, en la reunión internacional Bali, Indonesia, 2007 (COP-13), se incluyó a la iniciativa RED lo correspondiente a la degradación forestal (la segunda D en REDD), lo cual sentó las bases para desarrollar el mecanismo de mitigación. Posteriormente, en 2009, se reconoció la función de los bosques en la conservación de la biodiversidad

y las reservas de carbono, con lo que se agregó el plus (“+”) para finalmente quedó establecer la estrategia como REDD+ (Olsen y Bishop, 2009).

Actualmente, 47 países en desarrollo han sido seleccionados para unirse al Fondo Cooperativo para el Carbono de los Bosques: 18 en África, 18 en América Latina y once en la región de Asia-Pacífico (Fondo Cooperativo para el Carbono de los Bosques, 2022).

Requisitos generales para la implementación de los proyectos REDD+

Existen diferentes estándares para desarrollar los proyectos REDD+. Estos están vinculados con los requisitos que solicitan los fondos internacionales. En este apartado solo se presenta un resumen de los requisitos generales de uno de los estándares, el Verified Carbon Standard (VCS), que se aplica a todos los proyectos REDD+ (Shoch *et al.*, 2013). Aunque no siempre se incluye en las metodologías REDD+, estos requisitos deben ser abordados en la descripción de proyectos REDD+ al ser entregados para su validación (Tabla 1).

Tabla 1. Requisitos generales del Verified Carbon Standard en los proyectos REDD+.

Área del proyecto elegible	<ul style="list-style-type: none">• El área del proyecto no necesariamente debe ser una sola área continua, sino que puede estar compuesta de una colección de intervalos dispersos. El área del proyecto debe ser 100% forestal en la fecha de inicio del proyecto y durante un periodo de al menos diez años previos a la fecha de inicio del proyecto.• El área debe tener un derecho de uso, que puede derivarse de la ley o reglamentos (títulos de propiedad).
----------------------------	---

<p>Fecha del proyecto</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● La fecha de inicio determina el inicio del periodo de la línea base y cuando se implementan las actividades REDD+, que puede coincidir con la implementación del plan de aprovechamiento o los planes de protección. ● La fecha de inicio del proyecto es importante pues determina el inicio del periodo de línea base y el periodo de acreditación del proyecto, que son fijos y limitados en cuanto a su duración.
<p>Periodo de acreditación de proyectos</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● Los periodos de acreditación pueden renovarse hasta cuatro veces, sin exceder los 100 años. ● El inicio del periodo de acreditación de proyecto empieza con la fecha de inicio del proyecto. ● El periodo de acreditación de un proyecto puede ser diferente al tiempo durante el cual se llevará a cabo la actividad del proyecto, lo cual se denomina como “longevidad del proyecto”.
<p>Adicionalidad</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● Todos los proyectos REDD+ deben demostrar que son adicionales a lo que hubiera ocurrido bajo un escenario de estado normal (que la actividad del proyecto no hubiera ocurrido en la ausencia del financiamiento de carbono). ● La herramienta de adicionalidad sigue un proceso escalonado que implica: 1) identificar escenarios de uso del suelo alternativos, 2) realizar un análisis de inversión y análisis de barreras; (3) realizar un análisis de prácticas comunes.
<p>Cumplimiento con las leyes</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● Los proyectos REDD+ no son elegibles si la implementación de las actividades del proyecto viola alguna ley establecida en la convocatoria correspondiente. Por lo tanto, es importante que los desarrolladores de proyectos comprendan las leyes que aplican a sus proyectos.

<p>Impactos ambientales y socioeconómicos</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● Se requiere que los desarrolladores de proyectos identifiquen los impactos ambientales y socioeconómicos negativos potenciales de sus proyectos y tomen las medidas para mitigarlos. ● En el caso de REDD+, es poco probable que las medidas de protección forestales generen impactos ambientales negativos netos (al contrario, típicamente generaran impactos ambientales positivos). Sin embargo, es posible que las medidas de protección forestales pudieran afectar el sustento de aquellas personas que dependen del bosque para proveer alimento, combustible o ingresos. En estos casos, será importante mitigar estos impactos socioeconómicos negativos a través de actividades que apoyen el desarrollo de sustentos alternativos.
<p>Riesgo de no permanencia</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● La no permanencia se refiere al riesgo de que las reducciones de emisiones que se han acreditado en periodos pasados se reviertan en periodos futuros en el área del proyecto, sin exceder la línea base. Se requiere que cada proyecto evalúe su riesgo de no permanencia usando procedimientos específicos que deben seguir los desarrolladores de proyectos y los organismos de validación/verificación, a fin de realizar un análisis de riesgo de no permanencia para un proyecto. Esencialmente esto implica evaluar tres categorías amplias de riesgo de no permanencia: riesgo interno, riesgo externo y riesgo natural.

Fuente: elaboración propia a partir de la información presentada en el *Manual de metodologías REDD+ del Verified Carbon Standard para desarrolladores de proyectos* (Shoch *et al.*, 2013).

Para establecer el sistema de pagos por servicios ambientales es necesario tener claros y seguros los derechos forestales a favor de individuos, comunidades y organizaciones. Esto es indispensable para determinar quién controla los recursos naturales (Sunderlin *et al.*, 2009), así como para asegurar

una distribución transparente de los beneficios en el manejo sustentable de los mismos (Corbera *et al.*, 2010).

Para la implementación de REDD+ se exige un conjunto amplio y estricto de políticas que incluye las reformas institucionales en las áreas de tenencia de la tierra (Angelsen, 2009), a fin de asegurar que no se dispute en más de 5% del área del proyecto y poder resolver cualquier problema sobre los derechos de acceso o uso de la tierra (Shoch *et al.*, 2013). Que la tenencia forestal sea insegura, incierta, en conflicto o que no esté formalizada implica que los actores más poderosos, élites más poderosas locales o nacionales o actores no relacionados con el bosque obtengan los beneficios económicos de REDD+ (Harvey *et al.*, 2010). Concretamente, si REDD+ aumenta el valor de los bosques en pie, puede provocar una “lucha de recursos” que pondría en riesgo los derechos de los propietarios actuales, lo cual aumentaría la desigualdad y sembraría resentimiento y conflictos (Sunderlin *et al.*, 2009).

REDD+ en México

México es uno de los países que ha firmado acuerdos para mitigar el cambio climático. El primer paso fue la elaboración de la *Visión de México sobre REDD+*, en 2010, en el marco del Fondo Cooperativo para el Carbono de los Bosques, que contó con la participación de la sociedad civil, la comunidad académica y diversas dependencias de distintos órdenes de gobierno. Estas instancias conjuntaron las ideas de los participantes de esta iniciativa para la elaboración de un marco de política pública hacia la reducción de emisiones por deforestación y degradación forestal, salvaguardando los aspectos jurídicos, tecnológicos, económicos y culturales de cada región (Comisión Nacional Forestal, 2010). La estrategia nacional fue presentada en diciembre de 2012 ante el Comité Técnico Consultivo Nacional para REDD+. Dentro de la política forestal se ha incluido la actualización del Plan Estratégico Forestal 2025 y la definición de la Estrategia Nacional de Desarrollo Bajo en Carbono. Como parte de *Visión de México sobre REDD+*, el gobierno de la república incluyó diversas iniciativas que contribuyeron a la reducción de la deforestación y degradación de los bosques, con la implementación de acciones tempranas sobre REDD+ en algunos estados del país, como

Yucatán, Quintana Roo, Campeche, Jalisco y Chiapas (Comisión Nacional Forestal, 2010).

La estrategia REDD+ fue reconocida en los Acuerdos de Cancún, México, en diciembre de 2010 (COP16), como un mecanismo de mitigación del cambio climático basado en los elementos del Plan de Acción de Bali, el cual incluye decisiones sobre una visión común de la cooperación a largo plazo, la intensificación de la labor relativa a la adaptación y la mitigación al Cambio Climático, la financiación de proyectos relacionados con la lucha al cambio climático, la transferencia de tecnología y el desarrollo de capacidades (Cordero, 2011).

Posteriormente, en 2011 se generó el primer borrador de la Estrategia Nacional para la Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación (ENAREDD+). En 2012 se generó el borrador 1, en 2013 el borrador 2, en 2014 el 3 y el 4, en 2015 y 2016 se generó la consulta nacional y finalmente en 2017 se publicó la ENAREDD+, que se consideró como un “conjunto de líneas estratégicas que promueven, de manera simultánea, acciones de mitigación y adaptación al cambio climático a través de un manejo integral del territorio que propicie el desarrollo rural sustentable bajo en carbono y, por tanto, apunte a una convergencia de la agenda ambiental y de desarrollo, siendo su campo de aplicación en los paisajes rurales con actividades forestales” (Comisión Nacional Forestal, 2017).

A la ENAREDD+ conforman siete componentes: 1) Políticas públicas y marco legal, 2) Esquemas de financiamiento, 3) Arreglos institucionales, 4) Monitoreo, reporte y verificación y nivel de referencia, 5) Salvaguardas sociales y ambientales, 6) Comunicación y desarrollo de capacidades, y 7) Participación social y transparencia, que agrupan 28 líneas de acción (Comisión Nacional Forestal, 2017). Los objetivos y líneas de acción se desglosan en el Anexo 1.

En 2017 también se presentan los avances en el Sistema Nacional de Salvaguardas y el Sistema de Información de Salvaguardas, que se entienden como principios, condiciones o criterios sociales y ambientales que guían el diseño e implementación de políticas, programas y otras acciones (Comisión Nacional Forestal, 2017). También se plantean los siguientes pasos para la implementación de la ENAREDD+, y se implementan actividades para

fortalecer capacidades técnicas e institucionales. Otra sección importante es la Iniciativa de Reducción de Emisiones (IRE).

Durante 2017 y 2018 se apoyó a 23 organizaciones sociales del sector forestal (OSSF), lo cual permitió desarrollar capacidades. Entre las organizaciones beneficiadas se cuentan la Asociación de Silvicultores de la Región Forestal Pachuca y Tulancingo, A. C., y Silvicultores de la Región Zacualtipán-Molango, A. C., ambas en el estado de Hidalgo.

También se inicia en 2017 el Proyecto de Fortalecimiento del Manejo Forestal Sustentable con Enfoque de Paisaje, que tiene como objetivo fortalecer la implementación del manejo forestal sustentable con enfoque de paisaje que se ha impulsado en los instrumentos de política forestal nacional, a fin de contribuir al incremento de la competitividad de los bosques y selvas productivos de México. Este programa se ha desarrollado en los estados de Chihuahua, Durango, Jalisco, Michoacán, Estado de México, Puebla, Hidalgo, Tlaxcala, Guerrero, Oaxaca, Veracruz, Chiapas, Campeche, Yucatán y Quintana Roo (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, 2022). En 2018 se desarrollaron también los protocolos para incorporar el monitoreo de la biodiversidad en áreas forestales. Estos protocolos se han implementado en los últimos tres años (Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza *et al.*, 2018).

También se han desarrollado acciones tempranas REDD+ a nivel estatal en Chiapas, Quintana Roo, Campeche, Estado de México, Yucatán, Jalisco, Chihuahua y Oaxaca, entidades en las que fueron instalados comités técnicos consultivos como mecanismos consolidados de plataformas participativas.

Propuesta de preparación de México. Con base en los temas identificados en el proceso de negociación y en los avances alcanzados, se recopilieron los componentes clave para un posible mercado REDD+ a nivel nacional. México, a través de la Comisión Nacional Forestal, ha preparado su estrategia nacional REDD+. Como primer paso, en 2010 presentó las metas y definiciones clave para guiar su desarrollo mediante el documento *Visión de México sobre REDD+* (Comisión Nacional Forestal, 2010). En 2011, a través del Fondo Cooperativo para el Carbono de los Bosques (FCPF, por sus siglas en inglés), se diseñó la *Propuesta de Preparación para México* (R-PP,

por sus siglas en inglés) (Comisión Nacional Forestal, 2010b), cuyo objetivo principal es el fortalecimiento de las capacidades técnicas y operativas de la Comisión Nacional Forestal en todas las escalas: nacional, estatal, municipal y local (Tabla 2).

La R-PP incluye un proceso de amplia participación dirigida a los usuarios de la tierra, a las instituciones gubernamentales y no gubernamentales en las políticas y proyectos relacionados con el uso del suelo y la preparación para el mecanismo de financiamiento internacional relacionado con REDD+.

Posteriormente, en 2015 se presentó el Informe de Progreso de Mitad de Periodo y Solicitud de Financiamiento Adicional.

Tabla 2. Desarrollo de actividades dentro de la estrategia REDD+ a escala nacional (N), subnacional (SN) y local (L).

<p>N</p>	<p>Atención a las causas de deforestación y degradación a través de programas federales</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● Mejorar los sistemas nacionales de áreas protegidas (mayor efectividad, incremento de actividades económicas alternas) ● Desarrollar sistemas más intensivos y sostenibles para la ganadería en áreas circundantes a los bosques ● Aumentar las áreas de manejo forestal sustentable (mayor efectividad, incremento en área, productos que no sean elaborados con madera, incremento de la silvicultura certificada) ● Restauración de tierras degradadas improductivas ● Mejorar los sistemas de control de incendios y plagas forestales ● Promover plantaciones de bioenergía (leña) ● Promover la agrosilvicultura ● Crear y mejorar mercados eficientes de productos forestales no fabricados con madera
----------	--	--

	<p>Desarrollo y fortalecimiento de capacidades</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● Fortalecimiento institucional ● Desarrollo de la capacidad institucional ● Involucramiento de las partes interesadas en el proceso REDD+
	<p>Esfera de acción de la comunidad</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● Desarrollo de lineamientos de mejores prácticas administrativas para las comunidades con el fin de evitar la degradación forestal e incrementar el valor de los bosques ● Intensificar la cooperación y sinergia entre comunidades forestales, ONG e instituciones académicas y gubernamentales para mejorar la gobernanza forestal ● Desarrollo de la capacidad de la comunidad para administrar y monitorear sus recursos forestales ● Implementar un programa amplio de comunicación y consultoría entre los propietarios de los bosques ● Desarrollo de proyectos con valor agregado a nivel de la comunidad, en torno a actividades relacionadas con la silvicultura
	<p>Incentivos económicos</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● Promover la demanda de productos forestales y servicios de ecosistemas de tal forma que pueda establecerse el desarrollo del mercado a nivel de comunidad y nacional ● Alinear los incentivos para las actividades de producción agrícola con las actividades de conservación forestal asociadas a REDD+ ● Desarrollar un índice de costos de oportunidad y diseñar un mecanismo de compensación para los propietarios de la tierra con el fin de proteger sus bosques e implementar mejores prácticas administrativas ● Desarrollo de actividades relacionadas con los bosques a nivel de la comunidad

	Integración de programas y políticas gubernamentales	<ul style="list-style-type: none"> ● Promover sinergias entre programas locales y nacionales ● Intensificar la cooperación y las sinergias entre la Semarnat y la Sagarpa, así como con otros órganos descentralizados (Conagua, Conafor, Conanp) ● Incrementar la comunicación entre diferentes niveles de gobierno para desarrollar políticas eficientes sobre los derechos de los usuarios (cultivo, carbono, alineación de experiencias nacionales e internacionales para desarrollar políticas de derechos de los usuarios)
SN	Actividades metodológicas	<ul style="list-style-type: none"> ● Establecimiento de un sistema de monitoreo, reporte y verificación a nivel subnacional
	Institucional	<ul style="list-style-type: none"> ● Establecimiento de grupos de trabajo REDD+ para consultas con las partes interesadas, desarrollo de acciones tempranas para el fortalecimiento de capacidades locales
L	Dueños de la tierra desarrollarán las siguientes actividades	<ul style="list-style-type: none"> ● Desarrollo de instrumentos a nivel de propietario de la tierra para la planeación del uso del suelo
		<ul style="list-style-type: none"> ● Generar en los propietarios de la tierra el desarrollo y fortalecimiento de capacidades relacionadas con la silvicultura
		<ul style="list-style-type: none"> ● Mejorar la organización a nivel comunidad o de ejido

* Es importante mencionar que las actividades que se proyecta a realizar no son limitativas y se adecuarán al avance de las negociaciones internacionales. Hasta el momento se le ha dado un mayor énfasis a la escala nacional debido a que cuenta con un mayor número de programas y políticas públicas.

Fuente: Estrategia Nacional para REDD+ (Comisión Nacional Forestal, 2017).

Requisitos que las organizaciones deben cumplir para recibir el apoyo del proyecto mexicano REDD+

Para recibir el apoyo del proyecto REDD+, las asociaciones interesadas deberán asignar una organización líder que tendrá la responsabilidad legal y administrativa sobre el cumplimiento de las metas comprometidas es su propuesta. Dicha organización deberá cubrir los siguientes requisitos.

I. La selección de propuestas contará con dos etapas:

1. Presentación de carta de intención: las organizaciones interesadas en el apoyo de la Alianza REDD+ México deberán presentar una carta de intención que contenga un perfil de la organización o alianza de grupos e instituciones (incluyendo sus capacidades y experiencia), los objetivos y resultados esperados, identificando las causas de deforestación y degradación forestal que se pretende atender.
2. Presentación, evaluación y selección de proyectos en extenso: las organizaciones cuyas cartas de intención resulten seleccionadas deberán presentar una propuesta de proyecto en extenso conforme a los lineamientos de la Alianza MREDD+. Estas propuestas serán evaluadas por un grupo de expertos externos a la Alianza MREDD, que identificará las propuestas más competitivas para recibir financiamiento.

II. En el caso de que los proyectos resulten seleccionados para recibir financiamiento, la organización líder deberá proporcionar al Fondo Mundial para la Conservación de la Naturaleza (FMCN) la siguiente documentación para la elaboración de un convenio, a más tardar tres semanas después de la notificación de la aprobación de su proyecto:

1. Propuesta técnica y presupuesto revisados y capturados en el SISEP, con base en las observaciones de los evaluadores y el personal de la Alianza REDD+ México.
2. Cuestionario de evaluación financiero-administrativa (FMCN, como miembro de la Alianza REDD+ México) y con el soporte de la siguiente documentación:
 - Copia de la escritura pública de la institución
 - Copia del poder notarial del representante legal

- En su caso, copia de la última publicación del DOF donde se demuestre que sea donataria autorizada
 - Datos de la cuenta bancaria exclusiva para el proyecto (nombre del banco, sucursal, plaza, número de cuenta, CLABE)
 - Copia del contrato de apertura de cuenta bancaria para el proyecto con firmas mancomunadas
 - Registro federal de causantes
3. Comprobante fiscal (recibo de donativo en caso de ser donataria autorizada, recibo simple en caso de firmar un contrato de mandato o factura en el caso de firmar un contrato de prestación de servicios). El comprobante fiscal deberá ser enviado al momento de realizar el primer desembolso.

Estudio de caso en San Bartolo Tutotepec, Hidalgo, para ser propuesta en el programa REDD+

Antecedentes

Aunque propiamente el pago de servicios ambientales por captura de carbono es reducido, se pueden considerar que algunos los proyectos apoyados han sido exitosos. Por ejemplo, en los bosques tropicales del ejido Noh Ben, Quintana Roo, se valoró la biomasa a partir de inventarios forestales. Tras las evaluaciones realizadas se determinó que el bosque tropical tiene la capacidad de almacenamiento de carbono de 353.341 tC/ha, con un ingreso por aprovechamiento forestal de \$ 6'021.850.44 para el año 2002, mientras que el ingreso por la venta de servicios ambientales de almacenamiento de carbono en la misma área se estimó en \$ 21'200,442.00 (Bautista y Torres, 2003).

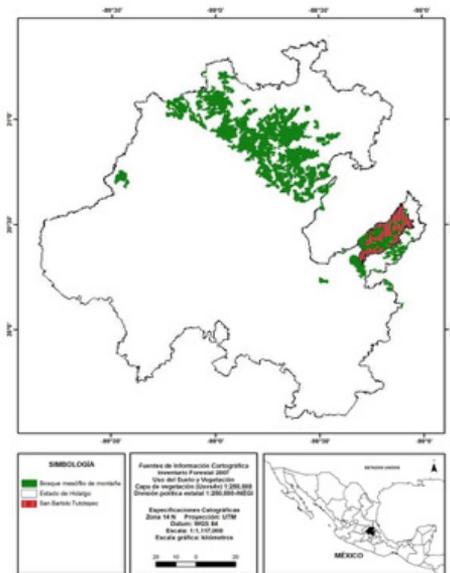
En la Sierra Madre Oriental (SMO) se realizó la valoración económica del carbono almacenado distribuido en la biomasa en diferentes tipos de vegetación, a partir de mapas de cobertura vegetal. El valor estimado del servicio ambiental de captura de carbono en la SMO fue de 39 millones de dólares, acentuado por el potencial de captura de carbono del bosque de encino, con un valor de tres millones de dólares en el mercado internacional

y de un estimado de 24 millones de dólares en el mercado europeo y de 22 millones de dólares para el mercado americano (Torres *et al.*, 2010).

Zona de estudio

En Hidalgo, el bosque mesófilo de montaña a lo largo de la Sierra Madre Oriental (Luna-Vega *et al.*, 2000) es una vegetación altamente perturbada pero que se mantiene en fragmentos ubicados en áreas de difícil acceso para la agricultura y ganadería. Dentro de la región Otomí-Tepehua del estado se encuentra el municipio de San Bartolo Tutotepec, con una extensión de 305.80 km² (Figura 1). En sus partes más altas se ubican fragmentos de bosque mesófilo con formaciones dominadas por encinos (Calva-Soto *et al.*, 2019).

Figura 1. Distribución del bosque mesófilo de montaña en Hidalgo y ubicación del área de estudio, en el municipio de San Bartolo Tutotepec.



Fuente: *Cartografía de vegetación y uso de suelo*, Serie IV (Inegi, 2007).

Área Natural Protegida denominada Zona de Preservación Ecológica Chicamole. En enero de 2008, a petición de los comunitarios, fue decretada la Zona de Preservación Ecológica Chicamole, localizada dentro del ejido de Chicamole, municipio de San Bartolo Tutotepec, Hidalgo, con altitud de 2,150 msnm. Cuenta con una superficie de 67.56 hectáreas, mismas que corresponden a tierras de uso común y representan un 40.0% de la superficie total del ejido (Consejo Estatal de Ecología, 2008). La precipitación anual es de 1853 mm y lluvia invernal de 7.8%. Cuenta con un verano fresco y largo. La temperatura media anual es de 16.8°C (Consejo Estatal de Ecología, 2008).

Determinación de la cantidad de carbono almacenado mediante variables dasométricas

El trabajo de campo se llevó a cabo dentro de la zona de Chicamole durante el mes de octubre de 2014, cuando la mayoría de la vegetación tiene follaje. La metodología propuesta para la toma de datos en campo se basó en el empleo de quince cuadros de 200 m² (10 m × 20 m), con una superficie total muestreada de 3,000 m². En cada cuadrante se midieron la altura total y el diámetro normalizado de los árboles.

Para estimar la biomasa aérea de los árboles se calculó el área basal (AB) para cada uno de los árboles presentes. El AB (expresada en m²/ ha) se estimó de la siguiente manera: $AB = \pi / 4 (Dn^2)$, donde **Dn** = diámetro a la altura del pecho.

Se estimó el volumen maderable (también llamado volumen del fuste), donde el valor AB se multiplicó por la altura (H) y por el coeficiente de forma para *Quercus* sp. (volumen real y volumen aparente de un árbol), tomado de la memoria del inventario forestal del estado de Hidalgo (1985), con la ecuación: **Vol** = AB × H × Coeficiente de forma.

Finalmente, la biomasa se determinó multiplicando el volumen del fuste por la densidad de madera, considerando el 0.70 para *Quercus* sp. (Reyes *et al.*, 1992), con la siguiente ecuación: **Biomasa** = V × Densidad de madera (0.70 peso seco).

El contenido de carbono se estimó considerando el 50% del valor de la biomasa (Panel Intergubernamental de Expertos para el Cambio Climático, 2006).

Se realizó una regresión potencial para ajustar la relación entre biomasa con respecto a los diámetros de los árboles muestreados, con la siguiente ecuación: $CC = \text{Biomasa} \times C(50\%) \times FEB(1.6)$. Donde: CC = contenido de carbono, FEB = factor de expansión para fustes de *Quercus* sp. (1.6) y C = proporción de carbono en la biomasa seca $tC(50\%)$.

Una vez obtenidos los datos de carbono por individuo, se separaron por cuadrante. De cada cuadrante se obtuvo el promedio del carbono para posteriormente calcular el error estándar y la desviación estándar. Con ello se obtuvo el contenido de carbono por hectárea, el cual se transformó en toneladas de dióxido de carbono (tCO_2e), de acuerdo a los estándares en los proyectos de carbono, donde el bióxido de carbono es 3.67 veces el peso del carbono en la biomasa (Panel Intergubernamental de Expertos para el Cambio Climático, 2006). Es decir, una tonelada de carbono fijada en un árbol equivale a capturar 3.67 toneladas de dióxido de carbono (tCO_2e). Para estimar la emisión de CO_2 por árbol, se realizó la conversión de $1 tC/ha = tCO_2e/ha$.

Para estimar el valor económico por tonelada de dióxido de carbono presente en una hectárea, se tomó como referencia el valor máximo de diez dólares por tonelada de carbono con lo establecido por Heimdal *et al.* (2012), de acuerdo al precio proporcionado por el mercado de carbono en los proyectos de REDD+ en América Latina.

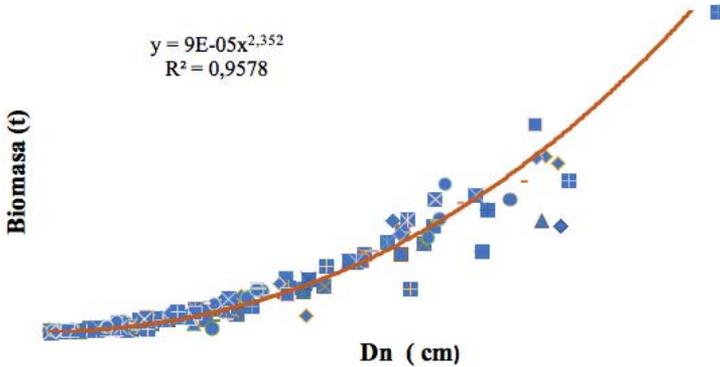
Resultados

En una superficie de $3,000 m^2$ se contabilizaron 226 árboles, con diámetro normal (D_n) que varió en un intervalo de >7.5 cm a 106.5 cm, con una media de 28.49 cm. La altura presentó una media de 9.94 m, con valores máximos de 19.1 m y mínimos de 2 m. Los datos anteriores expresan valores bajos en la biomasa debido a que la mayor parte de los árboles son de diámetros pequeños.

Se realizó una regresión potencial que muestra una relación entre biomasa y diámetros de los árboles muestreados. En la Figura 2 se aprecia el diagrama de dispersión con tendencia exponencial, en el que se observa una curva de ajuste del modelo considerando la variable del D_n para predecir la relación de la biomasa para *Quercus* sp. Se observa una relación positiva

entre las categorías diamétricas y la biomasa, de tal manera que el aumento del diámetro influye en la ganancia de biomasa y, por lo tanto, en el almacenamiento de carbono. La ecuación se expresa de la siguiente manera: $y = 9E-05x^{2,352}$, $R^2 = 0.957$.

Figura 2. Relación de la biomasa total con respecto al diámetro para cada árbol de *Quercus* sp.



Fuente: elaboración propia.

La estimación del carbono en promedio fue de 92.95 tn/ha \pm 6.59 tn (e.s.) (Tabla 3). En total, el intervalo estimado de carbono almacenado en la biomasa aérea arbórea está entre 99.54 tn y 86.35 tn, con un promedio de 6279.70 tC en una superficie de 67-56 hectáreas de BMM. Los datos obtenidos por Ha⁻¹ fueron multiplicados por la superficie total del área de estudio (846.182 ha), para obtener un contenido total de 78652.61 tC carbono almacenado.

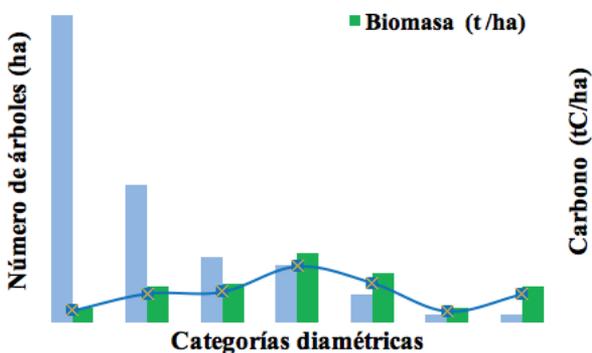
Tabla 3. Estimación de la biomasa aérea y carbono almacenado en el bosque mesófilo de montaña.

Categorías	Número de árboles	Carbono almacenado (tC)
1 ha	753.5	92.95

Fuente: elaboración propia.

Finalmente, se realizó una comparación entre el carbono almacenado, la biomasa estimada, el número de árboles y las categorías diamétricas por hectárea del bosque (Figura 3). El mayor número de árboles se encuentra en las primeras categorías diamétricas, pero la cantidad de carbono y la biomasa estimadas es mucho menor. Sin embargo, en la categoría 4 el contenido de carbono es el más alto en comparación con el número de árboles y la cantidad de biomasa.

Figura 3. Comparación del número de árboles (barra azul), la biomasa estimada (barra verde) y la cantidad de carbono (línea) estimada para una hectárea del bosque mesófilo de montaña.



Fuente: elaboración propia.

Valoración del CO₂ almacenado en el bosque mesófilo de montaña

Para conocer el valor económico aproximado que presenta el bosque en Chicamole se consideraron las estimaciones de carbono almacenado. Para este fin se tomó en cuenta el precio establecido en la venta del servicio ambiental de carbono de USD 10 tC/ha (Heimdal *et al.*, 2012). De acuerdo a los cálculos realizados, se muestran los resultados obtenidos por tonelada de dióxido de carbono en dólares (Tabla 4).

La valoración económica del dióxido de carbono almacenado en el bosque fue de 230,465.06 dólares.

Tabla 4. Valoración económica del CO2 almacenado en el bosque mesófilo de montaña.

Bosque mesófilo de montaña	Superficie	Existencias tC	Existencias tCO ₂	Valor USD (USD \$10.00 tCO ₂)
	1 ha	92.95	341.126	3,411.26
ANP Chicamole	67.56	6,279.70	23,046.506	230,465.06
Área total de BMM	846.182	78,652.61	288,655.104	2,886,551.04

Fuente: elaboración propia.

Lista de las especies de flora y fauna presentes en el área de estudio del municipio de San Bartolo Tutotepec

El plus agregado a la iniciativa REDD+ implica la conservación de la biodiversidad que habita los bosques. Para la zona de estudio se generaron listados de especies obtenidos a partir de la consulta en inventarios de flora y fauna para el municipio de San Bartolo Tutotepec (Howell y Webb, 2005; Villavicencio-Nieto y Pérez-Escandón, 2005; Martínez-Morales *et al.*, 2007; Aguilar-López, 2009; Ramírez-Bautista, *et al.* 2010; Figueroa, 2012; Muñoz-Vásquez, 2013). No se incluyen en los listados en este capítulo, pero en la Tabla 5 puede verse un resumen del número de especies reportadas.

Tabla 5. Riqueza de especies de la fauna presente en el bosque mesófilo de montaña en San Bartolo Tutotepec, Hidalgo.

Clase	Orden	Familia	Genero	Especies	Categoría
Anfibios	2	5	10	10	3
Reptiles	1	7	10	11	3
Aves	19	59	199	353	57
Mamíferos	7	15	43	65	20

Fuente: elaboración propia.

Elementos básicos para la implementación de REDD+ a nivel local, de acuerdo a los lineamientos establecidos para México

El diseño e implementación del programa REDD+ a nivel local necesita de varias acciones sin las cuales el proyecto no podría llevarse a cabo. Entre ellas destacan la construcción y fortalecimiento de capacidades de los actores involucrados, la gobernanza local para establecer los compromisos políticos en el desarrollo e implementación del programa (incluyendo la participación activa de los dueños y poseedores del bosque hacia un manejo forestal sostenible en el que la comunidad local lleve a cabo el uso sostenible de los recursos forestales), así como la búsqueda de financiamiento para el desarrollo de las fases del programa y su implementación a largo plazo.

Capacidades locales. Es necesario contar con un equipo calificado de capacitadores locales que puedan fortalecer las capacidades de las comunidades y otros grupos de actores locales en temas relacionados con el cambio climático, utilizando metodologías y herramientas apropiados para cada uno de los diferentes actores con injerencia directa e indirecta en los bosques en cada comunidad

El gobierno municipal de San Bartolo Tutotepec no cuenta con recursos ni capacidades técnicas sobre los programas REDD+. Sin embargo, las organizaciones a nivel local (núcleos agrarios) tienen capacidades organizativas y de gestión para la deliberación colaborativa, la construcción de acuerdos y el desarrollo de las iniciativas. La mayoría de las asambleas ejidales o comunitarias son espacios de diálogo colaborativo y deliberación conjunta para el bien colectivo.

Tabla 6. Instituciones gubernamentales que tienen corresponsabilidad para impulsar y/o apoyar a REDD+ a nivel internacional, nacional, estatal y local (Comisión Nacional Forestal, 2013).

Niveles	Instituciones
Internacional	Organismos multilaterales: Banco Mundial, BID, PNUMA, PNUD, FAO. Agencias de cooperación: USAID Alianza México REDD+, Agencia Francesa para el Desarrollo, Agencia Noruega, Agencia Finlandesa, Embajada Británica, Agencia Francesa para el Desarrollo.
Federal	Conabio, Conafor, Conanp, Inifap, Inira, PA, PPA, Profepa, SEMA, Pronatura, Seduma, Semarnat, SRA, Sagarpa.
Estatal	Sector ambiental, sector forestal, sector agropecuario.
Municipal	Autoridades municipales.
Local	Autoridades agrarias (ejidatarios y comisariados de bienes comunales).

Fuente: tomado del borrador de estrategia de comunicación REDD+ (Comisión Nacional Forestal, 2010).

Tenencia de la tierra. Uno de los retos más importantes es la tenencia de la tierra, debido a que los derechos de la tierra y de los recursos son temas de preocupación internacional en relación con REDD+ (Angelsen *et al.*, 2010; Larson *et al.*, 2013).

A nivel estatal y municipal, las reglas internas del ejido o de las comunidades regulan el uso de la tierra. Los derechos específicos sobre esta se refieren al uso común y al plano interno del ejido. Los documentos que otorgan la posesión de la tierra deben estar certificados y registrados dentro del Registro Nacional Agrario. Una Asamblea General (considerada como la máxima autoridad local), constituida por miembros de la comunidad, tiene el poder para decidir si se adoptan o no prácticas de manejo sostenibles colectivas y define los mecanismos para garantizar la distribución equitativa de sus beneficios (Felicani y Peskett, 2011).

El principal uso de la superficie del municipio de San Bartolo Tutotepec es de agostaderos; en segundo lugar se encuentra la superficie agrícola y en tercero la forestal (Consejo Estatal de Ecología, 2008). Se han emitido acciones de certificación y titulación de propiedad social (ejido y comunidad social) para uso común (que incluye bosques), con la implementación del Programa de Certificación de Derechos Ejidales y Titulación de Solares (Procede). Dentro del área de estudio, solo los ejidos de Chicamole y de Tuto se encuentran bajo este programa. El resto del área pertenece a una pequeña propiedad privada.

La reserva Chicamole se encuentra en terrenos del ejido del mismo nombre, este ejido tiene en total 170 hectáreas, según su dotación original de fecha 11 de abril de 1961 (Consejo Estatal de Ecología, 2008).

Discusión general

Los bosques son considerados importantes reguladores en el nivel de carbono atmosférico (Ordóñez, 1998, 1999) ya que tienen la capacidad de absorber y fijar el carbono a través de la fotosíntesis, de manera natural, en sus tejidos vegetales (fuste, raíces, hojas, ramas) (Tipper, 1998; Ordóñez, 1999; Husch, 2001; Valenzuela, 2001).

Debido a lo anterior, en este trabajo se determinó la cantidad de biomasa y carbono que almacena el bosque mesófilo de montaña en el municipio de San Bartolo Tutotepec. Este trabajo constituye una primera aproximación en la obtención de valores relacionados con la estructura de bosque mesófilo de montaña a nivel local, los cuales son de gran importancia en la evaluación y participación de los bosques en la formulación de políticas ambientales, tales como la estrategia REDD+, a fin de obtener beneficios monetarios, ambientales y de conservación. Sin embargo, es necesario señalar que existen algunas limitaciones metodológicas en este trabajo relacionadas con las mediciones en campo que pueden afectar la precisión de las estimaciones: debido a que solo se consideró la cobertura arbórea aérea con diámetros > 7.5 cm, se excluyó la estimación de carbono en la hojarasca, la vegetación arbustiva y el suelo.

El contenido de biomasa aérea almacenada en la comunidad de *Quercus* sp. de la zona de bosque mesófilo de montaña en San Bartolo Tutotepec fue en promedio de $116.18 \text{ tn/ha} \pm 7.9 \text{ tn}$ (e.s.) con un intervalo de 124.15

tn y 108.22 tn. En este estudio solo se consideró la biomasa aérea, por lo que la biomasa total puede incrementarse hasta en un 20% con respecto del valor obtenido (Castañeda-González *et al.*, 2012). Este resultado es menor a lo encontrado por Rodríguez-Laguna (2009) para un bosque de pino-encino con 219.3 t ha⁻¹ de biomasa. Esto contrasta con lo reportado por Bautista y Torres (2003), quienes encontraron que la biomasa promedio estimada para un bosque tropical del ejido NohBec, Quintana Roo, México, fue de aproximadamente de 105.6 t ha de biomasa. Por otro lado, con el empleo de modelos matemáticos, Sanquetta *et al.* (2002) estimaron que la cantidad de biomasa es menor para *Pinus cooperi*, con 98.1 t ha en Pueblo Nuevo, Durango (Pimienta de la Torre *et al.*, 2007).

Cabe mencionar que en estos estudios se utilizó un muestreo dirigido (método indirecto) y las mediciones se realizaron en árboles de pie (mediciones de Dn, H y densidad de madera), y mediante funciones volumétricas, factores de expansión de la biomasa y datos existentes de volumen total. Estas diferencias encontradas en la cantidad de biomasa se deben a la estructura y composición florística de las diferentes comunidades vegetales dadas por diversos factores ambientales, como la temperatura, la precipitación, la densidad de masa, el suelo, la pendiente, la altura, las condiciones topográficas, el índice de crecimiento, las condiciones climáticas y la edad (Ciesla, 1996; Velázquez-Rosas *et al.*, 2003; Álvarez, 2010).

Lo anterior concuerda con Álvarez-Arteaga *et al.* (2013), quienes determinaron el contenido de biomasa arbórea en cinco comunidades de bosques montanos de niebla. En su trabajo se observa un patrón complejo con respecto a la altitud: el valor máximo se registró a 2,500 m y representó casi el doble (1.8 veces) de lo encontrado en 1,950 y 2,400 m, y 1.2 veces el valor a 1,500 m de altitud.

Para estimar el contenido de carbono en las especies vegetales se emplea la biomasa multiplicando su valor por un factor que, dependiendo de la especie, es diferente en cada caso (Fragoso 2003; Garzuglia y Zaket, 2003). Autores como MacDicken (1997) y Husch (2001) afirman que en promedio la materia vegetal seca contiene 50% de carbono (C).

En este sentido, la estimación del carbono almacenado se realizó a partir de la biomasa total, multiplicada por la fracción de carbono recomendada

por el Panel Intergubernamental de Expertos para el Cambio Climático (2006), del 50%. En este trabajo se encontró que el bosque mesófilo de montaña de San Bartolo Tutotepec almacena 92.95 tC/ha de carbono en su biomasa aérea. Este resultado es menor a lo reportado por Rodríguez-Laguna (2009) en su estudio realizado para el bosque de pino en la Reserva de la Biosfera El Cielo, Tamaulipas, con 110 tC ha⁻¹. Por su parte, Scherr (2002) presenta información sobre la capacidad de almacenamiento de carbono en diferentes ecosistemas forestales y menciona que un bosque primario almacena 300 tC/ha.

Este resultado es menor a lo reportado por Bautista y Torres (2003), quienes determinaron que el bosque tropical tiene la capacidad de almacenamiento de carbono de 353.34 tC/ha. Los estudios revisados sobre el carbono almacenado en los diferentes tipos de bosques se basan principalmente en la heterogeneidad ambiental, la distribución de las especies, los cambios en la temperatura y la humedad que presenta cada uno de estos ecosistemas (Clark y Clark, 1996).

Sin embargo, los resultados aquí presentados sirven para obtener una primera aproximación de la cantidad de carbono almacenado al momento de hacer las mediciones en campo. No obstante, faltaría generar más información, propiamente de datos sobre el crecimiento de los árboles, para estimar la capacidad de captura o secuestro anual del carbono, lo cual es de vital importancia para obtener una línea base sobre el almacenamiento de carbono e ingresar al mercado de pagos por servicios ambientales, como la estrategia REDD+.

Valoración económica de carbono almacenado en el bosque mesófilo

La valoración económica y ecológica del servicio de captura de carbono constituye una herramienta clave para la protección y el manejo sustentable de los bosques, ya que los beneficios de estas actividades son mayores, en términos de desarrollo económico y ambiental, que los que se obtienen de la pérdida y destrucción de estos ecosistemas. De tal manera, el pago de servicios ambientales por fijación y almacenamiento de carbono representa una opción para dar valor agregado a los bosques, lo que podría tener un gran potencial económico y mejores beneficios para sus dueños (Ávila *et al.*, 2001).

Debido a lo anterior, en este estudio se realizó la valoración económica de la cantidad de carbono que almacena la zona de bosque mesófilo de montaña de San Bartolo Tutotepec, Hidalgo, tras lo cual se obtuvo como resultado que el valor económico para una hectárea de bosque que almacena 92.95 tC (341.126 tCO₂ e) es de \$3,411.26 dólares, mientras que la superficie forestal total de la zona de estudio de 846.182 ha se valoró en \$2'886,551.04 dólares. Por otro lado, Bautista y Torres (2003), en su estudio de valoración económica de almacenamiento de carbono para el bosque tropical en Quintana Roo, México, determinaron que esta fue de \$2'120,044.2 dólares para una superficie de 600 ha. En tanto, un bosque de neblina montano del cerro Chamusquín, con una superficie de 12 ha, se valoró en \$79,200 dólares (estimación hecha en 2014).

En estos estudios, los autores tomaron como base el precio fijado por tonelada de CO₂ de \$10 dólares (Heimdal *et al.*, 2012). Sin embargo, los protocolos y los métodos analizados no son comparables y no tienden a centrarse en la medición de solo un tipo de almacén o flujo de carbono, lo que limita la capacidad de entender los procesos a nivel de ecosistemas (Paz *et al.*, 2010). El tipo de información que se deriva de estos estudios conduce a otros retos más allá del sitio donde se generó dicha valoración, como desarrollar y gestionar proyectos de producción y venta de bienes y servicios ambientales para promoverlos comercialmente a los mercados de carbono nacionales e internacionales.

En este sentido, los Servicios Ambientales de Oaxaca (Pronatura, 2011) han logrado que las comunidades que cuidan y conservan los bosques reciban ingresos económicos por vender 76,821 toneladas de dióxido de carbono. Los ingresos directos a las comunidades son de más de 6.7 millones de pesos. Este proyecto ha ido y sigue en aumento: en 2010 se vendieron 56,065 tCO₂ e, con una inversión directa a las comunidades de \$4'913,497.19 pesos.

Lo anterior está contribuyendo a disminuir la deforestación mediante el surgimiento de mercados voluntarios, lo que es resultado de conservar los bosques y crear nuevas oportunidades para generar un nuevo valor en ellos a partir de sus servicios ecosistémicos.

Como los proyectos REDD+ se presenta una de las oportunidades más importantes para la conservación de la biodiversidad mundial (Organización

de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2010; Harvey *et al.*, 2010). Paoli *et al.* (2010) mostraron que la mayoría de los bosques ricos en carbono en Indonesia no se solapan con las áreas ricas en especies o áreas con mayor número de especies amenazadas.

La ventaja de la estrategia REDD+ es que cuenta con una serie de actividades complementarias para reducir la deforestación y la degradación forestal. Para el bosque mesófilo de montaña, la protección del bosque sería una forma efectiva de conservar el carbono forestal, la biodiversidad y otros servicios ambientales, debido a que existe una amenaza significativa e inmediata de deforestación; sin embargo, su éxito depende de la participación de las comunidades locales dependientes del bosque, debido a que es el principal medio de subsistencia de las comunidades locales. Una manera de contribuir a la implementación de la estrategia REDD+ es participar activamente en los esfuerzos comunitarios relacionados con la adaptación y mitigación al cambio climático e invitar a organizaciones y comunidades vecinas a participar en estos eventos.

Es necesario propiciar la integración de políticas a nivel nacional, regional y local. Una alternativa para facilitar su implementación es promover debates sobre REDD+ en un terreno neutral, por ejemplo, a través de una institución que permita la gestión de la interacción (Ávalos-Rodríguez *et al.*, 2021). Esto impulsaría que la política forestal incorpore las necesidades y preocupaciones del sector agrícola, así como un mayor interés en REDD+ por parte de los sectores de uso de la tierra y, lo más importante, que se tome en cuenta la perspectiva que surge desde el interior de las comunidades, es decir, entre los ejidatarios (Ávalos-Rodríguez *et al.*, 2021). También debe fortalecerse la incorporación de reglamentos en las políticas REDD+ y esquemas de gobernanza forestal. La percepción social de todos los actores puede permitir la comprensión para generar una estrategia (Ávalos-Rodríguez *et al.*, 2021).

Para apoyar el proceso de la integración de políticas para la REDD+ a nivel estatal y evitar conflictos, se sugiere establecer relaciones mutuamente responsables entre autoridades agrícolas municipales y gubernamentales y actores importantes de REDD+ (Morales *et al.*, 2018; Špirić y Ramírez, 2021), incluyendo los saberes y aspiraciones de las instituciones sociales,

del gobierno y de las comunidades locales (Alcalde *et al.*, 2020). También deben de considerarse otros actores, como agentes extraterritoriales, ONG internacionales, entidades gubernamentales y multilaterales, agentes locales que fungen como intermediarios y unidades domésticas con y sin derecho a la tenencia de la tierra (Tobasura-Morales *et al.*, 2018).

Conclusiones

En este escrito se da un panorama general de la situación de REDD+ en México y se propone una guía de apoyo para la implementación de estos mecanismos. En particular presentamos el estudio de caso de San Bartolo Tutotepec.

El bosque mesófilo de montaña de San Bartolo Tutotepec concentra el mayor número de árboles en las categorías diamétricas de 7.5 a 40 cm de diámetro (90%), por lo cual se define como un bosque en regeneración con alta capacidad de almacenar cantidades considerables de biomasa y carbono en sus componentes aéreos (fustes, ramas y hojas). Sin embargo, la zona tiene la capacidad de almacenar 92.95 tC/ha^{-1} , cantidad equivalente a $341.126 \text{ tCO}_2\text{e}$ que se distribuye de manera diferencial en su biomasa aérea. El total de carbono almacenado en la zona de bosque mesófilo de montaña equivale a $288,655.104 \text{ tCO}_2\text{e}$, con un valor de aproximadamente $\$2'886,551.04$ dólares.

Este resultado es indispensable para ingresar a los mercados globales de servicios ambientales REDD+ y poder recibir los beneficios económicos por evitar la deforestación y la degradación forestal, conservar los bosques que aún no se encuentran amenazados, implementar el manejo sostenible, aumentar las reservas de carbono mediante la reforestación y restauración forestal, la preservación e incremento de la biodiversidad existente y la reducción de las emisiones de CO_2 .

El cambio de uso de suelo para la zona de bosque mesófilo de montaña en San Bartolo Tutotepec ha ocasionado la pérdida de 86 ha de bosque a lo largo de 16 años por cambio de uso de suelo de forestal al agrícola lo que puede ocasionar pérdida de la biodiversidad. Por esto, implementar un proyecto basado en REDD+ permitirá amortiguar la presión sobre los

bosques mediante el pago de Servicios Ambientales a los propietarios. A pesar de que en el estado de Hidalgo aún no se implementan los proyectos REDD+, la zona propuesta de bosque mesófilo de montaña en San Bartolo Tutotepec sí cumple con los elementos básicos de los mercados REDD+ a escala local.

Referencias

- Aguilar-López, M. (2009). *Estructura de ensamblaje de mamíferos en el bosque mesófilo de montaña de Hidalgo, México* [tesis de maestría]. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
- Alcalde, H. A., Satyal, P., Sánchez, A. P. S., y Pskowski, M. (2020). Conflictividad en la implementación temprana de REDD+ en México. *Sociedad y Ambiente*, 22, 152-179.
- Álvarez, A. (2010). *Evaluación de la captura y estabilidad del carbón en un ecosistema de bosque mesófilo de montaña a lo largo del gradiente altitudinal en la Sierra Norte de Oaxaca* [tesis de doctorado]. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Álvarez-Arteaga, G., García Calderón, N., Krasilnikov, P., y García-Oliva, F. (2013). Almacenes de carbono en bosques montanos de niebla de la Sierra Norte de Oaxaca, México. *Agrociencia*, 47(2), 171-180.
- Angelsen, A., Brockhaus, M., Kanninen, M., Sills, E., Sunderlin, W. D., y Wertz-Kanounnikoff, S. (eds.) (2009). *Realising REDD+ National Strategy and Policy Options*. Centro Internacional para la Investigación Forestal (CIFOR).
- Ávalos-Rodríguez, M. L., McCall, M. K., Špirić, J., Ramírez, M. I., y Alvarado, J. J. (2021). Analysis of indicators of Legality, Legitimacy and Legitimation in Public Policy: An Example of REDD+ in Mexico. *International Forestry Review*, 23(2), 127-138.
- Ávila, G., Jiménez, F., Beer, J., Gómez, M., e Ibrahim, M. (2001). Almacenamiento, fijación de carbono y valoración de servicios ambientales en sistemas agroforestales en Costa Rica. *Agroforestería en las Américas*, 8(30), 32-35.
- Banco Mundial (2008). *Global Monitoring Report: Millennium Declaration Goals and the Environment*.

- Bautista, H., y Torres, P. (2003). Valoración económica del almacenamiento de carbono del bosque tropical del ejido Noh Bec, Quintana Roo, México. *Revista Chapingo: Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 9(1), 69-75.
- Calva-Soto, K., Bravo-Cadena, J., Ortega-Meza, D., y Pulido-Silva, M. (2019). Perspectivas de conservación desde múltiples actores: el caso de la Zona Ecológica de Preservación Chicamole, México. *Bosque*, 40(2), 105-115.
- Ciesla, W. M. (1996). *Cambio climático, bosques y ordenación forestal*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO).
- Clark, D. B., y Clark, D. A. (1996). Abundance, Growth and Mortality of Very Large Trees in Neotropical Lowland Rain Forest. *Forest Ecology and Management*, 80(1-3), 235-244.
- Comisión Nacional Forestal (2010). *Visión de México sobre REDD+: Hacia una estrategia nacional*. Comisión Nacional Forestal; Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Comisión Nacional Forestal (2010b). *Readiness Preparation Proposal (R-PP) Template (2010)*. Banco Mundial; Comisión Nacional Forestal; Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Comisión Nacional Forestal (2017). *Estrategia Nacional Para REDD+ 2017-2030 (ENAREDD+)*. Recuperado el 5 de marzo de 2022 de <http://www.enaredd.gov.mx/wp-content/uploads/2017/09/Estrategia-Nacional-REDD+2017-2030.pdf>.
- Consejo Estatal de Ecología (Coede) (2008). *Estudio técnico para certificar las áreas de uso común del ejido Chicamole como Zona de Preservación Ecológica*. Secretaría de Obras Públicas, Comunicaciones, Transportes y Asentamientos.
- Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (2022). REDD+. Recuperado el 5 de marzo de 2022 de <https://unfccc.int/topics/land-use/workstreams/reddplus>.
- Corbera, E., Estrada, E., May, P., Navarro, G., y Pacheco, P. (2010). Derechos a la tierra, los bosques y el carbono en REDD+. En E. Petkova, A. Larson y P. Pacheco (eds.). *Gobernanza forestal y REDD+: Desafíos para las políticas y mercados en América Latina*. CIFOR.
- Cordero, D. (2011). *Los bosques en América Latina*. Fundación Friedrich Ebert Stiftung (FES-ILDIS). Proyecto Regional de Energía y Clima.

- Felicani, F., y Peskett, L. 2011. Carbon Rights in REDD+: The Case of Mexico. REDD net.
- Figueroa, C. A. (2012). *Mastofauna terrestres del bosque mesófilo de montaña en cumbre de Muridores, Hidalgo* [tesis de licenciatura]. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
- Fondo Mexicano de Conservación de la Naturaleza, Comisión Nacional Forestal, Agencia de los Estado Unidos para el Desarrollo Internacional y el Servicio Forestal de los Estados Unidos (2018). *Biocomuni-Monitoreo Comunitario de la Biodiversidad: Una guía para núcleos agrarios*. Comisión Nacional Forestal; Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza.
- Fondo Cooperativo para el Carbono de los Bosques (2022). *Annual Report*. Recuperado el 5 de marzo de 2022 en <https://www.forestcarbonpartnership.org/>.
- Fragoso, L. (2003). *Estimación del contenido y captura de carbono en biomasa aérea del predio Cerro Grande, municipio de Tancítaro, Michoacán* [tesis de licenciatura]. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Garzuglia, M. Y., y Zaket, M. (2003). *Wood Volume and Woody Biomass*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Harvey, C. A., Dickson, B., y Kormos, C. (2010). Opportunities for Achieving Biodiversity Conservation Through REDD. *Conservation Letters*, 3(1), 53-61.
- Heimdal, C., Dimantechev, E., Chai, H., Mazzacurati, E., Nordeng, A., Sorhus, I., Yakymenko, N., y Zelljadt, E. (2012). *Carbon 2012. A Market Waiting for Godot*. Thomas Reuters Point Carbon.
- Howell, S. N. G., y Webb, S. (2005). *A Guide to the Birds of Mexico and Northern Central America*. Oxford.
- Husch, B. (2001). *Estimación del contenido de carbono de los bosques*. Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales. Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile.
- Larson, M., Brockhaus, M., Sunderlin, D., Duchelle, A., Babon, A., Dokken, T. (2013). Land tenure and REDD+: The good, the bad and the ugly. *Global Environmental Change*, 23(3), 678-689.

- Luna-Vega, I. L., Ayala, O. A., Morrone, J. J., y Organista, D. E. (2000). Track Analysis and Conservation Priorities in the Cloud Forests of Hidalgo, Mexico. *Diversity and Distributions*, 6(3), 137-143.
- MacDicken, K. G. (1997). *A Guide to Monitoring Carbon Storage in Forestry and Agroforestry Projects*. Winrock International Institute for Agricultural Development.
- Martínez-Morales, M. A., Ortiz-Pulido, R., De la Barreda, B., Zuria, I. L., Bravo-Cadena, J., y Valencia-Herverth, J. (2007). Hidalgo. En R. Ortiz-Pulido, A. Navarro-Sigüenza, H. Gómez de Silva, O. Rojas-Soto y T. A. Peterson (eds.). *Avifaunas estatales de México*. Sociedad para el Estudio y Conservación de las Aves en México, A. C. (Cipamex).
- Masera, O., De Jong, B., Ricalde, I., y Ordóñez J. A. (2000). *Consolidación de la oficina mexicana para la mitigación de gases de efecto invernadero: Reporte final*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Muñoz-Vásquez, B. (2013). *Distribución, abundancia y uso del hábitat del venado Temazate (Mazama temama) en los bosques mesófilos de San Bartolo Tutotepec, Hidalgo, México* [tesis de maestría]. Instituto de Ecología.
- Návar-Cháidez, J. J., González, N., y Graciano, J. (2005). Carbon Stocks and Fluxes in Reforestated Sites of Durango, Mexico. *Madera y Bosques*, 11(2), 15-34.
- Olsen, N., y Bishop, J. (2009). *The Financial Costs of REDD: Evidence from Brazil and Indonesia*. Unión Internacional de Conservación de la Naturaleza.
- Ordóñez, A. (1998). *Estimación de la captura de carbono en un estudio de caso para bosque templado: San Juan Nuevo, Michoacán* [tesis de licenciatura]. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Ordóñez, A. (1999). *Captura de carbono en un bosque templado: El caso de San Juan Nuevo, Michoacán*. Instituto Nacional de Ecología; Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca; Desarrollo Gráfico Editorial.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2010). *Evaluación de los recursos forestales mundiales del año 2010*.
- Ortega, F., y Castillo, A. (1996). El bosque mesófilo de montaña y su importancia forestal. *Ciencias*, 43(julio-septiembre), 32-39.
- Panel Intergubernamental de Expertos para el Cambio Climático (1996). *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Workbook and Reference*

- Manual Revised Version 1996*. Programa de las Naciones Unidas para el Ambiente, Organización Meteorológica Mundial.
- Panel Intergubernamental de Expertos para el Cambio Climático (2006). *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Instituto para Estrategias Globales del Ambiente (IGES).
- Paoli, G. D., Wells, P. L., Meijaard, E., Struebig, M. J., Marshall, A. J., Obidzinski, K. (2010). Biodiversity Conservation in the REDD. *Carbon Balance and Management*, 5(1), 1-9.
- Paz, P. F., Sosa, M. I., Medrano, R. E. R., Ibarra, H. F., y Pascual, R. F. (2010). *Elaboración de mapas multi-temporales de bosque, a partir de imágenes Landsat TM y ETM+, y análisis de la degradación forestal y deforestación en Chiapas*. Programa Mexicano del Carbono.
- Pimienta de la Torre, D. J., Domínguez, C. G., Aguirre-Calderón, O., Hernández, F., y Jiménez, P. J. (2007). Estimación de biomasa y contenido de carbono de *Pinus cooperi* blanco en Pueblo Nuevo, Durango. *Madera y Bosques* 13(1), 35-46.
- Pronatura México, A. C., Servicios Ambientales de Oaxaca, A. C. y Comisión Nacional Forestal (2011). *Captura de carbono en comunidades indígenas y campesinas del estado de Oaxaca*. <https://www.climateactionreserve.org/wp-content/uploads/2010/03/>.
- Ramírez-Bautista, A., Hernández-Salinas, U., Mendoza-Quijano, F., Cruz-Elizalde, R., Stephenson, P., Vite-Silva, V. (2010). *Lista anotada de anfibios y reptiles del estado de Hidalgo, México*. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo; Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Reyes, G., Brown, S., Chapman, J. y Lugo, A. (1992). Wood densities of tropical tree species. United States, Department of Agriculture. New Orleans, Louisiana.
- Rodríguez-Laguna, R., Jiménez-Pérez, J., Aguirre-Calderón, Ó. A., Treviño-Garza, E. J., y Razo-Zárate, R. (2009). Estimación de carbono almacenado en el bosque de pino-encino en la Reserva de la Biosfera El Cielo, Tamaulipas, México. *Ra Ximhai*, 5(3), 317-327.
- Sanquetta C., Farinha, W., y Arce, J. (2002). *Ecuaciones de biomasa aérea y subterránea en plantaciones de Pinus taeda en el sur del estado de Paraná, Brasil*. Simposio

- Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales. Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile.
- Scherr, S. J. (2002). *Capturing the Value of Forest Carbon for Local Livelihoods: Presentation to Conference on Payments for Environmental Services in China, Beijing*. Centro para la Investigación Forestal Internacional (CIFOR), Universidad de Maryland.
- Sedjo, R. A. (1990). The Global Carbon Cycle. *Journal of Forestry*, 88(10), 33-34.
- Shoch, D., Eaton, J., y Settelmyer, S. (2013). *Manual de metodologías REDD para desarrolladores de proyectos*. TerraCarbon LLC; Conservation International.
- Špirić, J., y Ramírez, M. I. (2021). Policy Integration for REDD+: Insights from Mexico. *Forests*, 12(8), 1075.
- Sunderlin, W., Larson, A. M., y Cronkleton, P. (2009). Forest Tenure Rights and Redd+: From Inertia to Policy Solutions. En A. Angelsen (ed.). *Realising Redd+: National Strategy and Policy Options*. Cifor.
- Tipper, R. (1998). Update on Carbon Offsets. *Tropical Forest Update*, 8(1), 2-5.
- Tobasura-Morales, D., Gurri, F., Blanco Wells, G., y Schmook, B. (2018). Enredando bosques y comunidades: Territorialización de REDD+ en el ejido Felipe Carrillo Puerto, México. *Cuadernos de Desarrollo Rural*, 15(81), 62-79.
- Torres, J. F., Flores, G. A., Calvo, F., Balam, L., Sepúlveda, V., García, I. E. (2010). Valoración económica de seis áreas naturales protegidas como sumideros de CO₂: Laguna Madre, Marismas Nacionales, Zicuirán-Infernillo, Sierra de Abra Tanchipa, Xilitla y Sierra Madre Oriental. Agencia de Cooperación Técnica Alemana - Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas.
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (2022). *Manejo forestal sustentable con enfoque de paisaje*. Recuperado el 5 de marzo de 2022 de <https://www.mx.undp.org/content/mexico/es/home/projects/manejo-forestal-sustentable-con-enfoque-de-paisaje.html>.
- Valenzuela, H. (2001). *Estimación de secuestro de carbono en bosques naturales de oyamel (Abies religiosa) en el sur del Distrito Federal* [tesis de licenciatura]. Universidad Autónoma Chapingo.

- Velázquez-Rosas, N., Meave, J., y Vázquez-Santana, S. (2002). Elevational Variation of Leaf Traits in Montane Rain Forest Tree Species at La Chinantla, Southern México. *Biotropica*, 34(4), 534-546.
- Villavicencio-Nieto M. A., y Pérez-Escandón, E. B. (2005). *Guía de la flora útil de la Huasteca y la Zona Otomí-Tepehua, Hidalgo*. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
- Wunder, S. (2008). Payments for Environmental Services and the Poor: Concepts and Preliminary Evidence. *Environment and development economics*, 13(3), 279-297.

Anexo 1: Síntesis de las estrategias, sus objetivos y líneas de acción de establecidas en la ENAREDD+ (Comisión Nacional Forestal, 2017)

1. Políticas públicas y marco legal

Objetivo: lograr la transversalidad, coordinación, coherencia y operación integrada de programas y políticas públicas que sean favorables para REDD+, que generen cobeneficios y que sean adaptables a los contextos sociales y ambientales de los diferentes paisajes forestales de las zonas rurales.

- 1) Articular y mejorar las políticas, los instrumentos y las regulaciones vinculadas con la implementación de REDD+.
- 2) Adecuar políticas sectoriales para aprovechar y consolidar espacios de coordinación con enfoque territorial.
- 3) Diseñar y operar los planes, programas y políticas públicas con un enfoque territorial y de largo plazo, de tal modo que se permita hacer un manejo sustentable del territorio.
- 4) Integrar e impulsar una agenda de cambios legales para dar certidumbre a la implementación de la ENAREDD+.

2. Esquemas de financiamiento

Objetivo: diseñar y establecer mecanismos de financiamiento flexibles, diversos, graduales y eficientes, que faciliten la implementación de políticas, programas y acciones encaminadas a REDD+ que respondan a las necesidades de las personas dueñas, poseedoras y habitantes de los paisajes

rurales con actividades forestales. Estos mecanismos también promoverán el mantenimiento en el largo plazo de los beneficios de los bienes y servicios ambientales y socioeconómicos.

- 1) Identificar y gestionar alternativas financieras que incentiven una mayor inversión para el desarrollo de actividades relacionadas con REDD+ en el marco de un desarrollo rural sustentable.
- 2) Promover mecanismos de financiamiento internacional para REDD+.
- 3) Diseñar y/o adecuar instrumentos e incentivos económicos y financieros para administrar recursos de financiamiento para REDD+, incluyendo esquemas de distribución de beneficios.
- 4) Gestionar financiamiento para mejorar las capacidades institucionales, comunitarias y de las personas dueñas, poseedoras y habitantes de terrenos forestales para actividades compatibles con REDD+.
- 5) Promover mecanismos para impulsar mercados que apoyen REDD+.

3. Arreglos institucionales

Objetivo: asegurar mecanismos y espacios institucionales con capacidad suficiente entre las instituciones federales, estatales, municipales y locales para el diseño, la implementación y la coordinación efectiva de políticas públicas, planes y programas favorables para REDD+, según corresponda a la distribución de competencias.

- 1) Fortalecer, promover y generar condiciones de gobernanza local como base de la planeación y operación de las acciones para REDD+.
- 2) Contar con los arreglos institucionales necesarios para el desarrollo de una política pública con enfoque territorial para promover el desarrollo rural sustentable.

4. Monitoreo, reporte y verificación y nivel de referencia

Objetivo: consolidar un sistema robusto y transparente para la medición, monitoreo, reporte y verificación de las absorciones y emisiones de GEI en el sector forestal, que contribuya a dar seguimiento a la efectividad de las políticas de mitigación.

- 1) Medir y monitorear las emisiones y absorciones de GEI asociadas a REDD+.
- 2) Reportar y registrar las emisiones y reducciones de emisiones asociadas a las actividades REDD+.
- 3) Desarrollar y consolidar capacidades para instrumentar y operar el Sistema Nacional de Monitoreo, Reporte y Verificación (MVR).
- 4) Diseñar metodologías, protocolos y estándares para medición y monitoreo de las absorciones y emisiones de GEI a nivel nacional y subnacional, conforme a los acuerdos internacionales.
- 5) Promover instrumentos legales y acuerdos institucionales para instrumentar, operar y mejorar el Sistema Nacional MRV y la mejora continua en la construcción de NR de emisiones y absorciones de carbono del sector forestal.

5. Salvaguardas sociales y ambientales

Objetivo: diseñar e implementar un Sistema de Información de Salvaguardas (SIS) para informar sobre cómo se abordan y respetan las salvaguardas REDD+ en México, conforme a lo establecido en la legislación nacional e internacional aplicable.

- 1) Asegurar el abordaje y respeto a las salvaguardas de REDD+ en el desarrollo e implementación de la ENAREDD+.
- 2) Articular el Sistema Nacional de Salvaguardas (SNS) para REDD+.
- 3) Diseñar y poner en marcha el Sistema de Información de Salvaguardas (SIS).
- 4) Ejecutar las medidas necesarias para la implementación del SNS y el SIS.
- 5) Promover un proceso incluyente de participación y comunicación durante el diseño e implementación del SNS y el SIS para REDD+.
- 6) Fortalecer las capacidades en los diferentes órdenes de gobierno y con los actores relevantes en el tema de salvaguardas.

6. Comunicación y desarrollo de capacidades

Objetivo: fomentar la comunicación, formación y consolidación de capacidades humanas e institucionales con pertinencia culturalmente

adecuada para pueblos y comunidades indígenas y afrodescendientes y de las comunidades locales que propicien la colaboración en el manejo integrado del territorio para lograr los objetivos de REDD+ y el cumplimiento de sus salvaguardas

- 1) Diseñar e implementar una estrategia de comunicación que contribuya al logro de los objetivos de REDD+, fomentando la participación social a través de un proceso amplio de comunicación efectiva y multidireccional.
- 2) Crear y/o fortalecer las capacidades necesarias para el desarrollo rural sustentable, que permitan la participación efectiva, equitativa e incluyente de los grupos específicos, dueños, poseedores y habitantes de terrenos forestales, así como de asesores técnicos, funcionarios e instituciones involucradas en la implementación de la ENAREDD+.

7. Participación social y transparencia

Objetivo: asegurar que las acciones que se realicen para lograr los objetivos de REDD+ se hagan con completa transparencia y asegurando la participación corresponsable de la sociedad civil.

- 1) Fortalecer las plataformas existentes de participación social y apoyar la creación de otras relevantes para la implementación de REDD+.
- 2) Desarrollar esquemas o mecanismos de participación que permitan la intervención activa de las personas dueñas, poseedoras y habitantes de terrenos forestales en formas asociativas y de corresponsabilidad en la planeación y manejo integrado del territorio.
- 3) Promover y garantizar la participación de mujeres, jóvenes, ancianos y otros grupos específicos en los procesos de manejo integrado del territorio.
- 4) Establecer mecanismos de retroalimentación, atención a quejas, rendición de cuentas y acceso a la información que consideren como principios la accesibilidad, eficacia, efectividad y transparencia para las acciones realizadas en el marco de la ENAREDD+.



Aplicación de *machine learning* como aprendizaje automático para enfrentar los retos del cambio climático

Joselito Medina Marín
María Guadalupe Serna Díaz

Introducción

Los cambios en la temperatura y los patrones observados en el clima se han dado a través de los tiempos debido a procesos naturales; sin embargo, en tiempos recientes, estos cambios se han dado principalmente por las actividades humanas a partir de la revolución industrial, al utilizar la quema de combustibles fósiles como fuente principal para el funcionamiento de la maquinaria instalada en fábricas y medios de transporte, entre otros sistemas (Rolnick *et al.*, 2022).

Esto ha generado que el cambio climático sea una realidad en nuestros días, lo que amenaza la subsistencia de diferentes especies y la vida humana en este planeta. Según un reporte generado por la Secretaría del Cambio Climático de las Naciones Unidas (UNCCS, por sus siglas en inglés), entre los peligros que se presentan debido al cambio climático se encuentran sequías, inundaciones, huracanes, tormentas severas, ondas de calor, incendios forestales, heladas y deslizamientos de tierra o derrumbes. (Fawzy *et al.*, 2020)

Se han buscado soluciones desde distintas áreas, como la climatología, la geografía, la geología, la geotecnia, la ingeniería hidráulica, la de transporte y movilidad y la de materiales y la planeación urbana, para buscar mitigar los efectos que son consecuencia del cambio climático. Todas estas disciplinas contribuyen a la comprensión de la relación de las causas y el efecto del cambio climático para buscar alternativas de solución ante este fenómeno que amenaza la subsistencia de la humanidad en este planeta (Moraci *et al.*, 2020).

Una de las áreas que también está siendo considerada en esta búsqueda de soluciones para enfrentar los efectos del cambio climático es el *machine learning*, también conocido como aprendizaje automático o aprendizaje automatizado (Rolnick *et al.*, 2022).

En el presente trabajo se presentan conceptos interesantes acerca del *machine learning* y de cómo se ha utilizado para abordar esta problemática desde diferentes perspectivas, aprovechando que en la actualidad se generan grandes cantidades de datos que son utilizados en la generación modelos de predicción y que pueden servir de soporte en la toma de decisiones para la mitigación y adaptación de los efectos del cambio climático.

Cambio climático

El cambio climático puede definirse como el cambio que se presenta en los patrones que usualmente se observan en el clima, causado principalmente por las emisiones de gases de efecto invernadero. El calor en la tierra es atrapado por la atmósfera terrestre debido a estos gases, generando lo que conocemos como calentamiento global (Fawzy *et al.*, 2020).

Estos cambios se han visto reflejados en la aparición de distintos fenómenos naturales que han afectado la supervivencia de las especies. A continuación se presentan las problemáticas que se han generado en nuestro

planeta a partir del cambio climático, con lo cual podremos dimensionar el impacto negativo que esto acarrea a la subsistencia de las especies.

Problemáticas generadas por el cambio climático

Sequías. El calentamiento global ha provocado que el problema de sequías se intensifique a lo largo del planeta. Estudios recientes (Mukherjee *et al.*, 2018; Pokhrel *et al.*, 2021; Ortega *et al.*, 2018; Campos-Aranda, 2020) muestran el impacto que el cambio climático ha tenido en la presencia de sequías. Su impacto se ha incrementado, así como la duración de los periodos en que se presentan.

Entre los impactos ecológicos, hidrológicos, sociales y económicos consecuencia de ello se pueden mencionar el incremento del riesgo de los incendios forestales, la escasez del agua, la pérdida de los cultivos y reducción en las cabezas de ganado para la producción de alimentos tanto de origen vegetal como de origen animal (Mukherjee *et al.*, 2018).

El almacenamiento de agua terrestre controla el ciclo del agua y es un factor determinante para la disponibilidad de agua y la presencia de sequías. En Pokhrel *et al.* (2021) se presenta un estudio basado en simulación para mostrar cómo el cambio climático podría reducir los almacenamientos de agua en la tierra en muchas regiones, sobre todo en la parte sur del planeta. La reducción del almacenamiento de agua terrestre se traduce en el incremento de sequías futuras. De ahí la importancia de la mitigación del cambio climático para evitar los impactos negativos en las reservas de agua necesarias para la subsistencia de las especies y de la humanidad.

A nivel nacional, en Ortega *et al.* (2018) se presenta una metodología que permite determinar los municipios que presentan peligro, vulnerabilidad y riesgo provocado por las sequías producidas por los efectos de cambio climático. Esta metodología considera los impactos de las sequías no solamente desde el punto de vista ambiental, sino también en cuanto cuestiones económicas y sociales.

Debido al impacto de las sequías en tiempos recientes y al aumento en la demanda del agua en distintas actividades económicas, se ha intensificado también el estudio de este fenómeno. En Campos-Aranda (2020) se utilizó el Índice de Precipitación-Evapotranspiración Estandarizada (SPEI, por sus

siglas en inglés) para analizar registros históricos de sequías presentadas en regiones del estado de Zacatecas. En el estudio se identifican las sequías leves, moderadas, severas y extremas. Se analizan tres escenarios derivados de los efectos del cambio climático. En el primero se considera una reducción progresiva y lineal del 20% de la precipitación pluvial en el estado; en el segundo se considera un aumento progresivo y lineal de la temperatura a 4°C; en el tercer escenario se analiza una combinación de los dos anteriores. Como resultados de este estudio, en los tres escenarios se observó un ligero incremento en las sequías leves y extremas, mientras que en las catalogadas como sequías moderadas y severas se ve una pequeña disminución.

Inundaciones. Este problema es uno de los peligros generados por el cambio climático y uno de los más costosos. Además, ha sido el causante de miles de muertes y ha afectado la vida de millones de personas. Las zonas que más se han visto afectadas por las inundaciones se encuentran en regiones tropicales y subtropicales. Los países más propensos a inundaciones están ubicados en la zona sur y sureste de Asia, así como en Sudamérica y África (Eccles *et al.*, 2019).

La forma en que las comunidades se enfrentan a esta problemática causada por el cambio climático depende de la cultura de cada población. Aprenden de los eventos que se hayan suscitado en las comunidades para contar con un plan de respuesta y adaptación ante la ocurrencia de inundaciones. A partir de un estudio realizado en poblaciones que han sufrido de este fenómeno, se encontró que los habitantes de estas comunidades tienen la percepción de que el riesgo de futuras inundaciones está relacionado con el impacto del cambio climático (Albright *et al.*, 2019).

En México también se han presentado problemas debido a las inundaciones. En Castro-Castro (2018) se presenta un estudio donde se identifica a Chiapas como un estado con una alta vulnerabilidad ante la presencia de huracanes intensos, eventos de oleaje extremo e incremento del nivel medio del mar. El análisis se realiza para el municipio de Tapachula, Chiapas, con base en la proyección de incremento de la temperatura y cambio en el nivel medio del mar, y determina que este municipio presenta un riesgo costero muy alto, por lo que se sugiere hacer una planeación

basada en el conocimiento para salvaguardar la seguridad personal de los habitantes y los visitantes a estas playas.

Huracanes. Los huracanes se han intensificado en los últimos años y algunos estudios muestran que este incremento se debe al cambio climático (Mann y Emanuel, 2006; Holland y Bruyère, 2014; Walsh *et al.*, 2016). Según algunos estudios estadísticos, son factores antropogénicos probablemente los responsables de la intensidad de ciclones en la zona del Atlántico (Mann y Emanuel, 2006).

En Holland y Bruyère (2014) se propone el uso de un Índice de Cambio Climático Antropogénico para determinar si la actividad actual de los ciclones está relacionada con el cambio climático. Con este índice se encontró que gran parte del calentamiento debido a actividades humanas se ha dado en las últimas cuatro décadas. Con estos resultados, se encontró que los huracanes de categoría 4 o 5 se han incrementado a razón de 25 a 30% por cada grado centígrado en que aumenta el calentamiento en el planeta. Estos resultados sugieren que tras el aumento inicial de la intensidad de los huracanes se llegará a un momento de saturación a partir del cual el incremento de la intensidad se irá reduciendo.

El incremento del nivel del mar probablemente ha producido un incremento de tormentas y de ciclones. El aumento del nivel del agua en los mares es una consecuencia del deshielo de los polos debido al calentamiento global. En la actualidad se han desarrollado diversos modelos climáticos para predecir el número y la intensidad de los ciclones tropicales (Walsh *et al.*, 2016).

En el caso de México, la amenaza por la presencia de ciclones y huracanes es constante. El incremento de estos eventos meteorológicos debido al cambio climático también ha causado estragos en la población mexicana que vive en las costas del país. En Appendini *et al.* (2019) se presenta una evaluación acerca del futuro en el clima en la península de Yucatán, la cual tiene la tasa más alta de presencia de huracanes, así como el mayor crecimiento poblacional en destinos turísticos de México. El estudio está basado en modelos atmosféricos para los cuales se corrieron diferentes escenarios y se observó que la península de Yucatán será más susceptible

a la presencia de huracanes cada vez más intensos y más frecuentes. En el artículo se sugiere el desarrollo de estrategias de planeación con base en la caracterización de los ciclones para poder hacer frente a los desastres naturales generados por estos eventos.

Tormentas severas. Los fenómenos asociados a las tormentas severas, tales como granizo de 2 cm o más, vientos fuertes mayores a 90 kilómetros por hora y tornados, entre otros, se han hecho presentes en los últimos años (Allen, 2018). Las tormentas provenientes de ciclones con muchos días de duración han venido en aumento y el incremento de la población en zonas amenazadas por estos fenómenos la hace vulnerable a desastres de grandes magnitudes (Dasgupta *et al.*, 2009).

Las tormentas severas también han afectado a los Países Bajos y al noroeste de Europa. Un escenario analizado en Dorland *et al.* (1999) indica que la intensidad de las tormentas en estos países podría incrementarse de un 1 a un 9% debido principalmente a las altas concentraciones de CO₂ en el ambiente.

En Pugatch (2019) se llevó a cabo un estudio en México para cuantificar el impacto de la frecuencia y severidad de las tormentas tropicales en los decesos ocurridos por estos fenómenos. En los escenarios analizados, se obtuvo que el incremento de las muertes causadas por lluvias podría incrementarse hasta en un 52% o reducirse hasta en un 10%, dependiendo de los valores introducidos en los modelos.

Ondas de calor. Estudios previos han atribuido al cambio climático la presencia de las ondas de calor su impacto en la salud humana. En Mitchell *et al.* (2016) se realizó un estudio cuantitativo del impacto de las actividades humanas en el cambio climático y la mortalidad relacionada con las ondas de calor a partir de la información recopilada de los decesos ocurridos en Londres y París derivados de la presencia de ondas de calor en 2003.

En Lhotka *et al.* (2018) se analizan distintos escenarios del cambio climático orientados a las ondas de calor en Europa central, mediante la ejecución de simulación a partir de modelos climáticos regionales y utilizando datos históricos. En los resultados se proyecta que de 2020 a 2049 se duplicará la

frecuencia de las ondas de calor en comparación con los datos históricos utilizados. Además de la frecuencia, se estima que la severidad de las ondas de calor también aumentará. Las ondas de calor severas se convertirán en un fenómeno normal en un futuro dentro de nuestro planeta debido a la distribución del calor a lo largo del globo terráqueo.

En México también se han hecho presentes las ondas de calor. En Martínez-Austria *et al.* (2016) se estudian los cambios de temperatura y las ondas de calor observados en la zona noroeste de México. Se analizaron los datos históricos de dos zonas vulnerables: la ciudad de Mexicali, Baja California, y la cuenca del río Yaqui, en el estado de Sonora. Los resultados muestran una tendencia en el incremento de la temperatura, así como el incremento de ocurrencias de ondas de calor; se proponen estrategias para afrontar este fenómeno en las zonas estudiadas.

Incendios forestales. Como consecuencia de las ondas de calor y del incremento de la temperatura, ocurren incendios forestales. Se han dado muchos casos de este fenómeno, como el ocurrido en el sureste de Australia entre junio de 2019 a mayo de 2020; además de por su intensidad, dadas la duración que tuvo (no fue posible apagarlo de forma rápida) y la extensión de terreno afectada, fue tipificado como un evento sin precedentes (Abram *et al.*, 2021).

También han ocurrido incendios forestales intensos y con varios días de duración en el noroeste de Estados Unidos (Halofky *et al.*, 2020). La ocurrencia reiterada de estos incendios, junto con los aumentos de temperaturas y sequías, impacta negativamente en la regeneración de las especies que son afectadas.

En México también se ha estudiado el impacto de los incendios forestales. En Briones-Herrera *et al.* (2019) se llevó a cabo un estudio de la presencia de incendios en el territorio nacional a partir de imágenes satelitales de la densidad de la biomasa. En el estudio se encontraron correlaciones entre la densidad de carbono del suelo y la ocurrencia de incendios, lo cual puede ser aprovechado para plantear estrategias de mitigación en la ocurrencia de estos fenómenos.

Documentos (Kyoto y París)

Ante este panorama en el incremento del impacto ambiental debido al cambio climático, la Organización de las Naciones Unidas ha planteado diferentes instrumentos jurídicos, como el Protocolo de Kyoto y el Acuerdo de París, con los cuales se busca desarrollar estrategias para combatir el cambio climático y llevar a cabo acciones que permitan reducir las emisiones de carbono y, en consecuencia, el impacto negativo de la contaminación a nivel mundial (Leggett, 2020).

Con el avance de la ciencia y la tecnología se pueden aplicar diversas herramientas para contribuir con el logro de los objetivos planteados en estos acuerdos. Y una alternativa es la aplicación de herramientas de *machine learning* (ML) para afrontar al cambio climático.

Machine learning

Los retos y desafíos que se presentan para mitigar los efectos del calentamiento global han sido abordados desde diferentes perspectivas de ML, también conocido como aprendizaje automático o aprendizaje automatizado.

El ML forma parte de la inteligencia artificial (IA) que provee algoritmos para que las computadoras “aprendan”. Con este aprendizaje se pueden identificar patrones presentes en conjuntos de datos y con ellos generar modelos para predecir o pronosticar comportamientos futuros, tomando en cuenta datos de situaciones actuales, e incluso con datos hipotéticos, y conocer el resultado de esta combinación de valores.

Los modelos de ML pueden ser modelos supervisados, los cuales cuentan con un aprendizaje previo que les permite hacer predicciones. Existen también los modelos no supervisados, que no cuentan con conocimiento previo pero son capaces de encontrar patrones en datos no organizados.

Hay cuatro etapas principales en el desarrollo de un modelo de ML. Primero se deben seleccionar y preparar los datos de entrenamiento. Posteriormente, se procede a seleccionar un algoritmo de entrenamiento. En la tercera etapa se lleva a cabo el entrenamiento del algoritmo. Finalmente, en la cuarta etapa se hace uso del modelo y, en su caso, se hacen los ajustes necesarios para la mejora del modelo.

Las aplicaciones de los modelos de ML son numerosas. Entre ellas podemos mencionar recomendaciones a usuarios de plataformas *online*, desarrollo de vehículos inteligentes, análisis de comportamiento de los usuarios de redes sociales, desarrollo de asistentes virtuales mediante el procesamiento de lenguaje natural, motores de búsqueda para los navegadores de internet, detección temprana de enfermedades, ciberseguridad, etcétera.

Los algoritmos de ML pueden categorizarse de acuerdo a su área de aplicación, ya sea que su aplicación sea para clasificación, agrupamiento, regresión, reducción de dimensionalidad, selección de modelos o preprocesamiento.

Algoritmos para clasificación

El objetivo de estos algoritmos es identificar a qué categoría pertenece un determinado objeto de estudio. Estos pueden ser utilizados para detección de *spam* en los correos electrónicos o para reconocimiento de imágenes (como el *rover* enviado a Marte para identificar muestras que sean factibles de analizar físicamente). Entre los algoritmos de clasificación se encuentran los siguientes:

Support Vector Machine. Son métodos de aprendizaje supervisado utilizados para llevar a cabo la clasificación binaria y de múltiples clases en conjuntos de datos. Este algoritmo es muy eficaz en espacios de altas dimensiones e incluso en situaciones donde la cantidad de dimensiones sobrepasa al número de muestras utilizadas en el entrenamiento. Por su dinámica, ofrece un manejo eficiente de la memoria ya que los vectores de soporte funcionan como un subconjunto de puntos de entrenamiento para la función objetivo (Huang *et al.*, 2018).

Vecino más cercano. Este algoritmo utiliza un aprendizaje basado en instancias o aprendizaje no generalizado, es decir, no se busca construir un modelo generalizado, sino que solamente almacena las instancias contenidas del conjunto de datos para entrenamiento. La clasificación se calcula por mayoría de votos de los vecinos más cercanos en cada punto, asignando a cada punto la clase que le corresponda dependiendo los votos que emitan sus vecinos.

Redes neuronales. Es un algoritmo de aprendizaje supervisado que lleva a cabo el ajuste de una función utilizando un conjunto de datos de entrenamiento y la salida esperada. Consiste en un grupo de neuronas divididas en la capa de entrada, la capa o capas ocultas y la capa de salida. La capa de entrada contiene las características o valores de entrada al modelo; las capas ocultas contienen los valores que resultan del entrenamiento de la red neuronal; la capa de salida contiene el o los datos que arroja como resultado la red. Las ventajas de las redes neuronales es que tienen la capacidad de aprender el comportamiento de modelos no lineales, además de aprender comportamientos de modelos en tiempo real.

Random Forest. En este algoritmo, los árboles se generan a partir de una muestra de datos utilizados para entrenamiento. Cuando se dividen los nodos en la construcción de los árboles, la mejor división se obtiene de las características de entrada o de valores generados aleatoriamente. La aleatoriedad agregada a los árboles de decisión ofrece predicciones con errores reducidos.

Algoritmos para regresión

Estos algoritmos son utilizados para llevar a cabo la predicción o pronóstico de un cúmulo de valores o atributos asociados a un objeto determinado. Entre las aplicaciones que tienen estos algoritmos se encuentran el pronóstico de la respuesta de un medicamento y el comportamiento de los precios de productos.

Support Vector Regression. Este algoritmo es similar al de Support Vector Machine utilizado para clasificación. En el caso del Support Vector Regression, el modelo depende solamente de un grupo de datos de entrenamiento y la función costo no considera los datos cuya predicción es cercana al objetivo. Además, este algoritmo de ajuste toma como entrada un vector de datos conocidos y los resultados esperados para cada tupla del conjunto de datos.

Algoritmo del vecino más cercano para regresión. Este algoritmo puede ser utilizado cuando los datos que se tienen son variables continuas en lugar de variables discretas. El valor asignado a cada punto se calcula a partir del promedio de los valores de sus vecinos más cercanos.

Random Forest para regresión. El algoritmo de Random Forest utilizado en clasificación de objetos también puede ser utilizado en el pronóstico de valores. Este algoritmo utiliza modelos aditivos para llevar a cabo la predicción de valores mediante el uso de datos de entrada.

Algoritmos para *clustering* o agrupamiento

Los algoritmos de *clustering* llevan a cabo un agrupamiento de objetos similares que presentan características definidas. Este agrupamiento genera conjuntos de objetos que permiten identificar su pertenencia a sectores de poblaciones.

K-means. Este algoritmo agrupa valores separándolas en grupos con varianza similar y minimizando el criterio de inercia. Se debe definir la cantidad de grupos en los que serán separados los valores para que el algoritmo comience a hacer la distribución de valores. El algoritmo ha presentado buenos resultados con conjuntos de datos grandes y son muchas las áreas en las que se ha aplicado. Para cada agrupación se calcula el promedio de los valores; a este promedio se le conoce como centroide y es utilizado para minimizar la inercia.

Agrupamiento espectral. Este algoritmo lleva a cabo una integración de baja dimensión de la afinidad entre las muestras de entrenamiento; posteriormente se realiza una agrupación de estos valores mediante K-means u otro algoritmo de agrupamiento. Si los datos se encuentran dispersos en el espacio de análisis, el algoritmo es computacionalmente eficiente.

Mean Shift. El objetivo de este algoritmo es encontrar formas irregulares dentro de los conjuntos de datos. Es un algoritmo basado en centroides, los cuales se van actualizando a partir del promedio de los puntos que se encuentran dentro de una región determinada. Los centroides obtenidos se filtran para eliminar aquellos que se encuentren cerca de otros centroides, a fin de obtener un solo conjunto de estos elementos.

Algoritmos para reducción de dimensionalidad

La reducción de dimensionalidad se ha utilizado para reducir la cantidad de variables aleatorias a considerar en la modelación. Se ha aplicado en problemas de visualización de imágenes, para el incremento de la eficiencia de un proceso, etcétera.

Análisis de Componentes Principales (PCA). El PCA es utilizado para descomponer un conjunto multivariado en un conjunto de componentes ortogonales sucesivos. Este algoritmo es implementado como un objeto “transformador” que aprende del comportamiento de otros componentes en su método de ajuste y puede ser utilizado para pronosticar el comportamiento de componentes nuevos.

Selección de características. Este algoritmo presenta un enfoque sencillo para la selección de características. Elimina aquellas características que presentan una varianza fuera de un umbral establecido en la selección.

Factorización de matrices no-negativas. Presenta un enfoque alternativo para llevar a cabo la separación de componentes, en el cual se considera que los valores de las matrices de datos contienen solamente valores positivos o cero. Se genera la descomposición de valores en dos matrices con valores no negativos, optimizando la distancia de estos valores y el resultado del producto matricial de las matrices obtenidas.

Algoritmos para selección de modelos

Estos algoritmos son utilizados para comparar, validar y escoger los parámetros considerados en el desarrollo de modelos que representen el comportamiento de un sistema. Han sido utilizados para mejorar la precisión de un modelo a mediante de la sintonización y el ajuste de sus parámetros.

Grid Search. Es utilizado para encontrar los parámetros óptimos que debe contener un modelo, con la finalidad de ofrecer una mayor precisión en el pronóstico de valores. Genera de forma exhaustiva posibles soluciones para los parámetros dentro de una malla de valores, realizando posteriormente la búsqueda en todo el espacio obtenido de las combinaciones.

Validación cruzada. Este algoritmo realiza la prueba y el entrenamiento de un modelo en varias iteraciones, utilizando subconjuntos de valores durante este proceso. Con este proceso de validación se garantiza que el modelo de ML pueda generar predicciones con cierta precisión en datos no utilizados en el entrenamiento.

Métricas. Con las métricas y puntuaciones se puede cuantificar la precisión y la calidad de las proyecciones que se obtengan de un modelo. Se pueden utilizar, por ejemplo, metodologías de estimación de puntuaciones, parámetros de calificaciones y funciones de métricas.

Algoritmos para preprocesamiento

Estos algoritmos realizan un proceso para convertir vectores de características en formatos que puedan ser más apropiados para ser utilizados en la generación de modelos. Es un paso previo que permite que los algoritmos que se apliquen tengan mejor rendimiento y eficiencia. Por lo regular, los algoritmos de aprendizaje requieren de conjuntos estructurados de datos, pero se tienen conjuntos de datos que no se encuentran almacenados de forma estándar y necesitan un preprocesamiento para dejarlos listos y que puedan ser utilizados por los algoritmos de ML.

Aplicaciones de *machine learning*

El combate al cambio climático se observa desde dos perspectivas: por un lado, se tiene la mitigación, consistente en reducir la emisión de contaminantes, y por el otro se tiene la adaptación, que consiste en presentar estrategias de preparación para la población a fin de afrontar las consecuencias inevitables generadas por los fenómenos producidos por el cambio climático.

Mitigación

Una de las fuentes principales de emisiones contaminantes son los sistemas eléctricos. Para reducir las emisiones de estos sistemas se deben utilizar fuentes de energías más limpias, como solar, eólica, hidráulica y nuclear. Mediante la aplicación de los algoritmos de ML es posible mitigar el impacto negativo de los sistemas eléctricos en el ambiente. El ML puede hacer aportes

al desarrollo de tecnologías para el diseño de sistemas eléctricos basados en energías limpias. También puede aprovecharse para generar pronósticos más precisos de la demanda de energía eléctrica y evitar tanto la sobreproducción como la contaminación que esta genera. Además, es factible su uso para llevar a cabo la administración y optimización de los sistemas eléctricos.

Otra de las fuentes contaminación importantes es el sistema de transporte. Este sistema incluye el traslado por carretera, vías ferroviarias, agua y aire, y en cada uno de ellos se hace una emisión considerable de CO_2 . Las estrategias que se han considerado para reducir el impacto en el ambiente del sistema de transporte incluyen la reducción de esta actividad, mejorar la eficiencia de los vehículos, buscar fuentes alternativas de combustible o usar vehículos eléctricos. Mediante el ML se pueden optimizar los diseños de los vehículos para reducir el consumo de combustible. Además, para la producción y traslado de vehículos se pueden optimizar los planes de producción, haciendo pronósticos sobre la demanda y producir solo lo necesario.

El consumo de energía que se da en los edificios y en las ciudades también es otro foco de atención en cuanto al impacto negativo en el medio ambiente. Actualmente es posible construir edificios con bajo consumo de energía, lo que genera bajos costos y aire limpio. Los edificios varían de acuerdo a su edad, construcción, uso y propietarios, y las estrategias para optimizar la energía varían según el contexto. La planeación urbana y las políticas públicas juegan un papel importante en la reducción de emisiones mediante la oferta de infraestructuras, incentivos económicos y estándares energéticos en la construcción de edificios. Con el ML se pueden ofrecer herramientas para optimizar el consumo de energía en edificios y ciudades, así como la instauración de controles inteligentes para hacer uso solo de la energía necesaria.

Dentro de la industria, las líneas de producción, la logística y la fabricación de materiales son las principales causas que generan emisiones contaminantes. Las compañías que se dedican a ello recopilan grandes cantidades de información de sus productos y sistemas de distribución, lo cual puede ser aprovechado por la ML para identificar patrones que nos permitan pronosticar el comportamiento de los sistemas y optimizar las líneas de producción a partir de la demanda de los clientes, así como de rutas de distribución, para así reducir la generación de gases contaminantes.

Adaptación

Para poder llevar a cabo estrategias de adaptación al clima se debe contar con herramientas que permitan predecir las condiciones climáticas en nuestro entorno. Se han utilizado herramientas de pronóstico de clima como los modelos de circulación general (GMCs) (Scher, 2018) o los modelos de sistemas terrestres (Meehl, 2020). Estos modelos predictivos permiten a los gobiernos tomar decisiones, y a las personas calcular los riesgos del clima.

En las tendencias actuales se han adoptado modelos de ML para el pronóstico del clima. Los avances en ciencia y tecnología han incrementado las posibilidades del ML en la predicción del clima. Se cuenta con nuevos satélites económicos que recolectan grandes cantidades de datos del clima alrededor del planeta. Se están desarrollando proyectos masivos de modelación del clima, con los cuales se generan petabytes de datos climáticos. La ejecución de los modelos para el pronóstico del clima es computacionalmente cara, pero los métodos de ML son rápidos de entrenar y ejecutar y obtendrían resultados en menor tiempo.

Los científicos dedicados a realizar modelos de pronósticos para el clima se han interesado en la aplicación de modelos de ML para llevar a cabo sus proyecciones climáticas.

Con la recopilación de grandes cantidades de información satelital se pueden ejecutar algoritmos de ML para clasificar o agrupar los datos observados, analizar las imágenes para identificar fuentes de contaminación o clasificar la superficie terrestre identificando zonas de cultivo y urbanas así como la afectación que han tenido las zonas boscosas en los últimos años. De esta manera es posible plantear estrategias de adaptación de las poblaciones que estén siendo afectadas con estos cambios ambientales en el entorno donde se encuentran ubicadas.

Muchos problemas relacionados con la predicción del clima dependen de los datos históricos recolectados por medio de sensores, satélites o estaciones meteorológicas, y cada año se suman los datos recopilados durante ese lapso. Además, los modelos utilizados están basados en sistemas de ecuaciones diferenciales que utilizan leyes de la termodinámica para reproducir el comportamiento atmosférico, y la reproducción de un modelo físico requiere de mucho poder de cómputo. Sin embargo, el ML ofrece herramientas para

resolver estos sistemas eficientemente, tales como redes neuronales que aprenden el comportamiento del clima y las leyes de la termodinámica, y sirven como soporte en la simulación del comportamiento atmosférico, con un menor coste computacional.

Por otro lado, los algoritmos de ML pueden utilizarse para identificar correlaciones entre las variables consideradas para la modelación del clima. El uso de modelos para el reconocimiento de patrones, así como los algoritmos para la extracción de características, nos permiten encontrar relaciones dentro de los datos recopilados de los fenómenos climáticos. Además, los modelos de regresión, como las redes neuronales, posibilitan la modelación de relaciones no lineales entre las variables en estudio.

La predicción de la ocurrencia de eventos climáticos extremos permite que la población se prepare ante la presencia de un fenómeno meteorológico con consecuencias devastadoras. En este sentido, se ha utilizado el algoritmo de *random forest* para predecir de forma más precisa la aparición de tormentas con granizo.

El cambio climático también genera múltiples impactos sociales y mediante la aplicación de los algoritmos de ML se podría contar con información que permita tomar decisiones apropiadas para la sociedad en ese sentido.

Los ecosistemas han sido afectados por el cambio climático, incluyendo la biodiversidad, la agricultura y los recursos naturales. El cambio de los ecosistemas puede ser monitoreado mediante el análisis de imágenes satelitales con los algoritmos de ML para clasificar las zonas que han sido afectadas, y con la extracción de las características de los ecosistemas es posible predecir la rapidez con la que se está generando este cambio.

La infraestructura física de los espacios donde vivimos, trabajamos o adonde acudimos, así como las carreteras por donde transitamos o los sistemas de distribución del servicio eléctrico, telefónico, etcétera, debe ser replanteada para afrontar los efectos del cambio climático: altas temperaturas, corrientes de aire, tormentas severas, etcétera. Con los modelos predictivos de ML se puede estimar la severidad de los fenómenos meteorológicos, con lo cual se pueden establecer los parámetros de construcción que sean robustos y que soporten la fuerza con que se presenten estos fenómenos.

Entre los sistemas sociales se encuentra el sistema alimentario, el cual está siendo afectado por el cambio climático desde distintos frentes. La producción agrícola ha ido disminuyendo debido a la sequía y otros factores; esto influye directamente en la seguridad alimentaria. Además, los miembros de las comunidades que dependen de la producción agrícola y ganadera, al verse afectadas por la baja producción, comienzan a emigrar hacia las ciudades, provocando la desatención a los campos de cultivo y aumentando los requerimientos de servicios y agentes contaminantes en las grandes ciudades (Rolnick *et al.*, 2022).

El cambio climático tiene también afectaciones en el sistema de salud. Al contar con información sobre la frecuencia de personas afectadas por las ondas de calor, se pueden aplicar los algoritmos de ML para establecer estrategias y programas de prevención ante la ocurrencia de estos fenómenos e identificar la intensidad con la que estarían haciéndose presentes.

En estudios epidemiológicos, el ML ha jugado un papel importante, ya que se han obtenido tendencias de pandemias, como el caso de la Covid-19 (Rolnick *et al.*, 2022), y con estas estimaciones se generan los planes estratégicos para mitigar el impacto de estas enfermedades en la población.

Por otro lado, ante el hecho inminente de un desastre natural, mediante análisis de imágenes aéreas se pueden generar mapas de enrutamiento para desalojar a la población o trasladar víveres y medicinas a las zonas afectadas por el impacto.

Conclusiones

El cambio climático es una realidad que se encuentra presente en nuestro hogar llamado Tierra, y es debido principalmente a las actividades humanas que producen CO₂. Entre estas se cuentan la generación de energía eléctrica por la quema de combustibles fósiles, la contaminación producida por los sistemas de transporte y el consumo energético en la construcción (uso y mantenimiento de las construcciones que utilizamos para vivir, trabajar o distraernos).

La presencia de sequías y ondas de calor, el aumento en la frecuencia de huracanes e incendios forestales, entre otros fenómenos, son las

consecuencias tangibles del cambio climático y afectan directamente los ecosistemas, la biodiversidad y los sistemas alimentarios y de salud.

Ante este escenario es importante tomar acciones inmediatas que ayuden a mitigar o adaptarse a estos cambios que se están presentando en nuestro entorno, como se propone en el Protocolo de Kyoto y en el Acuerdo de París. Una de las alternativas para combatir el cambio climático es el uso de los algoritmos de ML, que han demostrado eficacia en la generación de modelos para estimar tendencias, clasificar fenómenos o agrupar eventos con características similares, y poder hacer uso de esta información para hacer frente a las situaciones que se presentan como consecuencia del impacto ambiental generado por sistemas como el de transporte, el productivo, la generación de electricidad, etc.

Sin embargo, la aplicación de estas herramientas no solucionará completamente este problema que aqueja a todo el mundo. Es de suma importancia que como población nos concienticemos y realicemos acciones que permitan reducir la emisión de gases de efecto invernadero, causada por un comportamiento consumista y de *confort* que ha provocado un consumo innecesario de recursos naturales para satisfacer el estilo de vida que hemos adoptado como humanidad.

Referencias

- Abram, N. J., Henley, B. J., Sen Gupta, A., Lippmann, T. J., Clarke, H., Dowdy, A. J., Sharples, J. J., Nolan, R. H., Zhang, T., Wooster, M. J., Wurtzel, J. B., Meissner, K. J. Pitman, A. J., Ukkola, A. M., Murphy, B. P., Tapper, N. J., y Boer, M. M. (2021). Connections of Climate Change and Variability to Large and Extreme Forest Fires in Southeast Australia. *Communications Earth & Environment*, 2(1), 1-17.
- Albright, E. A., y Crow, D. (2019). Beliefs about Climate Change in the Aftermath of Extreme Flooding. *Climatic Change*, 155(1), 1-17.
- Allen, J. T. (2018). Climate Change and Severe Thunderstorms. *Oxford Research Encyclopedia of Climate Science*.
- Appendini, C. M., Meza-Padilla, R., Abud-Russell, S., Proust, S., Barrios, R. E., y Secaira-Fajardo, F. (2019). Effect of Climate Change over

- Landfalling Hurricanes at the Yucatan Peninsula. *Climatic Change*, 157(3), 469-482.
- Briones-Herrera, C. I., Vega-Nieva, D. J., Monjarás-Vega, N. A., Flores-Medina, F., Lopez-Serrano, P. M., Corral-Rivas, Carrillo-Parra, A., Pulgarin-Gámiz, M. A., Alvarado-Celestino, E., González-Cabán, A., Arellano-Pérez, S., Álvarez-González, J. G., Ruiz-González, A. D., y Jolly, W.M. (2019). Modeling and Mapping Forest Fire Occurrence from Aboveground Carbon Density in Mexico. *Forests*, 10(5), 402.
- Campos-Aranda, D. F. (2018). Cuantificación con el SPEI de sequías históricas y bajo cambio climático probable en la estación climatológica Zacatecas, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 9(2), 210-233.
- Castro-Castro, V. (2018) Análisis preliminar de riesgo por cambio climático en la costa del municipio de Tapachula, Chiapas, México. *Espacio I+D: Innovación más Desarrollo*, 7(18), 92-116. DOI: <http://doi.org/10.31644/IMASD.7.2018.a05>.
- Dasgupta, S., Laplante, B., Murray, S., y Wheeler, D. (2009). Climate Change and the Future Impacts of Storm-surge Disasters in Developing Countries. *Center for Global Development Working Paper*, (182), 1-27.
- Dorland, C., Tol, R. S., y Palutikof, J. P. (1999). Vulnerability of the Netherlands and Northwest Europe to Storm Damage under Climate Change. *Climatic Change*, 43(3), 513-535.
- Eccles, R., Zhang, H., y Hamilton, D. (2019). A Review of the Effects of Climate Change on Riverine Flooding in Subtropical and Tropical Regions. *Journal of Water and Climate Change*, 10(4), 687-707.
- Fawzy, S., Osman, A. I., Doran, J., y Rooney, D. W. (2020). Strategies for Mitigation of Climate Change: A Review. *Environmental Chemistry Letters*, 18(6), 2069-2094.
- Halofsky, J. E., Peterson, D. L., y Harvey, B. J. (2020). Changing Wildfire, Changing Forests: The Effects of Climate Change on Fire Regimes and Vegetation in the Pacific Northwest, USA. *Fire Ecology*, 16(1), 1-26.
- Holland, G., y Bruyère, C. L. (2014). Recent Intense Hurricane Response to Global Climate Change. *Climate Dynamics*, 42(3), 617-627.

- Huang, S., Cai, N., Pacheco, P. P., Narrandes, S., Wang, Y., y Xu, W. (2018). Applications of Dupport Vector Machine (SVM) Learning in Cancer Genomics. *Cancer Genomics & Proteomics*, 15(1), 41-51.
- Leggett, J. A. (2020). The United Nations Framework Convention on Climate Change, the Kyoto Protocol, and the Paris Agreement: A Summary. *Congressional Research Service*, 1(1), 1-11
- Lhotka, O., Kyselý, J., y Farda, A. (2018). Climate Change Scenarios of Heat Waves in Central Europe and Their Uncertainties. *Theoretical and Applied Climatology*, 131(3), 1043-1054.
- Mann, M. E., y Emanuel, K. A. (2006). Atlantic Hurricane Trends Linked to Climate Change. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 87(24), 233-241.
- Martinez-Austria, P. F., Bandala, E. R., y Patiño-Gómez, C. (2016). Temperature and Heat Wave Trends in Northwest Mexico. *Physics and Chemistry of the Earth, A/B/C*(91), 20-26.
- Mitchell, D., Heaviside, C., Vardoulakis, S., Huntingford, C., Masato, G., Guillod, B. P., Frumhoff, P., Bowery, A., Wallom, D., y Allen, M. (2016). Attributing Human Mortality During Extreme Heat Waves to Anthropogenic Climate Change. *Environmental Research Letters*, 11(7), 074006.
- Moraci, F., Errigo, M. F., Fazia, C., Campisi, T., y Castelli, F. (2020). Cities under Pressure: Strategies and Tools to Face Climate Change and Pandemic. *Sustainability*, 12(18), 7743.
- Mukherjee, S., Mishra, A., y Trenberth, K. E. (2018). Climate Change and Drought: A Perspective on Drought Indices. *Current Climate Change Reports*, 4(2), 145-163.
- Ortega Gaucin, D., Cruz Bartolón, J. D. L., y Castellano Bahena, H. (2018). *Peligro, vulnerabilidad y riesgo por sequía en el contexto del cambio climático en México*. <http://repositorio.imta.mx/handle/20.500.12013/2192>.
- Pokhrel, Y., Felfelani, F., Satoh, Y., Boulange, J., Burek, P., Gädeke, A., Gerten, D., Gosling, S.N., Grillakis, M., Gudmundsson, L., Hanasaki, N., Kim, H., Koutroulis, A., Liu, J., Papadimitriou, L., Schewe, J., Schmied, H. M., Stacke, T., Telteu, C.E., ... Wada, Y. (2021). Global

- Terrestrial Water Storage and Drought Severity under Climate Change. *Nature Climate Change*, 11(3), 226-233.
- Pugatch, T. (2019). Tropical Storms and Mortality under Climate Change. *World Development*, 117, 172-182.
- Rolnick, D., Donti, P. L., Kaack, L. H., Kochanski, K., Lacoste, A., Sankaran, K., Ross, A. S., Milojevic-Dupont, N., Jaques, N., Waldman-Brown, A., Luccioni, A., Maharaj, T., Sherwin, E. D., Mukkavilli, S. K., Ording, K. P., Gomes, C., Ng, A. Y., Hassabis, D., Platt, J. C., ... Bengio, Y. (2022). Tackling Climate Change with Machine Learning. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 55(2), 1-96.
- Scher, S. (2018). Toward Data- driven Weather and Climate Forecasting: Approximating a Simple General Circulation Model with Deep Learning. *Geophysical Research Letters*, 45(22), 12,616-12,622.
- Walsh, K. J., McBride, J. L., Klotzbach, P. J., Balachandran, S., Camargo, S. J., Holland, G., y Sugi, M. (2016). Tropical Cyclones and Climate Change. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 7(1), 65-89.



Situación actual y perspectivas de las emisiones de metano entérico en la producción ganadera

Juan Carlos Ángeles Hernández

Introducción

Los sistemas agropecuarios a nivel mundial se enfrentan al aumento de la demanda de productos alimenticios, la cual es impulsada por el crecimiento acelerado de la población y la modificación de los patrones de consumo (Thornton *et al.*, 2007). La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) (2020) estima que para 2050 habrá un aumento de más de 2,300 millones de personas en todo el mundo, lo cual determina la necesidad de incorporar nuevas estrategias y paquetes tecnológicos que permitan potencializar

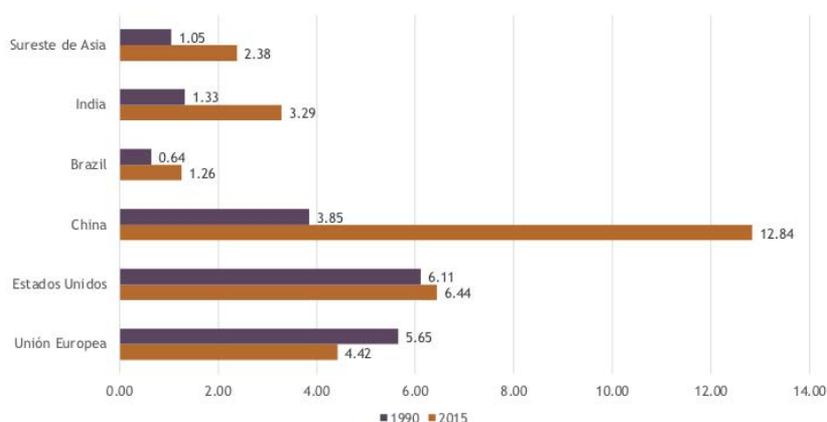
la producción de alimentos de origen animal. La producción de metano entérico (CH_4) del ganado es considerada la mayor fuente de emisión de gases de efecto invernadero (GEI) del sector agropecuario (Lamb *et al.*, 2021). El gran número de rumiantes domésticos, aunado a los elevados volúmenes de emisión de CH_4 por cabeza y su alto potencial de contribución al calentamiento global, coloca a la fermentación entérica como una fuente significativa de GEI dentro del sector agropecuario.

Emisiones globales de gases de efecto invernadero

A pesar de la implementación de políticas y estrategias para la mitigación del calentamiento global, las emisiones antropogénicas anuales de GEI se incrementaron a razón de 1.0 GtCO_{2e} por año entre 2000 y 2010; en 2010 alcanzaron los valores históricos de 49.0 (± 4.5) GtCO_{2e} año⁻¹ (IPCC, 2014). Esta tendencia en el incremento de las emisiones se mantuvo en décadas subsecuentes; Oreggioni *et al.* (2021) señalaron un aumento del 50% de las emisiones de GEI en 2015 (49.02 GtCO_{2eq}) en comparación con los valores de 1990 (32.61 GtCO_{2eq}). Estos niveles aumentaron en un rango del 1-2% en años posteriores a 2016, lo cual indica que las emisiones de GEI podrían no haber alcanzado su valor máximo. Las más recientes estimaciones refieren que en 2018 se alcanzaron los niveles más altos de emisiones de GEI en la historia de la humanidad: 58 GtCO_{2eq} (Lamb *et al.*, 2021).

Es muy probable que las emisiones antropogénicas de GEI hayan contribuido al calentamiento global en la superficie terrestre en un rango de 0.5-1.3°C durante el periodo de 1951 a 2010. A nivel mundial, el crecimiento económico y demográfico es el principal impulsor de la tendencia al aumento de emisiones de CO₂ derivadas de la combustión de combustibles fósiles (IPCC, 2014). El papel de la explosión demográfica y la industrialización sobre el cambio climático se refuerza con el hecho de que más del 50% del incremento de las emisiones de GEI entre 2010 y 2018, el cual ascendió a 5.8 GtCO_{2eq}, estuvo asociado con los procesos de generación de energía (>1.9 GtCO_{2eq}) e industriales (>1.8 GtCO_{2eq}). Además, la disminución en las emisiones de GEI en los años 2008 y 2009 fue asociada con la crisis en la economía global y la reducción en las actividades económicas en todos los sectores (Oreggioni *et al.*, 2021).

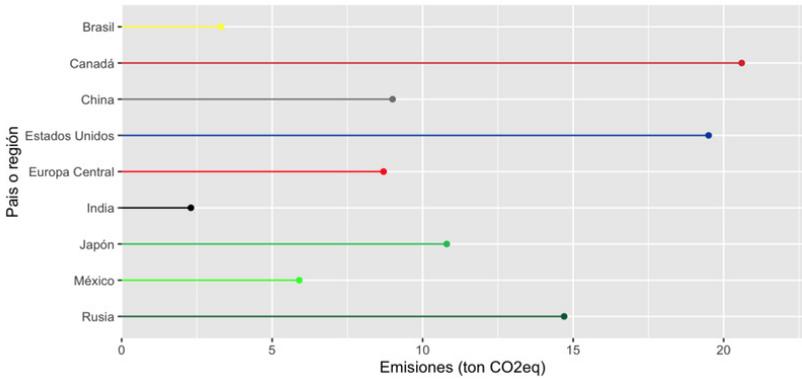
Figura 1. Emisiones GEI en diferentes regiones del mundo en 1990 y 2015 (GtCO_{2eq}).



Fuente: Oreggioni *et al.* (2021).

A finales del siglo XX, los países desarrollados fueron los principales contribuyentes para el incremento de origen antropogénico de las concentraciones de GEI. Sin embargo, durante las últimas décadas las contribuciones relativas para el calentamiento global han cambiado notablemente debido a la rápida industrialización de las economías emergentes (Den Elzen *et al.*, 2013) (Figura 1). Por ello, en la actualidad el 40% las emisiones globales de GEI se concentran en países desarrollados y en vías de desarrollo ubicados en las regiones del este de Asia (China) y Norteamérica (Estados Unidos). Con respecto a la contribución de GEI per cápita (toneladas por habitante) (Figura 2), los principales emisores son Canadá (20.6 ton CO_{2eq}), Estados Unidos (19.5 ton CO_{2eq}), Rusia (14.7 ton CO_{2eq}) y Japón (10.8 ton CO_{2eq}) (Janssens-Maenhout *et al.*, 2019).

Figura 2. Emisiones per cápita de gases de GEI de los principales países y regiones del mundo.



Fuente: Janssens-Maenhout *et al.* (2019).

El organismo oficial encargado de la regulación de las políticas globales con relación al cambio climático es el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés). Este organismo clasifica las emisiones de GEI en cinco sectores: agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra (AFOLU, por sus siglas en inglés), producción eléctrica y térmica, transporte, industria y edificios (IPCC, 2014). Las estimaciones del IPCC (2014) señalan que el 35% de las emisiones globales de GEI corresponden al sector energético, 24% al sector AFOLU, 21% a la industria, 14% por el transporte y el 6.4% a los edificios. Son diversas las aproximaciones metodológicas empleadas para determinar las emisiones de GEI; sin embargo, todas demuestran tendencias similares en la magnitud de las emisiones de los diversos sectores, tal como muestra la Tabla 1.

Tabla 1. Emisiones de GEI por sector económico de acuerdo con tres metodologías de estimación.

	IPCC (2014)	Richi y Roser (2020)	Lamb <i>et al.</i> (2020)
AFOLU	24%	21.5%	21.3%

Producción de energía	25%	30.4%	24.2%
Transporte	14%	15.9%	20.3%
Industria	21%	18.0%	24.5
Edificios	6.4%	5.5%	5.7%
Otros	9.6%	8.7%	11%

A pesar de la transición en las últimas tres décadas hacia fuentes alternativas para la generación de energía (solar, eólica y gas natural), el sector energético se mantiene como el mayor contribuyente a las emisiones fósiles de CO₂, con un 31% de estas (Oreggioni *et al.*, 2021), y de emisiones globales de GEI, con un 34% (Lamb *et al.*, 2020). A nivel regional, los países de Sureste Asiático se ubican como los principales emisores del sistema de generación de energía. Esta región ha presentado un incremento constante en las demandas energéticas, en donde países como China y la India destacan como principales consumidores de energía, quienes a su vez utilizan al carbón como principal insumo para su producción (Lamb *et al.*, 2021).

Las emisiones de CO₂ fósiles representan el 74% del total de emisiones de GEI y tuvieron un incremento del 60% entre 1990 y 2015, como consecuencia del aumento del 43% en el consumo mundial de combustibles desde 1990. Las emisiones directas de CO₂ derivadas de la industria muestran un incremento de 56% en los últimos 30 años. Dicho incremento se explica por el aumento en las actividades industriales y el consecuente aumento en las emisiones de CO₂ de países en vías de desarrollo, como China (>337%), la India (>249%), países del Sureste Asiático (>287%) y Brasil (>89%; Lamb *et al.*, 2020).

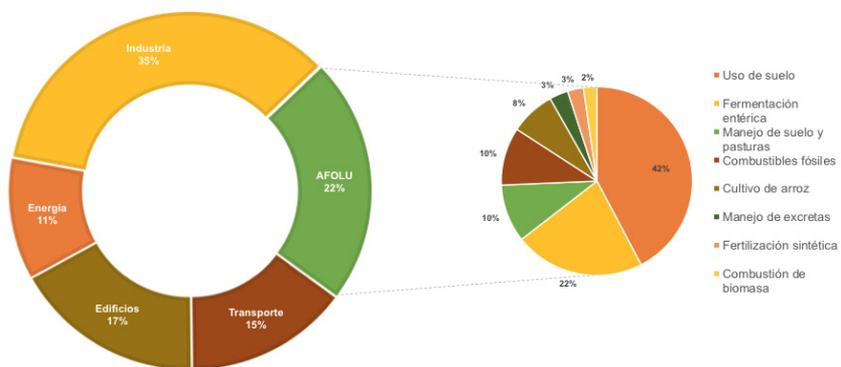
Emisiones del sector AFOLU: agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra

El desarrollo de las actividades agropecuarias tiene un vínculo importante con otro subsector relevante en el cambio climático: el forestal. Por tal motivo, desde la perspectiva del cambio climático, estos dos sectores se consideran de manera conjunta bajo un gran sector denominado AFOLU.

Para el análisis de los diversos sectores involucrados en la emisión de GEI, Lamb *et al.* (2021) desarrollaron un inventario global en el cual las emisiones de GEI se estiman utilizando dos aproximaciones: “emisiones directas”, las cuales comprenden las emisiones producidas de manera directa, y “emisiones indirectas”, en donde las emisiones asociadas con la producción de electricidad y calor del sector energético son ubicadas en los sectores consumidores. Esto permitió la redistribución de las emisiones asociadas con el consumo de energía eléctrica y la generación de calor para cada sector, y evitar la sobre o subestimación de sus emisiones.

Con el ajuste implementado en las emisiones indirectas, los sectores que más incrementaron sus emisiones son la industria (>10%) y los edificios (>12%). El sector AFOLU permanece con valores muy similares cuando se comparan las estimaciones directas e indirectas (21.3 vs. 22.3%). En el mismo sentido, cuando las estimaciones indirectas son valoradas por cada sector se pueden observar las subestimaciones de sectores como el industrial y la sobreestimación del sector AFOLU, por lo cual es importante la evaluación y análisis de las emisiones de cada sector de manera integral tomando en cuenta el ciclo completo en el proceso de generación de bienes y servicios.

Figura 3. Emisiones de GEI de los diversos sectores globales y estratificación de las emisiones del sector AFOLU (GtCO_{2eq}).



Fuente: elaboración propia basada en Lamb *et al.* (2021).

Las emisiones asociadas con el sector AFOLU contribuyen con aproximadamente el 21% del total de emisiones de GEI (Lamb *et al.*, 2021). Estas emisiones se engloban en dos principales grupos: emisiones de CO₂ por el cambio del uso de suelo y actividades forestales, y emisiones debidas a actividades agrícolas (agricultura, ganadería y acuicultura), predominantemente CH₄ y N₂O. Como muestra la Figura 3, el cambio del uso del suelo representa el 42% de las emisiones de GEI, asociadas principalmente al CO₂. Es importante destacar que usualmente las estimaciones de emisiones asociadas con actividades agrícolas son inmediatamente vinculadas con la ganadería y, de manera puntual, con el metano entérico. Sin embargo, en estas últimas estimaciones se constata que las emisiones de GEI derivadas de la fermentación entérica únicamente representan el 22% de este sector y el 4.9% del total de las emisiones globales.

La ganadería y el cambio climático: actualización de cifras

El incremento en la demanda de carne y productos lácteos debido al crecimiento de la población y los cambios en los patrones de consumo ha determinado un aumento del número de cabezas de ganado y, en consecuencia, del impacto ambiental de la producción de alimentos de origen animal (Moorby *et al.*, 2015). Las actividades ganaderas soportan cerca de 1,300 millones de productores a nivel mundial, los cuales manejan más de 20,000 millones de animales domésticos que hacen uso del 30% de la superficie terrestre para actividades de pastoreo, a la vez que utilizan un tercio de las áreas de cultivo para la alimentación animal (Herrero *et al.*, 2016).

Por lo tanto, el sector ganadero juega un papel importante en el desarrollo y la implementación de estrategias para la mitigación del cambio climático (Gerber *et al.*, 2013). Sin embargo, es importante visualizar el rol de la ganadería como un sector que genera alimentos de alto valor nutricional que permiten garantizar la seguridad alimentaria de la población mundial. En décadas recientes, la ganadería ha estado bajo el escrutinio público como un actor primario en el cambio climático, sin tomar en cuenta su papel en los sectores económico, social y alimentario; además, hay múltiples contradicciones entre las estimaciones del impacto de la ganadería sobre las emisiones globales de GEI (Tabla 2).

Tabla 2. Emisiones globales de GEI por la ganadería de acuerdo con cuatro metodologías de estimación.

	Gerber <i>et al.</i> (2013)	FAO (2020)	Herrero <i>et al.</i> (2016)	Lamb <i>et al.</i> (2021)
CO ₂ -eq (Gg ton)	7.1	5.3	5.6-7.5	4.52 ^a
CH ₄ (Gg ton)	3.1	2.1	1.6-2.7	2.84
Total GEI % ^b	14.5	10.6	ND	7.79

^a Emisiones que contemplan la fermentación entérica (CH₄), manejo del suelo y pastizales (CO₂ y N₂O) y manejo de excretas (CO₂ y N₂O), además de la utilización de electricidad y producción de calor como fuentes indirectas de emisión.

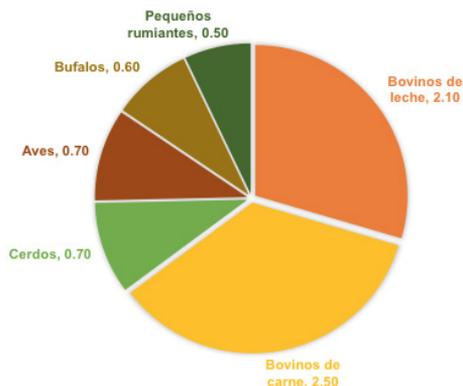
^b Porcentaje que representan las emisiones de la ganadería con respecto del total de las emisiones de GEI.

La FAO, en 2013, reportó estimaciones globales de GEI de 49 GtCO_{2eq}; las actividades ganaderas contribuyeron con 7.1 GtCO₂, lo que representa el 14.5% de las emisiones derivadas de actividades antropogénicas. Este dato ha sido constantemente utilizado por sectores de la industria, organizaciones civiles e incluso grupos de investigación para desacreditar la cadena de generación de productos de origen animal (Hedemus *et al.*, 2014) (Figura 5). Sin embargo, las estimaciones más recientes ubican a la ganadería como un sector que contribuye únicamente con 4.52 GtCO_{2eq}, lo cual representa únicamente el 7.79% del total de emisiones de GEI. Es importante aclarar que estas estimaciones comprenden fermentación entérica (CH₄), manejo del suelo y pastizales (CO₂ y N₂O) y manejo de excretas (CO₂ y N₂O), además de la utilización de electricidad y producción de calor como fuentes indirectas de GEI.

Recientemente, Herrero *et al.* (2016) estimaron que las emisiones totales de la actividad ganadera entre 1995 y 2005 oscilaron entre 5.6 y 7.5 GtCO_{2eq} año⁻¹; el metano entérico (CH₄) (1,6 -2,6 GtCO_{2eq} año⁻¹), el óxido nitroso (N₂O) asociado con la producción de piensos (1,3-2 GtCO_{2eq} año⁻¹) y el uso de la tierra para alimentación animal (~1,6 GtCO_{2eq} año⁻¹) fueron las

principales fuentes de emisión. Con relación a las especies pecuarias, los bovinos representan el subsector con mayores emisiones (4.6 GtCO_{2eq}), contribuyendo con el 78% de los GEI derivados de la ganadería. De dichas emisiones, 2.6 GtCO_{2eq} son emitidas por bovinos de carne y 2.1 GtCO_{2e} por bovinos lecheros (Herrero *et al.*, 2016) (Figura 4).

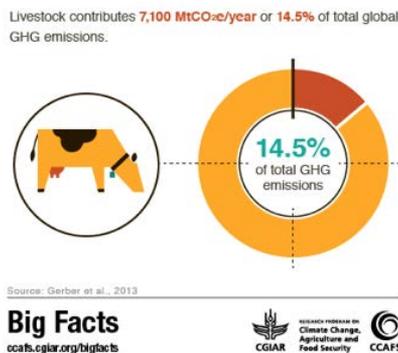
Figura 4. Emisiones de GEI de las diversas especies pecuarias (GtCO_{2eq}).



Fuente: elaboración propia basada en Herrero *et al.* (2016).

La cadena de suministro de alimentos está constituida por la producción, el procesamiento, la distribución y la comercialización. De acuerdo con la revisión sistematizada y el metaanálisis desarrollado por Poore y Nemecek (2018) estudiando 38,700 unidades de producción agropecuarias en 119 países, la cadena de suministro de alimentos contribuye globalmente con 13.7 GtCO_{2eq}, que equivalen al 26% de las emisiones antropogénicas de GEI. De este total de emisiones, únicamente el 31% son producto de las actividades pecuarias (ganadería y acuicultura), de las cuales las actividades agrícolas, el uso de la tierra y la cadena de distribución contribuyen con el 27%, el 24% y el 18%, respectivamente.

Figura 5. Percepción del efecto de la ganadería sobre las emisiones de GEI.



Fuente: Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security.

Por tal motivo, es importante definir de manera puntual el papel del sector ganadero en el cambio climático; además, este sector cuenta con sumideros de carbono, lo cual le permite la generación de productos “neutros en carbono”. La neutralidad de carbono significa conseguir el equilibrio entre el CO₂ emitido por un sistema agropecuario y la absorción de carbono de la atmósfera por sumideros propios del sistema.

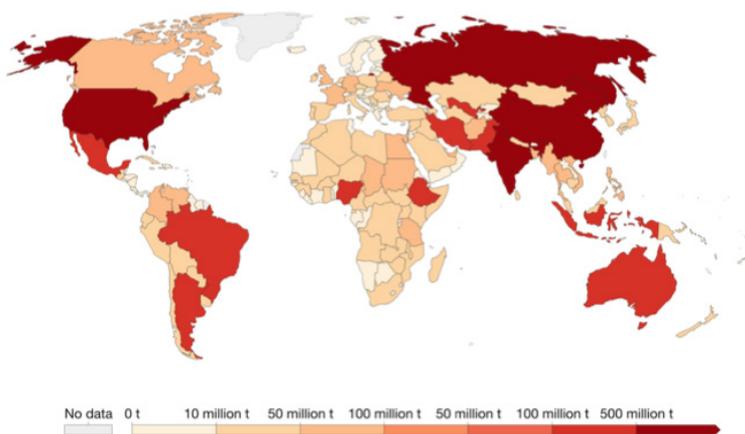
Papel del metano como gas de efecto invernadero

Las emisiones de CH₄ de origen antropogénico derivan principalmente de procesos de fermentación (entérico, excretas y cultivo de arroz) y de difusión (fugas en minas de carbón y pérdidas en la distribución de gas). La diversidad en las fuentes de emisión de CH₄ determina que el papel de las actividades económicas y productivas cambie de manera importante entre regiones y países (Figura 6). Por ejemplo, para los miembros de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OECD, por sus siglas en inglés), las principales fuentes de emisión de CH₄ son la fermentación entérica (31.1%) y la producción de combustibles fósiles (28.1%); para países de América Latina, el Sureste Asiático y África, las actividades ganaderas representan la fuente principal de emisiones de CH₄ (Lamb *et al.*, 2021). Por otro lado, para

los países miembro del grupo de Economías en Transición (EIT, por sus siglas en inglés), las emisiones de CH₄ son dominadas por las actividades de producción de combustibles fósiles (49.9%) (Janssens-Maenhout *et al.*, 2019) (Figura 5).

Los reportes más recientes señalan un aumento del 21% en las emisiones globales de metano entre 1990 y 2015, habiendo pasado de 7.56 GtCO_{2eq} a 9.14 GtCO_{2eq} (Oreggioni *et al.*, 2021). De acuerdo con “The Emissions Database for Global Atmospheric Research” (EDGAR V4.3.2.), a nivel mundial en 2012 el mayor emisor de CH₄ fue China (21.5%), al ser el principal productor de carbón y uno de líderes en al cultivo de arroz. El gran número de rumiantes domésticos aunado a los elevados volúmenes de emisión de CH₄ por cabeza y su alto potencial de contribución para el calentamiento global hacen de la fermentación entérica una fuente significativa de GEI del sector agropecuario. En términos globales, las emisiones de CH₄ derivadas de la agricultura están relacionadas principalmente con la fermentación entérica (2.8 tCO_{2eq}), que representa el 25% de este sector. Sin embargo, el papel de la ganadería en las emisiones de CH₄ oscila en un rango del 9% al 59%, dependiendo del país del que se trate (Janssens-Maenhout *et al.*, 2019).

Figura 6. Emisiones de metano (toneladas CO_{2eq}) a nivel mundial basadas en un potencial de calentamiento global de 100 años.



Fuente: OurWorldInData.org (15 de abril de 2022).

Metano entérico

Los rumiantes tienen la capacidad de aprovechar los carbohidratos fibrosos de los vegetales a través de la simbiosis que tienen con el consorcio de microorganismos a nivel ruminal. El rumen es un complejo, diverso y anaerobio ecosistema en donde los alimentos fibrosos son degradados y fermentados hacia ácidos grasos de cadena corta, hidrogeno (H_2) y CH_4 , por parte de una enorme variedad de géneros y especies de bacterianas (10^{10} a 10^{12} ml^{-1}), protozoarios (10^5 a 10^6 ml^{-1}), hongos (10^4 a 10^5 ml^{-1}) y arqueas (10^8 a 10^{10} ml^{-1}) (Patra, 2012). Esta actividad microbiana en el retículo-rumen es la que brinda al rumiante la habilidad de consumir y utilizar forrajes. Las enzimas producidas por los microorganismos ruminales permiten la degradación de enlaces glucosídicos β 1-4 de la celulosa, favoreciendo su degradación y fermentación, así como la producción de ácidos grasos volátiles (acético, butírico y propiónico). La tasa de producción de cada AGV dependerá principalmente del tipo de alimentación proporcionada al animal (Figura 7).

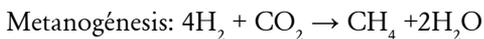
Figura 7. Representación de la fermentación entérica en rumiantes.



Fuente: elaboración propia.

La fermentación de la celulosa del forraje (fibra) en el rumen da como resultado un patrón de fermentación alto en ácido acético, mientras que cuando se fermentan los granos de cereales (almidón), la proporción de acetato se reduce y la de propionato se incrementa en la mezcla molar. La formación de acetato libera dos moles de CO_2 y cuatro moles de H_2 por mol de glucosa fermentada. Las arqueas metanogénicas pueden entonces utilizar cuatro moles de H_2 para reducir un mol de CO_2 a CH_4 . Por lo tanto, la formación de acetato da como resultado la producción de un mol de CO_2 y un mol de CH_4 por mol de glucosa fermentada (Nolan *et al.*, 2010).

La síntesis de propionato da como resultado una producción neta de CO_2 y requiere una entrada neta de equivalentes reductores, lo que resulta en una disminución en la producción de CH_4 (Ungerfeld y Kohn, 2006). La producción de metano aumenta en procesos de fermentación de forraje (acetato), mientras que cuando se fermentan granos de cereales la producción de CH_4 tiende a ser menor. Esto sugiere que la pérdida de energía como CH_4 es considerablemente mayor por unidad de energía bruta consumida en raciones que proveen forraje en comparación con las dietas basadas principalmente en granos.



Por lo tanto, la metanogénesis es una parte importante del metabolismo energético en los rumiantes, y medir su producción es fundamental para comprender la eficiencia y la productividad del ganado (Hill *et al.*, 2015). El metano es un producto final de la fermentación ruminal, formado autotróficamente por arqueas metanogénicas a partir de CO_2 y H_2 derivadas de la fermentación de fuentes de carbono (básicamente carbohidratos) (Martin *et al.*, 2010). Con un contenido energético bruto de 55.2 MJ/kg, el CH_4 representa una pérdida significativa de energía alimentaria de los sistemas de producción. Por lo general, alrededor del 6% al 10% de la energía bruta total consumida por las vacas lecheras se convierte en CH_4 y se libera a la atmósfera a través del eructo y respiración (Eckard *et al.*, 2010). Sin embargo, es importante considerar que la metanogénesis no es un proceso del que se pueda prescindir, debido a su papel en el mantenimiento de niveles adecuados

de presión parcial de H_2 en el rumen, lo cual promueve un ambiente favorable para la degradación de carbohidratos de las paredes celulares (Patra, 2012). En otras palabras, el CH_4 representa una vía para la eliminación de hidrógeno metabólico producido durante el metabolismo microbiano.

Inventarios de gases de efecto invernadero

El primer paso para el desarrollo y la evaluación de estrategias de mitigación son las mediciones precisas de las emisiones de GEI (Poore y Nemecek, 2018). Sin embargo, el nivel de precisión e incertidumbre de la estimación de las emisiones de GEI muestra diferencias entre países en desarrollo, en vías de desarrollo y subdesarrollados, debidas principalmente a la disponibilidad de información confiable y datos precisos de los factores de emisiones, lo cual determina la metodología de estimación utilizada (Tier 1, 2 o 3 y Evaluación del Ciclo de Vida, LCA). Por otro lado, hay países con información adecuada, pero que no cuentan con la formación técnica y científica para desarrollar con éxito el inventario de emisiones de GEI, el análisis comprensivo de las fuentes de emisión y evaluación del efecto de las estrategias de mitigación.

La reducción de las emisiones de CH_4 requiere inicialmente la estimación precisa de este GEI y su incertidumbre asociada. El Acuerdo de París, adoptado el 12 de diciembre de 2015, compromete a los 194 países que lo signaron a presentar inventarios periódicos de GEI, cumpliendo con los principios de integridad ambiental, transparencia, exactitud y exhaustividad. Los inventarios de emisiones de GEI son el principal parámetro para la implementación de políticas de mitigación del cambio climático (Bun *et al.*, 2010). Además, El Acuerdo de París señala que los países deben reportar sus inventarios nacionales de GEI tomando como referencia las directrices del IPCC (2006) para las diversas fuentes de emisiones de GEI.

Para estimar las emisiones de CH_4 entérico, el IPCC propone tres niveles de complejidad, que son diferentes en sus esfuerzos y niveles de detalle. El nivel 1 es un enfoque menos preciso para determinar las emisiones de CH_4 entérico y consiste en un modelo básico que combina las estadísticas de la población animal (datos de actividad) con los factores de emisión predeterminados del IPCC. El enfoque de nivel 2 es más preciso, ya que

generalmente desagrega los datos de la actividad y utiliza varios factores de emisión que reflejan la disponibilidad de datos específicos del país. El enfoque de nivel 3 utiliza modelos más complejos y datos de actividad altamente desagregados (Cersosimo y Wright, 2015).

Inventarios de emisiones de gases de efecto invernadero por la ganadería en México

El gobierno de México ha presentado seis comunicaciones nacionales de cambio climático ante la Convención Marco de las Naciones Unidas entre 1997 y 2018. En dichos documentos, se reportan las emisiones de los diversos sectores involucrados en la emisión de GEI. Sin embargo, las estimaciones para las emisiones de CH₄ entérico de ganado bovino en la totalidad de comunicaciones se han llevado a cabo utilizando el nivel 1, con una limitada desagregación de las emisiones y sin la utilización de técnicas sofisticadas para el cálculo de la incertidumbre (Tabla 3).

Tabla 3. Características de los inventarios oficiales de emisiones de metano entérico de bovinos.

*Total de emisiones de metano entérico de todas las especies pecuarias.

Comunicación	Estimación (Gg CO ₂)	Incertidumbre	Nivel	Metodología incertidumbre	Desagregación
Primera	35,718.9*	No estimada	Tier 1	Ninguna	• Ninguna
Segunda	41,424.1*	No estimada	Tier 1	Ninguna	• No especificada**
Tercera	37,366.7*	± 1,74%	Tier 1	Por defecto ¹	• Ninguna
Cuarta	37,181.0	No estimada	Tier 1	Ninguna	• Ninguna
Quinta	37,635.2	No estimada	Tier 1	Ninguna	• Ninguna
Sexta	53,442.7	± 6.5%	Tier 1	Por defecto ²	• Bovinos de leche • Otros
Inventario desarrollado	42,823.4	18,28, +21,2%.	Tier 2	Simulación de Monte Carlo Bootstrap	• Geoespacial (cinco regiones) • Nueve categorías animales

Análisis de sensibilidad	<ul style="list-style-type: none"> • Sistema de producción • Manejo nutricional • FE y Ym específicos
--------------------------	--

**Refiere una segregación por clima, función, forma de explotación y edad.

¹ IPCC (2000).

² IPCC (2006).

Inventario nivel 2 de emisiones de metano entérico en bovinos y su incertidumbre asociada

Con el objetivo de estimar las emisiones de CH₄ entérico del ganado bovino en México, se calcularon factores de emisión específicos utilizando el método nivel 2 propuesto por el IPCC (2006). Fueron utilizados factores de conversión de CH₄ (Ym) obtenidos de nuestros experimentos realizados en cámaras de respiración de circuito abierto. Además, fueron empleados datos de actividad específicos basados en las características de los animales, manejo nutricional y población de ganado, obtenidos de estadísticas oficiales, literatura científica y una encuesta nacional (Castelán-Ortega *et al.*, 2019). Se utilizaron dos estrategias para reducir la incertidumbre del inventario y los datos de la actividad:

1. Desagregación geoespacial de la población bovina y desarrollo de factores de emisión de CH₄ específicos para México. Consistió en dividir el territorio nacional en cinco regiones geoclimáticas: regiones secas, muy secas, templadas, húmedas tropicales y subhúmedas tropicales.
2. Categorización de la población bovina de México y aplicación de encuesta nacional. La categorización utilizada en el presente trabajo se basó en la clasificación del Padrón Nacional Ganadero y el Censo Nacional Agropecuario 2007. La población de ganado bovino se dividió en nueve subcategorías: terneros, novillos jóvenes, novillas jóvenes, novillos, novillas, vacas lecheras, vacas cárnicas, vacas de doble propósito y toros.

Cálculo de incertidumbre

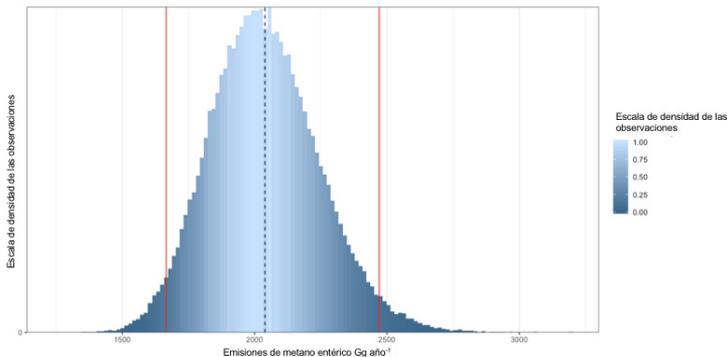
Un enfoque frecuentista basado en datos empíricos fue utilizado para llevar a cabo las inferencias con respecto a la distribución de probabilidad de los parámetros de entrada del modelo T2 y evaluar la propagación en la incertidumbre de estos. Así, el enfoque utilizado en el presente estudio para estimar la incertidumbre del inventario de nivel 2 para las emisiones de CH₄ entérico de ganado bovino de México comprendió:

- Estimación de la incertidumbre los parámetros que alientan el modelo T2
- Propagación de la incertidumbre del modelo T2
- Análisis de sensibilidad del modelo T2

Resultados del inventario

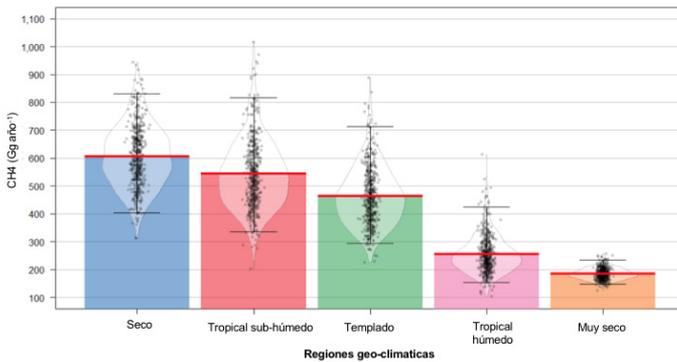
El inventario de emisiones de CH₄ de la fermentación entérica de ganado en México calculado usando el modelo T2 fue de 2,039.21 Gg CH₄ anuales. El inventario mostró una distribución Johnson SU con un nivel de incertidumbre de -18.28 y +21.2%. La Figura 8 muestra la distribución empírica de las emisiones totales de CH₄, valor esperado e intervalos de confianza de 95%. Se puede observar que la distribución empírica está ligeramente sesgada hacia la izquierda, lo que se atribuye a la asimetría que muestran los factores de emisión.

Figura 8. Distribución empírica de las estimaciones de CH₄ entérico de bovinos en México.



La Figura 9 muestra el inventario de las emisiones de CH₄ entérico para las cinco regiones geoclimáticas de México. Se puede observar que las regiones seca y subhúmeda tropical son las principales emisoras de CH₄, con 607.2 y 526.7 Gg año⁻¹, respectivamente, lo cual se asocia con sus mayores inventarios ganaderos y características del manejo nutricional. La menor población de bovinos en la región geoclimática muy seca (2.9 millones de cabezas) explica los niveles inferiores de emisión de CH₄ entérico para esta región.

Figura 9. Gráfico de pirata de las estimaciones de CH₄ entérico de bovinos de acuerdo con las regiones geoclimáticas en México.



Estrategias de mitigación de metano entérico

La reducción de las emisiones de GEI por parte de la ganadería se pueden alcanzar mediante la disminución en la producción y el consumo de productos de origen animal, de la intensidad de las emisiones o por una combinación de ambas. Estimaciones de la FAO consideran que las reducciones de emisiones de GEI del sector pecuario podrían alcanzar el 30% (1.8 Gt CO_{2eq}) si las estrategias de mitigación fueran aplicadas a un 10% de los productores con menor intensidad de emisión. En relación con la especie pecuaria, los bovinos muestran el mayor potencial de mitigación (<65%), seguidos por aves (<14%), búfalos (<8%), cerdos (7%) y pequeños rumiantes (<7%). Las estrategias de mitigación de CH₄ se pueden clasificar en estrategias asociadas con los productores estrategias asociadas con los consumidores (Gerber *et al.*, 2013).

Estrategias asociadas con los productores

Uso de aditivos. Diversos componentes químicos han sido probados como alternativas para la reducción de emisiones de CH₄ entérico, mostrando diferencias en su potencial de mitigación (Tabla 4). Estos componentes han sido principalmente evaluados en estudios a corto plazo; sus efectos frecuentemente son mucho más reducidos a largo plazo debido al proceso de adaptación del ecosistema ruminal (Herrero *et al.*, 2016).

Hendemus *et al.* (2014) proyectaron diversos escenarios de mitigación para las emisiones de CH₄ por la ganadería para el año 2050. Estos escenarios fueron definidos como:

- 1) De referencia
- 2) Incremento de la productividad
- 3) Mitigación técnica

Los resultados de este estudio revelan que el aumento en la eficiencia nutricional en el escenario de incremento de la productividad mostró el mayor potencial de mitigación en la emisión de CH₄. Las estrategias de mitigación técnica que incluían la utilización de grasas y otros aditivos en las dietas animales también mostraron un potencial importante de mitigación.

Tabla 4. Estrategias de mitigación de la emisión de CH₄ entérico.

Estrategia	Potencial de mitigación de CH ₄ ¹
Aditivos	Alto
Nitratos	Bajo
Ionóforos	Bajo
Compuestos bioactivos de plantas (taninos)	Medio
Lípidos	Bajo
Manipulación del rumen	Bajo a medio
Concentrado en la ración	Bajo a medio
Mejora de la calidad de forraje	Bajo
Manejo del pastoreo	

Procesamiento de los alimentos
Macrosuplementación (cuando es deficiente)
Microsuplementación (cuando es deficiente)
Mejoramiento genético
Ganadería de precisión

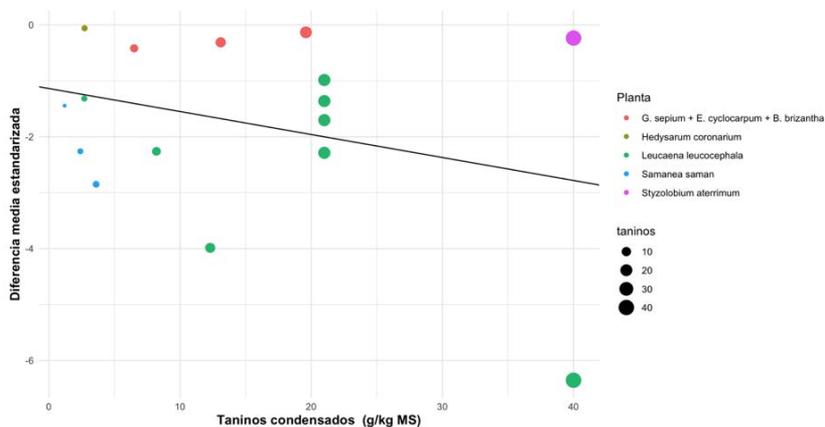
¹Alto = $\geq 30\%$ efecto de mitigación; medio = 10% al 30% de efecto de mitigación; bajo = $\leq 10\%$ de efecto de mitigación; ND = no determinado.

Fuente: adaptación a partir de Gerber *et al.* (2013).

Sin embargo, Hendemus *et al.* (2014) también refieren que el aumento en la productividad determina una menor utilización de forrajes y zonas de pastoreo, a lo que se suma un mayor uso de ingredientes ricos en energía (ej. granos) y proteína (ej. semillas de oleaginosas). Dichos ingredientes requieren para su producción de una cantidad considerable de fertilizantes nitrogenados, lo cual contribuye a que se incrementen las emisiones de N_2O . Por ello es importante buscar estrategias de mitigación que no impliquen efectos sobre el uso del suelo. En este sentido, la utilización de plantas con componentes secundarios con efectos antimetanogénicos se vislumbra como una opción.

En una revisión analítica y metaanálisis realizada por nuestro Cuerpo Académico Sistemas Pecuarios Sustentables, en colaboración la Universidad de Pisa y la Universidad de Copenhague, se analizaron 45 ensayos experimentales para evaluar el efecto de taninos contenidos en plantas tropicales sobre las emisiones de metano entérico en rumiantes (Cardoso-Gutierrez *et al.*, 2021). Los resultados señalan que la inclusión de taninos en las raciones de rumiantes muestra una respuesta positiva de mitigación de las emisiones de CH_4 entérico (diferencia media estandarizada = -0.86; $P = 0.005$). Sin embargo, el nivel de emisión es dependiente del tipo de planta suplementada y del nivel de inclusión de taninos (Figura 10) (Cardoso-Gutierrez *et al.*, 2021).

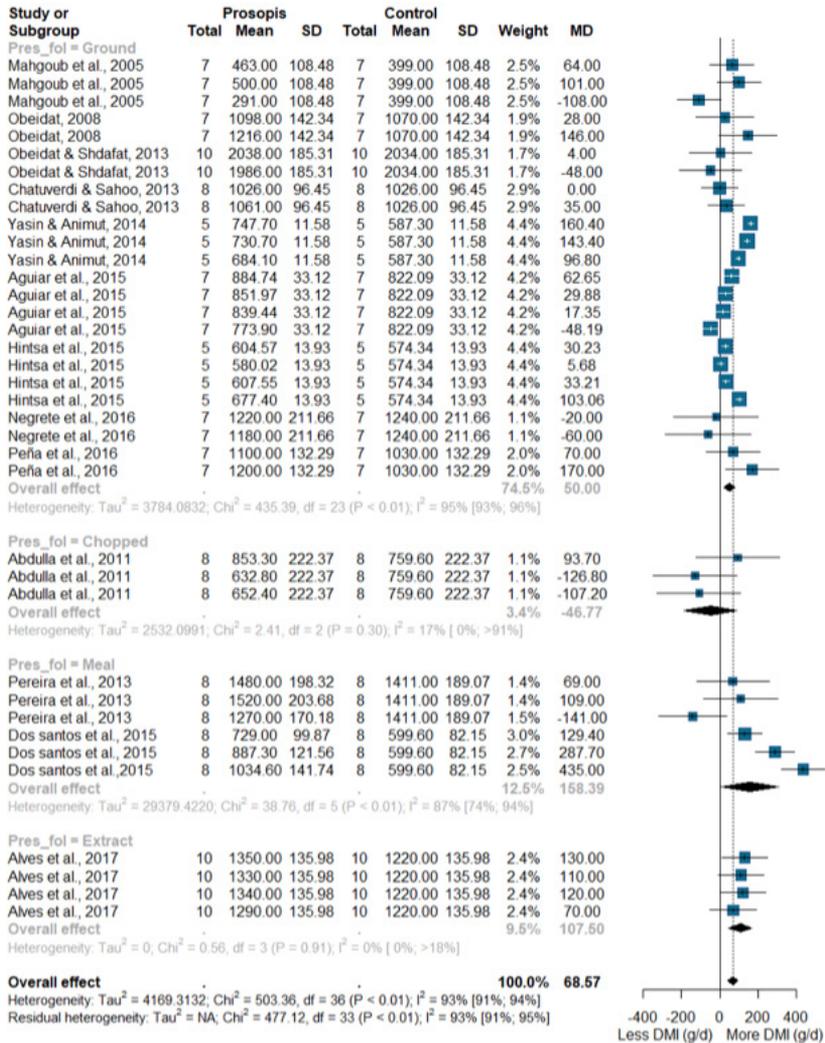
Figura 10. Relación entre el nivel de inclusión (g/kg MS) de diversas plantas tropicales y el efecto sobre la mitigación de metano entérico en rumiantes.



Fuente: adaptación de Cardoso-Gutierrez *et al.* (2021).

En otro metaanálisis, efectuado por el suscrito autor en colaboración con la Universidad de Davis California, AgroSup Dijon-Francia y la Universidad de Western Australia, se evaluó el efecto de la inclusión de la vaina de mezquite (*Prosopis* spp.) sobre el consumo de alimento, ganancia diaria de peso, eficiencia alimentaria y producción de metano entérico en pequeños rumiantes (Angeles-Hernandez *et al.*, 2021). Un total de 37 estudios fueron analizados, los cuales revelaron que la inclusión de la dieta de vaina de mezquite mejora el consumo de materia seca (+68.57 g día⁻¹), la ganancia diaria de peso (+9.94 g día⁻¹) y la conversión alimenticia (-21.2 g/g). En relación con las emisiones de CH₄, se observó un aumento en las emisiones en animales suplementados, lo cual puede ser explicado por el aumento en la digestibilidad de la ración y el consumo de materia seca. Sin embargo, de acuerdo con el análisis de subgrupos, el efecto de la vaina de mezquite sobre el desempeño productivo está influenciado por el nivel de inclusión y procesamiento de la vaina (Figura 11).

Figura 11. Forest plot del efecto de la inclusión de la vaina de mezquite sobre el CMS.



Fuente: adaptación a partir de Angeles-Hernandez *et al.* (2021).

Estrategias asociadas con los consumidores

Poore y Nemecek (2018) señalan la posibilidad de que, debido al incremento en la población, en un futuro cercano las modificaciones en los patrones alimenticios de la población mundial alcancen beneficios en la disminución de emisiones de GEI a una escala no alcanzable por los productores. Estos autores refieren que la movilización de las dietas actuales hacia dietas en las cuales se eliminan los alimentos de origen animal permite disminuir en un 76% el uso de la tierra, incluyendo un 19% de la tierra arable. En el mismo sentido, Hedemus *et al.* (2014) concluyen que es crucial asumir una reducción en el consumo de alimentos de origen animal, principalmente carne bovina y leche, para poder alcanzar el objetivo de reducir en 2°C la temperatura del planeta.

Conclusiones

El conocimiento profundo por parte de los actores involucrados en la cadena de producción de alimentos de origen animal (productores, transformadores, transportadores y consumidores) sobre el impacto ecológico de sus actividades es fundamental para alcanzar los objetivos para la contención de los efectos provocados por el cambio climático. El entendimiento de la fisiología ruminal permite la búsqueda de estrategias para la reducción de emisiones de CH₄ entérico sin afectar la productividad. Por lo tanto, las medidas para mitigar la producción de CH₄ entérico no solo deben contribuir a la disminución las emisiones de GEI a escala mundial, sino que también podrían aumentar la productividad animal al mejorar su eficiencia digestiva. Los agricultores también se verán beneficiados por esta mayor productividad, lo que se traducirá en menores costos de producción y mayores ingresos. Los resultados de nuestro grupo de investigación permiten ubicar a la utilización de arbustivas (ejem. mezquite) como una estrategia viable de mitigación de los GEI emitidos por la ganadería. Sin embargo, para poder extender los esfuerzos de mitigación a una escala global se requiere además de la participación de los consumidores a través de la regulación de sus patrones de consumo y evitando el desperdicio de alimentos.

Referencias

- Angeles-Hernandez, J. C., Valencia-Salazar, S. S., Benaouda, M., Ku-Vera, J. C., Paz-Muñoz, E., Muñoz-Benitez, A. L., y Kebreab, E. (2021). Effect of Feeding Mesquite (*Prosopis* spp.) Pods on Productive Performance and Methane Emissions in Small Ruminants: A Systematic Review and Meta-analysis. *Animal-science Proceedings*, 12(1), 61.
- Bun, R., Hamal, K., Gusti, M., y Bun, A. (2010). Spatial GHG Inventory at the Regional Level: Accounting for Uncertainty. *Climatic Change*, 103(1), 227-244.
- Castelán-Ortega, O. A., Ku-Vera, J. C., Ángeles-Hernández, J. C., Benaouda, M., Hernández-Pineda, G. S., Molina, T. L. y Apodaca-Martínez, G. (2019). Ganadería. *Estado del ciclo del carbono en México: Agenda azul y verde* (492-528). Programa Mexicano del Carbono.
- Cardoso-Gutierrez, E., Aranda-Aguirre, E., Robles-Jimenez, L. E., Castelán-Ortega, O. A., Chay-Canul, A. J., Foggi, G., y González-Ronquillo, M. (2021). Effect of Tannins from Tropical Plants on Methane Production from Ruminants: A Systematic Review. *Veterinary and Animal Science*, 14, 100214.
- Cersosimo, L., y Wright, A. (2015). Estimation Methodologies for Enteric Methane Emission in Ruminants. En V. Sejian (ed.), *Climate Change Impact on Livestock: Adaptation and Mitigation* (pp. 209-220). Springer India.
- Den Elzen, M.G., Oliver, J. G., Höhne, N., y Janssens-Maenhout, G. (2013). Countries' Contributions to Climate Change: Effect of Accounting for all Greenhouse Gases, Recent Trends, Basic Needs and Technological Progress. *Climatic Change*, 121(2), 397-412.
- Eckard, R. J., Grainger, C., y De Klein, C. A. (2010). Options for the Abatement of Methane and Nitrous Oxide from Ruminant Production: A Review. *Livestock Science*, 130(1-3), 47-56.
- Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., Farahani, E., Kadner, S., Seyboth, K., Adler, A., Baum, I., Brunner, S., Eickemeier, P., Kriemann, B., Savolainen, J., Schlömer, S., Von Stechow, C., Zwickel T., y Minx, J.C. (eds.). (2014). *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*. Cambridge University Press.

- Eggleston H., Buendia L., Miwa, K., y Tanabe, K. (2006). *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme*. IPCC.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (2020). *Emissions Due to Agriculture* (FAOSTAT Analytical Brief Series No 18).
- Gerber, P. J., Steinfeld, H., Henderson, B., Mottet, A., Opio, C., Dijkman, J., Falcucci, A., y Tempio, G. (2013). *Tackling Climate Change Through Livestock – A Global Assessment of Emissions and Mitigation Opportunities*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).
- Hedenus, F., Wirsenius, S., y Johansson, D. J. (2014). The Importance of Reduced Meat and Dairy Consumption for Meeting Stringent Climate Change Targets. *Climatic Change*, 124(1), 79-91.
- Herrero, M., Henderson, B., Havlík, P., Thornton, P. K., Conant, R. T., Smith, P., y Stehfest, E. (2016). Greenhouse Gas Mitigation Potentials in the Livestock Sector. *Nature Climate Change*, 6(5), 452-461.
- Hill, J., Mcsweeney, C., Wright, A.G., Bishop-hurley, G., y Kalantar-zadeh, K. (2015). Measuring Methane Production from Ruminants. *Trends Biotechnol*, xx, 1-10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2015.10.004>.
- Janssen, G., Crippa, M., Guizzardi, D., y Muntean, M. (2017). Global Atlas of the Three Major Greenhouse Gas Emissions for the period 1970-2012. *Earth System Science Data*, 11(3), 959-1002.
- Lamb, W. F., Wiedmann, T., Pongratz, J., Andrew, R., Crippa, M., Olivier, J. G., y Minx, J. C. (2021). A Review of Trends and Drivers of Greenhouse Gas Emissions by Sector from 1990 to 2018. *Environmental Research Letters*, 16(7), 073005.
- Moorby, J. M., Fleming, H. R., Theobald, V. J., y Fraser, M. D. (2015). Can Live Weight be Used as a Proxy for Enteric Methane Emissions from Pasture-fed Sheep? *Scientific Reports*, 5(1), 1-9.
- Nolan, J. V., Hegarty, R. S., Hegarty, J., Godwin, I. R., y Woodgate, R. (2010). Effects of Dietary Nitrate on Fermentation, Methane Production and Digesta Kinetics in Sheep. *Animal Production Science*, 50(8), 801-806.

- Oreggioni, G. D., Ferraiolo, F. M., Crippa, M., Muntean, M., Schaaf, E., Guizzardi, D., y Vignati, E. (2021). Climate Change in a Changing World: Socio-economic and Technological Transitions, Regulatory Frameworks and Trends on Global Greenhouse Gas Emissions from EDGAR v. 5.0. *Global Environmental Change*, 70, 102350.
- Patra, A. K. (2012). Enteric Methane Mitigation Technologies for Ruminant Livestock: A Synthesis of Current Research and Future Directions. *Environmental Monitoring and Assessment*, 184(4), 1929-1952.
- Poore, J., y Nemecek, T. (2018). Reducing Food's Environmental Impacts Through Producers and Consumers. *Science*, 360(6392), 987-992.
- Ritchie, H., y Roser, M. (2020). CO₂ and Greenhouse Gas Emissions. <https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions>.
- Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (1997). *Primera Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/666956/Primera_Comunicaci_n_Nacional.pdf.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2001). *Segunda Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Instituto Nacional de Ecología. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/666957/Segunda_Comunicacion.pdf.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2006). *Tercera Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Instituto Nacional de Ecología. <https://unfccc.int/resource/docs/natc/mexnc3.pdf>.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2009). *Cuarta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Instituto Nacional de Ecología. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/666958/cuarta_Comunicacion.pdf.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2012). *Quinta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. <https://unfccc.int/resource/docs/natc/mexnc5s.pdf>.

- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2018). *Sexta Comunicación Nacional y Segundo Informe Bienal de Actualización ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático*. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. <https://cambioclimatico.gob.mx/sexta-comunicacion/introduccion.php>.
- Thornton, P., Herrero, M., Freeman, A., Mwai, O., Rege, E., Jones, P., y Mcdermott, J. (2007). Mapping Climate Vulnerability and Poverty in Africa: Impacts on Livestock and Livelihoods. *SAT E Journal*, 4(1), 1-23.
- Ungerfeld, E. M., y Kohn, R. A. (2006). The Role of Thermodynamics in the Control of Ruminal Fermentation. En K. Sejrsen (ed.), *Ruminant Physiology: Digestion, Metabolism, and Impact of Nutrition on Gene Expression, Immunology and Stress*, (pp. 55-85). Wageningen Academic Publishers.



Importancia del manejo silvícola de los bosques para enfrentar el cambio climático. Estudio de caso Parque Nacional El Chico, Hidalgo

Ramón Razo Zárate
Rodrigo Rodríguez Laguna

Introducción

Mediante la adopción de prácticas sostenibles de gestión es posible asegurar que los bosques productivos o de usos múltiples sigan almacenando carbono mientras mantienen su capacidad de proporcionar otros bienes y servicios en beneficio de las generaciones actuales y futuras. A fin de evitar la sobreexplotación y la degradación de los bosques, es necesario planificar activamente las prácticas de gestión y adaptarlas específicamente a cada ecosistema (FAO, 2010).

Los planes y las prácticas de gestión forestal también tendrán que adaptarse a los cambios graduales o repentinos causados por el cambio climático. Para afrontar los desafíos que se plantean y reducir la vulnerabilidad de los bosques, es esencial adoptar una gestión forestal adaptativa. Las medidas de adaptación pueden incluir, por ejemplo, la selección de variedades resistentes a las plagas o las sequías, el uso de especies de varias procedencias, la plantación bajo cubierta de genotipos de especies adaptadas a las nuevas condiciones climáticas previstas o la regeneración natural asistida de especies funcionales. Es preciso adaptar estas medidas al estado de los bosques (primarios, secundarios, degradados) y a la zona específica, incluidas las áreas naturales protegidas donde se desarrolla el bosque de oyamel.

Las actividades de gestión integral ambiental que pueden favorecer la captura y almacenamiento de carbono del bosque de oyamel deben incluir prácticas sostenibles de gestión y aprovechamiento, gestión integrada de incendios, gestión de la sanidad y vitalidad de los bosques y gestión de la biodiversidad y de las áreas protegidas.

Toda la vegetación asimila CO_2 atmosférico, por medio del proceso fotosintético, para formar carbohidratos e incrementar su biomasa al desarrollarse. Los árboles en particular asimilan y almacenan grandes cantidades de carbono durante toda su vida. Los bosques del mundo capturan y conservan más carbono que cualquier otro ecosistema terrestre y participan con el 90% de flujo anual de carbono de la atmósfera y de la superficie de la tierra. Por ello, el manejo silvícola de los bosques puede compensar las crecientes emisiones de CO_2 en dos formas:

1. Al crecer nuevos reservorios de bióxido de carbono, incrementando la masa de material maderable tanto por medio del crecimiento de árboles como por la extracción de madera. Para lograr mayor efectividad en el proceso de almacenamiento de carbono en el largo plazo, la madera extraída debería convertirse en productos durables (Pompa-García y Sigala-Rodríguez, 2017; Rodríguez-Laguna *et al.*, 2021). Una vez que el árbol ha alcanzado su madurez, el carbono acumulado se mantendrá almacenado pero el área muy pronto actuará como reservorio debido a que el proceso de respiración en un bosque maduro generalmente alcanza un balance por el efecto

fotosintético. En el largo plazo, el carbono capturado tanto en sistemas forestales como en sistemas agroforestales puede alcanzar entre 80 y 350 toneladas de carbono por hectárea (tC/ha).

2. Protección de los bosques y suelos naturales que almacenan carbono. Cuando se destruye el bosque, entre 50 y 400 tC/ha pueden ser liberadas a la atmósfera. Conservar los almacenes de carbono es una alternativa viable para disminuir las emisiones de CO₂, de modo que los procesos de almacenaje a largo plazo favorecen la mitigación del cambio climático. Dado que la protección de un área forestal puede inducir la presión en otra, se requieren esquemas integrados de manejo de recursos, enriquecidos con esquemas de evaluación de proyectos para validar dicha protección (INE, 1995).

Método

El presente estudio se realizó dentro del Parque Nacional El Chico, que se ubica a 24 km al noroeste de la ciudad de Pachuca, Hidalgo, en el extremo occidental de la Sierra de Pachuca, perteneciente a la Faja Volcánica Transmexicana (Manzanilla *et al.*, 2019), entre las coordenadas geográficas 20°10'10" a 20°13'25" de latitud norte y los 98°41'50" a 98°46'02" de longitud oeste (Conanp, 2005). Comprende una superficie total de 2,739 ha.

El bosque de oyamel ocupa el 62.9% del área total del Parque Nacional El Chico y está compuesto por una mezcla de especies (árboles, arbustos y herbáceas) que realizan intercambio de CO₂ con la atmósfera y permiten la formación temprana de reservorio de carbono orgánico (Razo-Zárata, 2013; Razo-Zárata *et al.*, 2013b), de modo que la captura y almacenamiento se da en los diferentes escenarios de área natural protegida (Razo-Zárata *et al.*, 2013). Para valorar el potencial, se diseñó un modelo de gestión integral ambiental considerando los aspectos económicos, sociales y ambientales que inciden sobre el bosque de oyamel como generador de bienes, servicios ambientales y desarrollo para los habitantes de la región, trabajadores del Parque y personas que visitan esta área natural protegida.

Para justificar la necesidad de realizar la gestión integral ambiental del bosque de oyamel se definieron los principios básicos para llevarla a cabo,

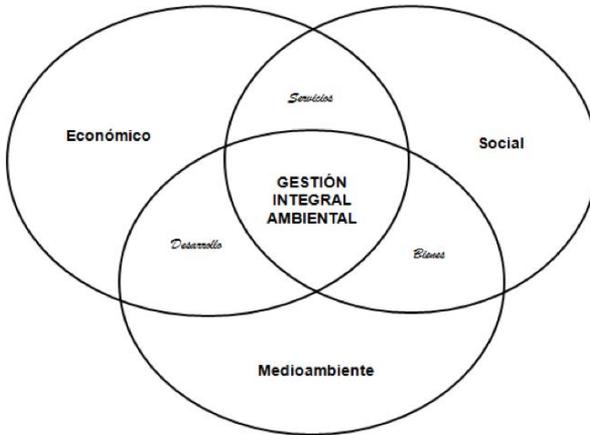
con base en consideraciones ecológicas, ambientales, socioeconómicas, técnicas y políticas.

Posteriormente, mediante el modelo de gestión se elaboró el plan de acción que se propone para cambiar los escenarios actuales del bosque de oyamel a un bosque dinámico para la captura y almacenamiento de carbono, considerando la respuesta del bosque en el corto, el mediano y el largo plazos. Para conocer el grado de afectación a los recursos asociados al bosque de oyamel que pueda resultar con el desarrollo del proyecto, se utilizó por primera vez la matriz de identificación y valoración de impactos ambientales de Leopold *et al.* (1971), modificada por Hernández *et al.* (2006), en la que se efectuó la identificación, descripción y evaluación de los impactos ambientales que se generarán en cada uno de los escenarios con la implementación del modelo de gestión. Posteriormente, se definieron las medidas de mitigación que se pueden implementar para cada escenario.

Resultados y discusión

Para llevar el bosque de oyamel a un escenario ideal para la captura y almacenamiento de carbono, de acuerdo con Razo-Zárate (2013), es necesario diseñar y aplicar un modelo de gestión integral ambiental que tenga como elementos esenciales aspectos ambientales, sociales y económicos, así como las interrelaciones entre estos, considerando al bosque como un proveedor de bienes y servicios ambientales que incide sobre el desarrollo económico del área de influencia del Parque Nacional El Chico (Figura 1).

Figura 1. Modelo de gestión integral ambiental para el bosque de oyamel del Parque Nacional El Chico.



Fuente: elaboración propia.

El modelo de gestión integral ambiental tiene como objetivo mantener y aumentar el valor económico, social y ambiental del bosque de oyamel desde el punto de vista de la captura y almacenamiento de carbono, en beneficio de las generaciones presentes y futuras. Esto implica toda una serie de consideraciones ecológicas, ambientales, socioeconómicas, técnicas y políticas.

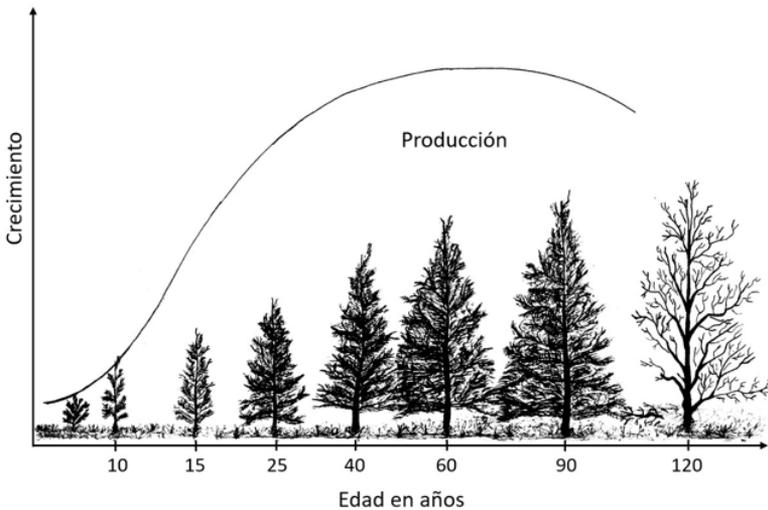
Principios para la gestión del bosque de oyamel

Los principios básicos en que se basa la propuesta de gestión del bosque de oyamel son los siguientes:

- a) Los árboles, como todo ser vivo, cumplen su ciclo (nacen, crecen, se desarrollan, se reproducen y finalmente mueren). Durante el crecimiento de los árboles, las tasas de captura de carbono son inicialmente crecientes, seguidas por tasas que disminuyen gradualmente. El bosque de oyamel y las plantas que constituyen los estratos arbóreo, arbustivo y herbáceo alcanzan su mayor eficiencia para el crecimiento y la captura de carbono en las fases juvenil y adulta (Figura 2).

- b) La madera se produce gracias a la fotosíntesis, y los productos de la madera siguen almacenando carbono mientras dura su ciclo vital (FAO, 2012; Rodríguez *et al.*, 2021). La captura de carbono (CO_2 atmosférico, principal causante del calentamiento global) ocurre únicamente durante el desarrollo de los árboles y se detiene cuando alcanzan su madurez total o cuando mueren.

Figura 2. Ciclo de vida de un árbol de oyamel.

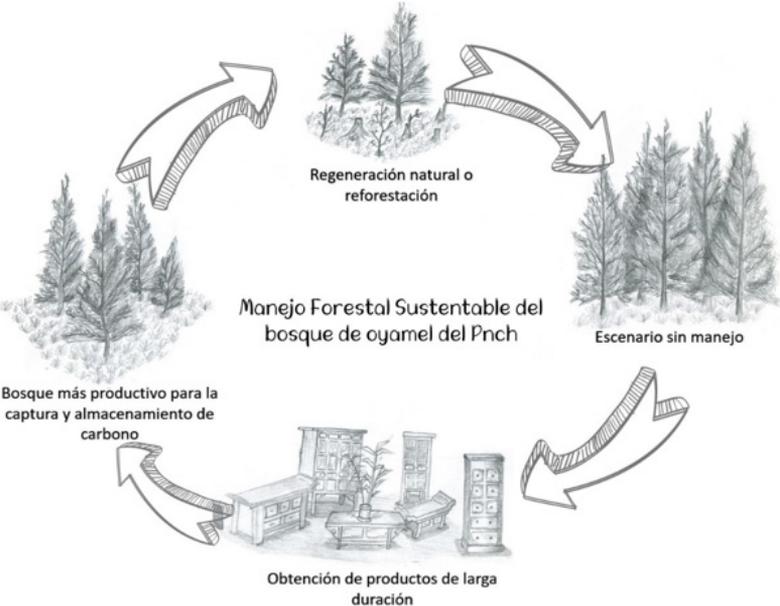


Fuente: elaboración propia.

- c) El bosque de oyamel es un recurso natural renovable con alta capacidad para la captura y almacenamiento de carbono, que puede ser mejorada y perdurar por siempre, con un buen programa de gestión basado en el manejo forestal sustentable durante las diferentes etapas de desarrollo del bosque (Figura 3).

Con la madera obtenida tras la aplicación de tratamientos silvícolas se pueden elaborar productos de larga duración. El carbono contenido en las piezas de madera permanece almacenado por muchos años (Spears, 1999; Rodríguez-Laguna *et al.*, 2021).

Figura 3. Manejo sustentable, en el que se muestra un bosque de oyamel del que se obtienen productos maderables de larga duración y parte de los ingresos económicos se destinan para mejorar la producción de bienes y servicios.



Fuente: elaboración propia.

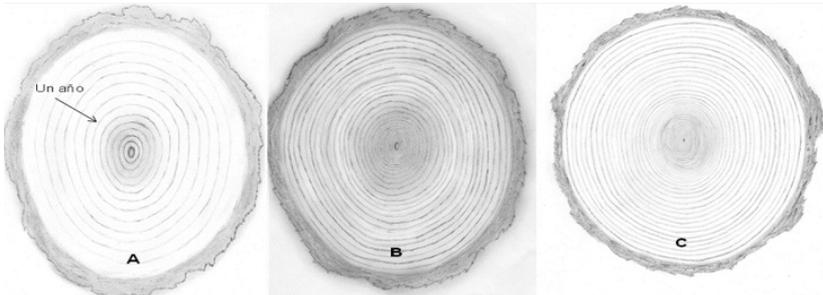
- d) *Abies religiosa* es una especie tolerante que se establece bajo media sombra (Figura 4), por lo que su manejo silvícola es compatible con la conservación de la biodiversidad del bosque.
- e) La falta de manejo del bosque muestra una drástica disminución del crecimiento en biomasa y captura de carbono en los árboles maduros (Figura 5).

Figura 4. Ejemplares de *Abies religiosa* que muestran la necesidad de sombra en etapa de brinzal (izquierda) y un desarrollo favorable directo al sol cuando sobrepasa el estrato arbustivo (derecha).



Fuente: elaboración propia.

Figura 5. Crecimiento en diámetro de los árboles en diferentes condiciones. A, árbol joven con manejo; B, árbol maduro sin manejo; C, árbol sobremaduro sin manejo.

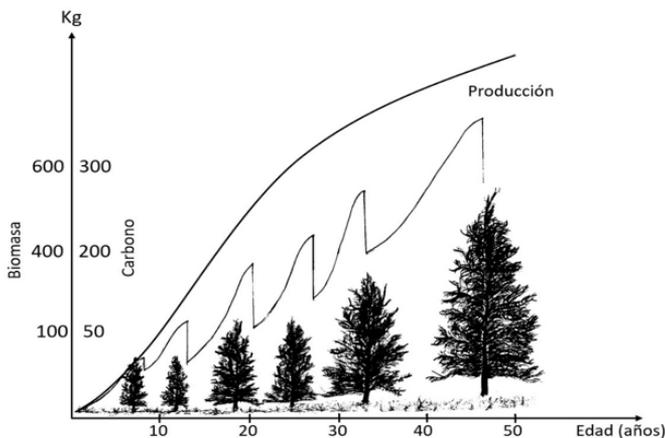


Fuente: elaboración propia.

- f) El bosque de oyamel del Parque Nacional El Chico está constituido en su mayor parte por arbolado viejo (de más de 80 años de edad), algunos con problemas de plagas y enfermedades, cuyos crecimientos e incrementos en volumen y biomasa actualmente son poco significativos, por lo que la captura de carbono en las diferentes estructuras del árbol prácticamente ya no se manifiesta. Estos bosques muestran clara tendencia a morir con el paso del tiempo, por lo que, de llegar a esta situación, los costos para recuperarlos serán muy altos.

Mediante la aplicación del modelo de gestión, cada uno de los escenarios representativos de las condiciones actuales del bosque de oyamel deberán someterse a los tratamientos silvícolas que les correspondan en forma gradual y ordenada hasta lograr convertir el área manejada en un escenario ideal para la captura y almacenamiento de carbono (Figura 6), que sería aquel en el que las masas forestales se mantuvieran dinámicas mediante la incorporación constante de biomasa al suelo, producto de los árboles adultos, mientras se va estableciendo la regeneración natural de las distintas especies y otros individuos jóvenes están en plena actividad fotosintética.

Figura 6. Efectos del manejo silvícola sobre el aumento de biomasa y carbono.



Fuente: elaboración propia.

Implementación del programa

Para cambiar los escenarios actuales del bosque de oyamel a un bosque más eficiente para la captura y almacenamiento de carbono, con base en las observaciones de campo sobre los diferentes grados de conservación, se propone que en el programa de gestión ambiental se realicen las acciones que se describen en las tablas 1, 2, 3 y 4, expuestas a continuación:

Tabla 1. Propuesta de cambio de un escenario de bosque conservado a un bosque renovado.

Escenario actual	Actividades para la transición	Escenario modificado
<p>Bosque conservado</p> <ul style="list-style-type: none"> • Alta densidad de arbolado de oyamel sobremaduro, con poca capacidad de producir semilla • Muchos árboles puntisecos y muertos en pie • Escasa vegetación arbustiva y herbácea • Escasa o nula regeneración natural 	<ul style="list-style-type: none"> • Extracción del arbolado adulto, dando prioridad al arbolado muerto y después al puntiseco con mayor grado de afectación al de menor grado y, finalmente, al de mayor edad. De ser necesario, reforestar con la misma especie en los claros abiertos, procurando plantar los arbolitos bajo la protección de arbustos que funcionen como especies nodrizas o que proporcionen la sombra que requieren los brinzales de oyamel para su establecimiento y desarrollo durante las primeras etapas de crecimiento. 	<p>A corto plazo</p> <p>Bosque menos denso con el establecimiento de hierbas y arbustos en los claros o espacios dejados por los árboles derribados, bajo los cuales se habrá establecido la regeneración natural o se habrán plantado árboles de oyamel.</p> <p>A mediano plazo</p> <p>El renuevo de oyamel y de otras especies ya se habrá establecido plenamente y ya se habrán realizado cortas de espaciamientos para favorecer el crecimiento en diámetro de los arbolitos. Serán programadas las cortas de aclareo cuando la nueva masa pase a la etapa de latizal.</p> <p>A largo plazo</p> <p>La nueva masa forestal se habrá de encontrar en la etapa de latizal. Sus incrementos en diámetro, volumen, biomasa y contenido de carbono serán altos y uniformes debido a que los árboles estarán creciendo sin competencia. Los árboles ya habrán comenzado a producir semillas viables para la regeneración y renovación futura del bosque.</p>

Tabla 2. Cambio de un escenario de bosque medianamente alterado a un bosque renovado.

Escenario actual	Actividades para la transición	Escenario modificado
<p>Bosque medianamente alterado</p> <ul style="list-style-type: none"> • Alta densidad de arbolado de oyamel maduro, con capacidad de producir semilla. • Muchos árboles puntisecos y muertos en pie. • Escasa vegetación arbustiva y herbácea • Escasa regeneración natural o abundante en los claros abiertos. 	<p>Extracción del arbolado adulto dando prioridad al arbolado muerto y después al puntiseco con mayor grado de afectación al de menor grado y, finalmente, al de mayor edad. De ser necesario, reforestar con la misma especie en los claros abiertos, procurando plantar los arbolitos bajo la protección de arbustos que funcionen como especies nodrizas o que proporcionen la sombra que requieren los brinzales de oyamel para su establecimiento y desarrollo durante las primeras etapas de crecimiento.</p>	<p>A corto plazo</p> <p>Bosque menos denso con el establecimiento de hierbas y arbustos en los claros o espacios dejados por los árboles derribados, bajo los cuales se habrá establecido la regeneración natural o se habrán plantado árboles de oyamel.</p> <p>A mediano plazo</p> <p>El renuevo de oyamel y de otras especies ya se habrá establecido plenamente en los claros abiertos y ya se habrán realizado cortas de espaciamientos para favorecer el crecimiento en diámetro de los arbolitos. Serán programadas las cortas de aclareo cuando la nueva masa pase a la etapa de latizal.</p> <p>A largo plazo</p> <p>La nueva masa forestal se habrá de encontrar en la etapa de latizal. Sus incrementos en diámetro, volumen, biomasa y contenido de carbono serán altos y uniformes debido a que los árboles estarán creciendo sin competencia. Los árboles ya habrán comenzado a producir semillas viables para la regeneración y renovación futura del bosque.</p>

Tabla 3. Cambio de un escenario de bosque alterado a un bosque renovado.

Escenario actual	Actividades para la transición	Escenario modificado
<p>Bosque alterado por incendios forestales</p> <ul style="list-style-type: none"> • Muchos árboles muertos en pie • Baja densidad de arbolado de oyamel maduro (con capacidad de producir semilla) • Abundante vegetación arbustiva y herbácea • Abundante regeneración natural bajo los arbustos y hierbas 	<p>Extracción del arbolado adulto utilizando la técnica de derribo direccional, con el fin de evitar dañar lo más posible al renuevo de oyamel establecido. Para el derribo del arbolado adulto se debe dar prioridad al arbolado muerto y después al de mayor grado de afectación al de menor grado y, finalmente, al de mayor edad.</p>	<p>A corto plazo</p> <p>Bosque renovado libre de arbolado adulto. Los arbolitos que hayan resultado dañados por la caída de los árboles adultos ya se habrán saneado y se habrá efectuado un preaclareo para disminuir la densidad de la regeneración natural de oyamel y otras especies asociadas.</p> <p>A mediano plazo</p> <p>El nuevo bosque de oyamel y de otras especies ya se habrá establecido plenamente en las áreas afectadas por los incendios forestales y ya se habrán realizado cortas de espaciamientos para favorecer el crecimiento en diámetro de los arbolitos. Serán programadas las cortas de aclareo cuando la nueva masa pase a la etapa de latizal.</p> <p>A largo plazo</p> <p>La nueva masa forestal se habrá de encontrar en la etapa de latizal. Sus incrementos en diámetro, volumen, biomasa y contenido de carbono serán altos y uniformes debido a que los árboles estarán creciendo sin competencia. Los árboles ya habrán comenzado a producir semillas viables para la regeneración y renovación futura del bosque.</p>

Tabla 4. Cambio de un escenario de bosque de especies exóticas a un bosque renovado.

Escenario actual	Actividades para la transición	Escenario modificado
<p>Bosque con introducción de especies exóticas</p> <ul style="list-style-type: none"> • Baja densidad de arbolado de oyamel maduro, con capacidad de producir semilla • Abundante vegetación arbustiva y herbácea • Densidad alta de árboles de especies exóticas (<i>Cupressus</i> sp., <i>Pinus patula</i>, <i>Eucaliptus</i> sp.) plantadas que amenazan en formar un ecosistema propio. 	<p>Extracción del arbolado adulto utilizando la técnica de derribo direccional, con el fin de evitar dañar lo más posible al renuevo de oyamel establecido en forma natural y arbolitos de especies exóticas plantadas. Para el derribo del arbolado adulto se debe dar prioridad al arbolado muerto y después al de mayor grado de afectación al de menor grado y, finalmente, al de mayor edad.</p> <p>Proponer hacer un aclareo de las especies exóticas para favorecer el establecimiento y desarrollo de la regeneración natural de <i>Abies</i> y otras especies nativas.</p>	<p>A corto plazo</p> <p>Bosque renovado libre de arbolado adulto. Los arbolitos que hayan resultado dañados por la caída de los árboles adultos ya se habrán saneado y se habrá efectuado un preaclareo para disminuir la densidad de especies exóticas plantadas y aumentar la densidad de la regeneración natural de oyamel.</p> <p>A mediano plazo</p> <p>El nuevo bosque de oyamel y de otras especies plantadas ya se habrá establecido plenamente en las áreas afectadas por los incendios forestales y ya se habrán realizado cortas de espaciamientos para favorecer el crecimiento en diámetro de los arbolitos. Serán programadas las cortas de aclareo cuando la nueva masa pase a la etapa de latizal.</p> <p>A largo plazo</p> <p>La nueva masa forestal se habrá de encontrar en la etapa de latizal. Sus incrementos en diámetro, volumen, biomasa y contenido de carbono serán altos y uniformes debido a que los árboles estarán creciendo sin competencia. Los árboles ya habrán comenzado a producir semillas viables para la regeneración y renovación futura del bosque.</p>

Identificación y valoración de impactos ambientales

Como la gestión ambiental es una herramienta que busca integrar las actividades del ser humano en una forma sostenible, logrando una mejor calidad de vida, previniendo y mitigando los impactos ambientales que se puedan generar por dichas actividades, en este proyecto, y como una de las aportaciones al nuevo conocimiento científico, se utilizó por vez primera la matriz modificada de Leopold (1971), con la que se efectuó la identificación, descripción y evaluación de los impactos ambientales que se generarán en cada uno de los escenarios con la implementación del modelo de gestión.

Para identificar y evaluar los impactos ambientales que se encuentran asociados al proyecto en la matriz modificada de Leopold (1971) se relacionó mediante un arreglo de triple entrada, los componentes ambientales susceptibles de ser impactados (eje vertical izquierdo), las actividades generadoras de los impactos en las diferentes etapas del proyecto (eje vertical derecho) y las características de los impactos (eje horizontal).

Para facilitar la identificación, evaluación y valoración de los impactos ambientales, se utilizó la matriz de Leopold modificada por Hernández Muñoz (1980) (código de colores). Según este código, el color verde nos indica que los impactos son nulos o imperceptibles a simple vista; el color amarillo representa un impacto bajo, que es aquel que se manifiesta de manera localizada, es temporal y sus efectos negativos se pueden mitigar o revertir de manera natural o con actividades de bajo costo; un color naranja se refiere a un impacto medio en el que los efectos de las actividades de gestión se notan a simple vista, son extensivos y de mayor duración, pero existen medidas de mitigación con costos moderados a altos; finalmente, se utilizó un color rojo para representar un impacto alto cuando los efectos de las actividades de gestión son extensivos, de larga duración y en algunos casos irreversibles, o cuando los costos de las medidas de mitigación son altos.

Como los impactos ambientales no siempre son negativos, de nuevo se usó la matriz de Leopold modificada por Hernández Muñoz (código de colores) y modificada por Gordillo, agregando los signos positivo y negativo: el signo (+) indica que se trata de un impacto positivo y el signo (-) se usa para impactos negativos (Hernández *et al.*, 2006).

Cambio de escenario de bosque conservado a bosque productivo

Los impactos ambientales que generará la gestión del bosque de oyamel en el cambio de un escenario de bosque conservado a un bosque renovado se muestran en la Figura 7.

De acuerdo con los datos que se muestran en la matriz, los impactos ambientales que puede generar el proyecto de gestión para el “cambio de escenario de bosque conservado a bosque renovado” se muestran a continuación.

El suelo también se verá afectado durante la etapa de operación del proyecto por las actividades de corta, arrime, carga y transporte de la madera por la compactación sufrida por la caída y arrastre de los árboles, lo que ocasionará en forma indirecta impermeabilidad de los suelos y, si no se tienen los cuidados necesarios, provocará erosión en las partes sueltas de terrenos con pendientes fuertes.

Figura 7. Matriz de identificación y valoración de impactos ambientales de Leopold (1971) modificada por Hernández *et al.* (2006) para analizar por vez primera con esta metodología el cambio de escenario de bosque conservado a bosque renovado.

Matriz de impacto ambiental			Cambio de escenario bosque conservado a escenario bosque renovado												
			OPERACIÓN							MANTENIMIENTO					
			ACTIVIDADES	MARQUEO	DERRIBO	TROCEO	ARRANQUE	CARGA	EXTRACCIÓN DE PRODUCTOS	CONTROL DE DESPERDICIOS	CAMINOS	BRECHAS CORTA FUEGO	CERCADO		
FACTORES AMBIENTALES															
SUBSISTEMAS	FACTOR	COMPONENTE													
FÍSICOS	SUELO	COMPACTACIÓN													
		EROSIÓN													
		CONTAMINACIÓN													
	AGUA	CALIDAD													
		RECARGA													
		DRENAJE													
	AIRE	CALIDAD													
		CORRIENTES													
		RUIDO													
BIOLÓGICOS	FLORA	DIVERSIDAD													
		RIESGOS DE INCENDIO													
		ABUNDANCIA													
	FAUNA	DISTRIBUCIÓN													
		ABUNDANCIA													
		HABITAT													
MEDIO PERCEPTUAL	PAISAJE	CUALIDADES ESTÉTICAS													
SOCIOECONÓMICOS Y CULTURALES	POBLACIÓN	GENERACIÓN DE EMPLEOS	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
		SERVICIOS AMBIENTALES													
		NIVEL DE INGRESOS	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
		BIENESTAR													
		RIESGOS													

Los camiones utilizados para la extracción de la madera emiten gases contaminantes a la atmósfera, situación que se agrava por falta de mantenimiento del vehículo (afinaciones, reparación de fugas de aceite y lubricantes).

El mantenimiento de caminos y brechas de saca, carga y transporte de la madera afectará en forma directa algunas características de los suelos sobre los cuales se han construido las brechas y caminos. El tránsito de los camiones madereros compactará el suelo haciéndolo impermeable, por lo que el agua de lluvia tenderá a escurrir sobre esta superficie, contribuyendo

en forma indirecta a la erosión de las partes sueltas del terreno si no tienen las cunetas y obras de retención de suelo adecuadas (sobre todo en las áreas de lomerío).

Estas actividades también pueden causar, en forma indirecta y temporal, contaminación de los suelos por derrame de líquidos, combustibles y desechos sólidos (diésel, aceite y recipientes de plástico). Las cualidades estéticas del terreno se pueden ver afectadas durante la construcción de obras de control de erosión de suelo por los desperdicios derivados de la construcción (cemento, cal, fierro, entre otras).

El área de captación de agua de lluvia y la cantidad de agua captada se verá afectada en una pequeña parte y en forma temporal por las actividades relacionadas con la remoción de vegetación. En el caso del área de donde se extraerán los árboles adultos, la superficie quedará desprovista de la cubierta vegetal solo por unos meses debido a que la elevada cantidad de precipitación pluvial y la humedad relativa alta que se registran en la zona a lo largo de casi todo el año favorecerán el establecimiento de la cubierta herbácea y la regeneración natural de *Abies religiosa* durante la temporada de lluvias. Esto, en un futuro, ayudará a incrementar la efectividad del área de captación de agua de lluvia.

En lo que respecta a los factores biológicos, la flora del lugar en sus diferentes estratos se verá afectada por el desarrollo del proyecto de gestión con las actividades de derribo de algunos individuos del estrato arbóreo y la construcción de carriles de arrime donde la vegetación se eliminará en su totalidad. En la limpieza de brechas de saca y brechas cortafuego, la cubierta vegetal se afectará en forma temporal, mientras se extrae la madera del área, y durante el periodo de sequía para el caso de las brechas cortafuego. La fisonomía de los rodales se modificará en forma temporal debido a la reducción de la densidad y apertura del dosel superior del bosque.

En general, las especies vegetales se verán beneficiadas con la apertura y mantenimiento periódico de las brechas cortafuego en las áreas bajo manejo forestal, con lo cual las áreas en proceso de renovación se protegerán de los incendios forestales, al igual que todo el Parque.

La fauna silvestre que existe en la zona se verá afectada con la ejecución de algunas actividades, como rehabilitación de caminos, construcción de

cunetas, brechas de saca, carriles de arrime, corte, carga y transporte. Dichas actividades, además de alterar el área por la eliminación de la cubierta vegetal, ocasionarán ruidos y crearán barreras físicas que pueden limitar el desplazamiento de la fauna silvestre, principalmente la terrestre. Con la apertura de las áreas a renovar mediante el método silvícola de selección, se modificarán en forma parcial el paisaje del lugar, las zonas de reproducción, refugios y corredores tanto de la fauna terrestre como de las aves que emigrarán temporalmente a las áreas aledañas.

Es posible que, en forma general, la instrumentación y ejecución del proyecto de aprovechamiento de arbolado en sus diferentes etapas genere controversias entre la población por la falta de cultura forestal o conocimiento sobre los cuidados que se tendrán que llevar a cabo para lograr el establecimiento y desarrollo de las nuevas masas de oyamel y la conservación de los recursos asociados al bosque.

En el aspecto económico, la instrumentación y ejecución del proyecto impactará en forma positiva a la población al generar fuentes de empleo y beneficios económicos para los habitantes de la zona durante todo el año, ayudando con esto a reducir la alta emigración, particularmente entre los jóvenes, a las ciudades y zonas urbanas.

Cambio de escenario de bosque medianamente alterado a bosque productivo

Los impactos ambientales serán positivos debido a que se cuenta con regeneración natural bajo la cubierta arbustiva y herbácea, producto de la apertura natural de claros; sin embargo, pueden existir algunos árboles adultos dentro de dichos claros que será necesario extraer para liberar al nuevo bosque de la competencia y favorecer su desarrollo. La presencia de arbolado joven y adulto contribuirá a disminuir el impacto visual.

Los impactos más notorios serán sobre el renuevo de oyamel o vegetación aledaña que podrá ser afectada con el derribo de los árboles adultos y la extracción de la madera. El suelo se compactará en los sitios de caída de los árboles y en las áreas de carga. La erosión del suelo será mínima debido a que los claros abiertos ya contarán con regeneración natural establecida.

Cambio de escenario de bosque afectado por incendios forestales a bosque productivo

Los impactos ambientales negativos mayores se presentan en estos sitios con los incendios forestales, pues a causa del fuego se consumen la vegetación herbácea y arbustiva y un gran número de árboles adultos, con lo que el paisaje se modifica drásticamente y los efectos a la fauna silvestre son sumamente fuertes: destruyen madrigueras, nidos y mueren crías, así como algunos individuos mayores que no logran escapar del fuego.

El suelo queda descubierto, por lo que la erosión es manifiesta en los sitios con pendientes fuertes. Con el fuego se consume la materia orgánica y disminuye la fertilidad del sitio, pero esta situación también favorece que las semillas provenientes de los árboles que logran sobrevivir al siniestro estén en contacto directo con el suelo y puedan germinar rápidamente, estableciéndose el renuevo de oyamel y de otras especies en densidades altas.

A partir del escenario alterado con alta densidad de renuevos se hace la identificación y valoración de los impactos ambientales producidos con el cambio de escenarios para hacer más eficiente el bosque para la captura y almacenamiento de carbono.

El derribo de los árboles muertos en pie y de los individuos adultos que lograron sobrevivir al siniestro afectará de manera directa a algunos árboles jóvenes que se han establecido en el sitio. La caída de los árboles adultos compactará el suelo del sitio de caída, y el arrastre de la trocería causará la remoción del suelo, favoreciendo la erosión hídrica. La carga y transporte también compactará el suelo.

El impacto visual será bajo debido a que el renuevo de oyamel y de otras especies se ha establecido en altas densidades, con lo que se cambiará el aspecto de un bosque afectado por los incendios a un bosque renovado.

Cambio de escenario de bosque alterado con introducción de especies exóticas a bosque productivo

Después de que se presenta un incendio forestal, el panorama es desolador y generalmente lo que primero se piensa es que todo el arbolado adulto morirá de forma inmediata o con el paso de los días tras el ataque de plagas o

enfermedades y que con ello ya no existirán semillas para el establecimiento de la regeneración natural del oyamel, por lo que se recurre a reforestar los sitios afectados con especies exóticas que se adapten y desarrollen rápidamente para repoblar las áreas afectadas. Generalmente algunos de los árboles adultos de oyamel y otras especies nativas logran sobrevivir y dispersan semillas que germinan bajo la cobertura de los árboles plantados, por lo que con el paso del tiempo las densidades del renuevo son muy altas. Pero en realidad ese no es el verdadero problema. Más bien se tiene que analizar el efecto futuro de las especies introducidas sobre la diversidad de especies nativas y del oyamel de esta área natural protegida (ANP). Entre las especies exóticas que se han venido utilizando para repoblar las áreas afectadas por los incendios se encuentran *Cupressus guadalupensis* y *Pinus patula*; esta última es la que más preocupa debido a que en las áreas donde la vegetación es consumida por el fuego, con el aumento de la temperatura, los conos serótimos de los árboles adultos abren y dispersan grandes cantidades de semillas que germinan con las lluvias y se establecen los renuevos satisfactoriamente debido a que *Pinus patula* es una especie heliófila sumamente adaptada a los incendios forestales. Aunque el oyamel se puede establecer bajo la cubierta de los pinos, cuando la masa llega a la etapa del brinzal se comienza a manifestar una alta competencia por luz y nutrientes del suelo, con lo que muchos de los árboles de las especies nativas llegan a ser suprimidas y mueren por la falta de luz que requieren en estas etapas de desarrollo para realizar la fotosíntesis. Sin embargo, los árboles de *Pinus patula* seguirán creciendo y, como es una especie precoz para la producción de conos y semillas, seguirán repoblando algunos claros que lleguen a abrir tanto en las áreas inicialmente afectadas por los incendios como en las alledañas, con lo que irá ganando terreno y desplazando al oyamel para formar con el tiempo bosques puros de pino.

Aunque *Cupressus* se ha adaptado a los sitios siniestrados, tiene menor capacidad que *Pinus patula* para repoblar los sitios afectados y requiere de suelos más profundos.

Medidas de mitigación

Para los escenarios a los que les corresponda se deben considerar las medidas de mitigación siguientes:

- Para disminuir la compactación del suelo, se deberá realizar el derribo del arbolado adulto en forma direccional y ordenada, dirigiendo su caída hacia los caminos, senderos o zonas libres de vegetación. No se deberán abrir nuevos caminos para la extracción de las trozas, por lo que, de ser necesario, la madera se extraerá medianamente aserrada con la ayuda de animales. Para evitar la formación de canales erosivos, la madera o trozas se deberán extraer del sitio de forma transversal a la pendiente del terreno y, para controlar la erosión del suelo, los desperdicios derivados de los árboles derribados o trozas que no puedan ser extraídas se acomodarán en forma perpendicular a la pendiente del terreno. Con el fin de evitar la contaminación de suelo y agua, se deberán evitar los derrames de aceites y combustibles al suelo y se extraerán de las áreas de corta los residuos sólidos (envases de aceites, envases de plásticos, entre otros).
- Como medida de protección a la flora, se deberá evitar derribar árboles que no estén marcados por el responsable técnico de la ejecución del proyecto, aplicar la técnica de derribo direccional para reducir los daños a la vegetación del área bajo manejo silvícola, evitar realizar carriles de arrime demasiado amplios para la extracción de la trocería y evitar quemar los desperdicios que se generen.
- Para el control de las especies exóticas (*Pinus patula* y *Cupressus guadalupensis*) que se han introducido y establecido en las áreas siniestradas por los incendios forestales, durante la aplicación de los preaclareos se deberán eliminar los árboles de estas especies que cercanos a individuos de las especies nativas (*Abies religiosa*, *Quercus* sp. y otras especies), con el fin de reducir su densidad y favorecer el desarrollo de la diversidad de las especies nativas. Durante la aplicación de los aclareos se deberá seguir con la prioridad de extraer durante cada intervención el mayor número posible de árboles exóticos, principalmente aquellos que ya estén produciendo frutos y semillas viables. Cuando esta última actividad no se pueda realizar porque en algunos sitios sean los únicos árboles que se han establecido, entonces se deberán aplicar podas de ramas que contengan frutos y semillas.

- Para el caso de la protección a la fauna silvestre, se respetarán los árboles que sea necesario extraer que presenten madrigueras o nidos y durante la aplicación de preclareos y aclareos se dejará en el sitio un número considerable de árboles y arbustos productores de frutos y semillas que sirven de alimento para la fauna silvestre.
- Cuando sea necesario aplicar un producto químico para el control de alguna plaga o enfermedad presente en los árboles a extraer, se buscará que este sea un producto permitido y lo menos dañino posible para el ambiente.
- Se deberá evitar establecer campamentos de los trabajadores dentro de las áreas bajo manejo con el fin de evitar ahuyentar a la fauna silvestre y contaminar con basura.
- Los trabajadores deberán abstenerse de llevar perros a las áreas de trabajo ya que estos pueden consumir huevos o crías o ahuyentar a la fauna silvestre.
- Las áreas de trabajo deberán ser pequeñas extensiones y evitar que sean continuas, con el fin de que no se concentren los ruidos de las motosierras y camiones madereros en una sola zona.
- Asimismo, los trabajos se realizarán durante las horas del día, evitando afectar cualquier actividad que pueda molestar a la fauna durante la noche.
- Los trabajadores deberán de abstenerse de extraer de las áreas de trabajo y del ANP en general cualquier ejemplar de flora y fauna, o algunas de sus partes para el caso de la vegetación.
- Para reducir las afectaciones al paisaje, la aplicación de los tratamientos de gestión integral para cada escenario se efectuará en áreas discontinuas, evitando generar superficies compactas demasiado grandes.
- Durante la extracción y transporte de los productos hacia los aserraderos o talleres de carpintería, los camiones madereros deberán portar mantas con leyendas en las que se indique el objetivo de la gestión integral ambiental del bosque de oyamel.
- Como una medida para beneficiar a los pobladores de la región, la madera que se pueda extraer de las áreas bajo manejo de los distintos

escenarios se utilizará para la elaboración de vigas y otras piezas de madera para la construcción de cabañas y muebles de larga duración (donde el carbono quedará almacenado por muchos años), con lo cual se crearán fuentes de empleo.

Para que la aportación de los bosques a la construcción de un futuro sostenible sea objeto de mayor reconocimiento y aceptación, hay que hacer mucho para estimular cambios en la imagen que tienen las autoridades y el público en general de los bosques y la población que depende de ellos (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 2012), por lo que se deberá implementar un programa permanente de educación ambiental en el que se difunda la necesidad de renovar el bosque de oyamel del Parque Nacional El Chico para aumentar su eficiencia en la captura de carbono y la provisión de otros servicios ambientales, pero sobre todo para garantizar su permanencia en beneficio de la población actual y las futuras generaciones.

Referencias

- Hernández-Muñoz, A., Hernández-Lehmann, P., y Gordillo-Martínez, A. J. (2006). *Manual para la evaluación de impactos ambientales*. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Madrid; INNCIVE.
- Instituto Nacional de Ecología (INE) (1995). *Desarrollo forestal sustentable: Captura de carbono en las zonas tzeltal y tojolabal del estado de Chiapas. Cuadernos de trabajo 4*.
- Leopold, L. B., Charke, F. E., Hanshaw, B. B., y Balsley, J. R. (1971). A Procedure for Evaluating Environmental Impact. U. S. *Geological Survey*. Circular 645 (1-13).
- Maini, J. S. (1992). Desarrollo sostenible de los bosques. *Unasylva*, 169(43), 3-8.
- Manzanilla-Quñones, U., Martínez-Adriano, C. A., y Aguirre-Calderón, O. A. (2019). Historical and Current Spatial Modeling of the Sacred Fir (*Abies religiosa* [Kunth] Schltdl. & Cham.) in the Trans-Mexican

- Volcanic Belt. *Revista Chapingo: Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 25(2), 201-217.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) (2010). *La gestión de los bosques ante el cambio climático*.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) (2012). *El estado de los bosques del mundo*.
- Pompa-García, M., y Sígala-Rodríguez, J. Á. (2017). Variation of Carbon Uptake from Forest Species in Mexico: A Review. *Madera y bosques*, 23(2), 225-235. DOI: <https://doi.org/10.21829/myb.2017.2321512>.
- Razo-Zárate, R. (2013). *Gestión integral ambiental del bosque de oyamel del Parque Nacional "El Chico", Hidalgo, México* [tesis de doctorado]. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
- Razo-Zárate R., Gordillo-Martínez, A. J., Rodríguez-Laguna, R., Maycotte-Morales, C. C., y Acevedo-Sandoval, O. A. (2013). Escenarios de carbono para el bosque de oyamel del Parque Nacional El Chico, Hidalgo, México. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 9(1), 17-21.
- Razo-Zárate, R., Gordillo-Martínez, A. J., Rodríguez-Laguna, R., Maycotte-Morales, C. C., y Acevedo-Sandoval, O. A. (2013b). Coeficientes de carbono para arbustos y herbáceas del bosque de oyamel del Parque Nacional El Chico. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 6(31), 58-67.
- Rodríguez-Laguna, R., Palacios-Romero, A., Razo-Zárate, R., Delgado-Corral, S. J., y Goche-Telles, R. (2021). Ciclo del carbono en un bosque con aprovechamiento forestal en Zacualtipán, Hidalgo. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 5(4), 3989-3998. DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v5i4.598.
- Spears, J. (1999). *Sustainable Forest Management: An Evolving Goal*. The World Bank.



Energía y cambio climático: fundamentos y alternativas

*César Abelardo González Ramírez
Fabiola Velázquez Alonso*

Introducción

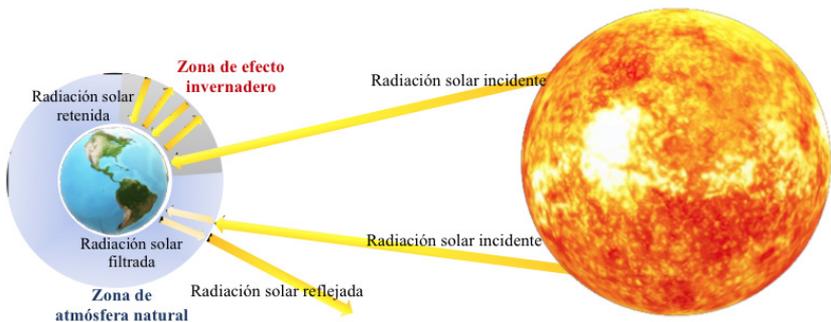
En este capítulo se revisan las características de los gases de efecto invernadero (GEI) y su aportación al fenómeno del calentamiento global. Además, se analiza la herramienta metodológica del balance de energía como forma de aplicar el conocimiento para vislumbrar los sectores energéticos en los que es posible aplicar alternativas tecnológicas de mayor impacto para la disminución de las emisiones de los GEI y así mitigar las posibles consecuencias del calentamiento global. El objetivo de este capítulo es motivar la aplicación del

conocimiento para analizar alternativas tecnológicas viables para mejorar la sustentabilidad de las actividades humanas. Los temas analizados son: el calentamiento global, los GEI, el sector energético, el balance energético y las alternativas tecnológicas para cada subsector.

El calentamiento global

El sector energético, que sustenta los diversos procesos de desarrollo de la sociedad, conforma una de las actividades humanas que genera los mayores impactos en varios ámbitos, como el ambiental y el crecimiento tecnológico, económico y social. El cambio climático es uno de los fenómenos, en la historia del planeta, que ha concentrado la atención de la humanidad en los últimos años. La progresión del fenómeno y su asociación a las actividades humanas, al identificar el efecto invernadero ligado a las emisiones de gases antropogénicos que afectan la composición química natural de la atmósfera, disminuyendo su capacidad protectora contra la intensidad de la radiación solar que incide sobre el planeta, además de impedir una dispersión adecuada del reflejo de la energía solar hacia el exterior del planeta, acumular esta energía dentro de nuestra atmósfera, incrementar la temperatura promedio global en el planeta, propiciar el calentamiento global, acrecienta con ello la variabilidad meteorológica con la ocurrencia más frecuente de eventos climáticos de índole catastrófica (Figura 1).

Figura 1. Representación esquemática del fenómeno del efecto invernadero que causa el calentamiento global y el cambio climático.



Fuente: elaboración propia.

La figura anterior representa la forma en la que se puede diferenciar el efecto protector de la atmósfera natural que refleja la energía solar y la dispersa filtrando cantidades moderadas de energía, acumulables en el entorno planetario, mientras que en las zonas atmosféricas afectadas por la acumulación de GEI se representa una penetración directa de la radiación solar incidente y el efecto mencionado, en el que la energía solar es retenida dentro de la atmósfera, causando el calentamiento global y los efectos meteorológicos relacionados con el cambio climático. Por lo tanto, el cambio climático es un fenómeno netamente energético y se requieren transformaciones significativas del sector energético para lograr la mitigación del cambio climático (Cronin *et al.*, 2018, p. 79).

Los gases de efecto invernadero (GEI)

Para cuantificar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) (de origen antropogénico) se han identificado los tipos de gases y las fuentes principales que los generan, de acuerdo con lo que indica el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés). Se muestran en la Tabla 1.

Cada uno de los GEI es generado por algún proceso energético, ya sea de combustión, de enfriamiento o de transformación química. Existen distintas actividades humanas que aprovechan estos procesos energéticos, entre las que se pueden mencionar salud, movilidad, alimentación, vivienda y producción de satisfactores manufacturados, entre otras.

Tabla 1. Principales gases de efecto invernadero listados por el IPCC.

Nombre del GEI	Fórmula o abreviatura	Fuentes principales de emisión
Bióxido de carbono	CO ₂	Combustibles fósiles, procesos industriales, transporte y quema forestal.

Monóxido de carbono	CO	Combustibles fósiles, procesos de urbanización, transporte y quema forestal.
Metano	CH ₄	Fuentes agrícolas y residuales, transporte, procesos de urbanización, quema forestal, fermentación entérica del ganado y residuos.
Compuestos orgánicos volátiles distintos al metano	COVDM	Combustibles fósiles, fuentes agrícolas, transporte, procesos industriales y de urbanización.
Monóxido de nitrógeno	N ₂ O	Combustibles fósiles, procesos industriales, fuentes agrícolas, transporte y uso de fertilizantes.
Óxidos de nitrógeno	NO _x	Combustibles fósiles, quema forestal y procesos industriales y urbanos.
Bióxido de azufre	SO ₂	Procesos industriales y de urbanización.
Fluoro carbonos	HFC	Procesos industriales de refrigeración y enfriamiento.
Clorofluorocarbonos	HCFC	

Fuente: elaboración propia con información del Programa Estatal de Acción ante el Cambio Climático de Hidalgo (Otazo-Sánchez *et al.*, 2013, p. 47).

La búsqueda de procesos con cero emisiones ha motivado investigaciones que alcanzan escenarios de largo plazo y que cumplan con políticas energéticas (De Angelo *et al.*, 2021, p. 1). Acorde con lo que marca el IPCC, cada GEI tiene un diferente potencial de calentamiento en su contribución al fenómeno del efecto invernadero y el calentamiento global que propicia el cambio climático; el factor unitario es el potencial de calentamiento del dióxido de carbono, y el resto de los GEI referidos son a un múltiplo estimado en unidades de masa del GEI de referencia, que es el bióxido de carbono, equivalente (CO_{2eq}). Este tiene los valores de escala que se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Potencial de calentamiento de cada uno de los GEI listados.

GEI	Potencial de calentamiento	GEI	Potencial de calentamiento
CO ₂	1	N ₂ O	310
CO	No reportado	NO _x	No reportado
CH ₄	21	SO ₂	No reportado
COVDM	No reportado	HFC/HCFC	1,300-11,700

Fuente: elaboración propia con información del Programa Estatal de Acción ante el Cambio Climático de Hidalgo (Otazo-Sánchez *et al.*, 2013, pp. 217-221).

El potencial de calentamiento de cada GEI se determina individualmente y significa su equivalencia de retención de la energía solar incidente respecto de la estimada para el bióxido de carbono. El potencial de calentamiento es una función de su interacción con la radiación solar y su permanencia en la capa atmosférica. Los factores de potencial de calentamiento permiten unificar la estimación de los GEI en las unidades de masa del bióxido de carbono equivalente, lo que facilita y estandariza los cálculos en los inventarios de GEI a nivel local, estatal, nacional, continental y global, lo que hace comparativos y complementarios los reportes que ayudan a determinar el valor de elevación de la temperatura global que sirve para construir los escenarios de cambio climático.

El sector energético

Algunas de las actividades principales que se relacionan con el sector energético son las siguientes:

- Industria extractiva
- Producción de combustibles
- Producción de energía eléctrica
- Transporte
- Industria química y de transformación
- Industria cementera
- Aprovechamiento de la biomasa forestal

- Industria de biocombustibles
- Industria de las energías alternativas

Dichas actividades constituyen solamente algunos de los ejemplos más representativos del sector energético. Derivados de ellos son otros sectores relativos a la manufactura, en diversos ámbitos, que contribuyen a la economía y al desarrollo de las sociedades; sin embargo, como un efecto colateral de sus beneficios a la humanidad se encuentra la generación de GEI que propician el fenómeno del calentamiento global. Aun cuando se podría pensar que la supresión de dichas actividades permitiría mitigar los efectos del cambio climático, existe la disyuntiva de satisfacer la demanda de satisfactores y atenuar el incremento de la temperatura global y la recurrente aparición de eventos meteorológicos. El uso de herramientas de modelación energética contribuye a la toma de decisiones orientadas al desarrollo sustentable de los sistemas energéticos (Splitter *et al.*, 2019, p. 1)

El análisis profundo del comportamiento del sector energético es de gran importancia para poder caracterizar la actividad, manteniendo un sistema de monitoreo y evaluación permanente que ayude a estimar la generación de GEI, pues con ello se aporta información para el desarrollo de alternativas tecnológicas que mitiguen los efectos del cambio climático, derivados de las emisiones de GEI del sector energético, para vislumbrar mejores escenarios de adaptación basados en el conocimiento y en el desarrollo científico y tecnológico, integrando opciones con viabilidad económica, social y ambiental. Basado en el análisis del *Balance Nacional de Energía 2020* (Sener, 2021), en este trabajo se clasifica el sector energético en los siguientes subsectores:

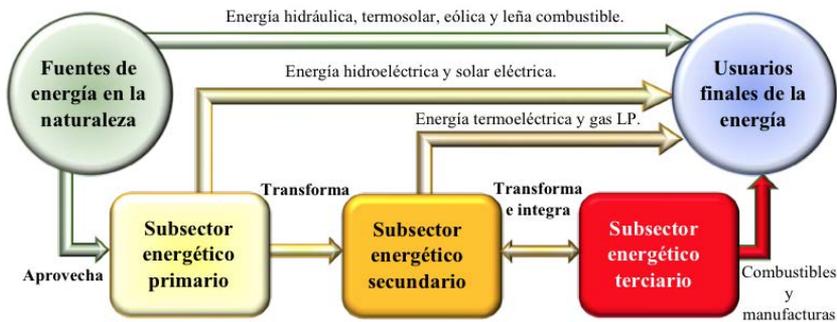
- *Subsector energético primario*: es aquel en el que se aprovechan los recursos naturales de manera directa para su transformación o distribución en formas de energía aprovechables. Algunos ejemplos son: extracción de petróleo, extracción y transporte de gas natural, aprovechamiento de leña combustible, energía hidráulica e hidroeléctrica, geotérmica, solar y eólica, entre otras formas de energía.
- *Subsector energético secundario*: en este se aprovechan formas de energía primaria para transformarlas en otras formas de energía que resultan aprovechables de manera más sencilla para los usuarios finales. Algunos

ejemplos son: industria de la refinación petrolera, industria petroquímica, energía termoeléctrica, industria de biocombustibles derivados, industria manufacturera y producción de hidrógeno, entre otras.

- *Subsector energético terciario:* para este sector se consideran las actividades de aprovechamiento de la energía y algunas otras formas de integración que permiten incrementar la eficiencia con la que se utilizan las diversas fuentes de energía. Entre los ejemplos a destacar están la industria del transporte, la industria cementera, los sistemas de cogeneración y de ciclo combinado, el aprovechamiento de residuos, la industria de transformación, los sistemas de almacenamiento de energía, los sistemas de iluminación y el aprovechamiento residencial y comercial de la energía.

La forma en la que interactúan los subsectores energéticos se presenta en la Figura 2.

Figura 2. Representación esquemática de la interacción entre los subsectores energéticos.



Fuente: elaboración propia.

Las formas en las que se acoplan los subsectores energéticos para proveer los insumos que demanda la sociedad tienen como base principal la disponibilidad de los recursos naturales, por lo que su aprovechamiento sustentable permitirá extender por muchos años su viabilidad para nuestras generaciones futuras. El desarrollo y avance tecnológico ha agregado mayor

competitividad a fuentes de energía que anteriormente no eran tan significativas, además de que ha permitido combinar diferentes formas de energía para optimizar su uso e incrementar la eficiencia energética. Un ejemplo claro de estos avances es el uso actual de vehículos híbridos y eléctricos.

Tradicionalmente, la industria de la refinación petrolera ha sido el soporte principal de la economía en nuestro país. De ahí la importancia de su crecimiento en los aspectos científicos y tecnológicos que la rigen, mediante una mayor capacitación de expertos nacionales que contribuyan a incrementar la rentabilidad de dicha industria. Sin desarrollo científico y tecnológico resulta inconsistente esperar soberanía energética basada únicamente en el aprovechamiento de los recursos naturales no renovables con los que cuenta la nación.

Figura 3. Imágenes de un reactor de reformación catalítica de regeneración continua (CCR) (a), una torre de regeneración catalítica (b) y de un reactor fluidizado de *cracking* catalítico (FCC) para la producción de gasolina en refinerías petroleras (c).



Fuente: fotografías propias.

Los procesos de transformación de hidrocarburos juegan un papel preponderante en la producción de combustibles derivados del petróleo. Por

esta razón, el estudio de los procesos catalíticos resulta relevante para optimizar los procesos de producción e incrementar su rentabilidad. La dependencia tecnológica que tienen diversos países para lograr la refinación eficiente de su petróleo los coloca en una posición difícil para alcanzar condiciones que mejoren su seguridad energética; de ahí que se vean en menor posibilidad de cumplir con los acuerdos globales de disminución de emisiones de GEI y puedan colaborar de manera más activa a la mitigación del cambio climático.

El papel de las universidades y de los centros de investigación, a nivel mundial, queda definido con la formación de expertos científicos y desarrolladores tecnológicos que mejoren el posicionamiento estratégico de la industria petrolera. Asimismo, es necesario apoyar la transición desde la economía basada en la energía hacia la economía basada en el conocimiento a fin de lograr el desarrollo sustentable y mitigar los efectos del cambio climático mediante la adaptación humana a los escenarios futuros del fenómeno. En la Figura 4 se muestra la imagen de la primera planta piloto de reformación catalítica de naftas que se instala en el continente americano, fuera de las instalaciones de las empresas proveedoras de catalizadores, que justamente se encuentra en la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH) y constituye un proyecto representativo de lo que se ha descrito.

Figura 4. Imagen de la primera planta piloto de reformación catalítica de naftas de Latinoamérica, instalada en la UAEH: Línea de recuperación de productos (a) y sistema de reactores en serie (b).



(a)

(b)

Fuente: fotografías propias.

El balance energético

Un método ampliamente utilizado para conocer la situación energética de un municipio, estado o país es precisamente el balance energético. Para elaborarlo se requiere conocer la generación, transformación y consumo de energía del sistema político-social en el que se circunscribirá el análisis. Por ello es importante tomar en cuenta sus exportaciones e importaciones de energía, así como las tasas de intercambio regional en un contexto que relacione los flujos de energía entrantes y salientes, con lo que será posible estimar la condición de productor o consumidor energético neto del sistema bajo estudio. Los principales elementos de un balance energético (Programa Estatal de Acción ante el Cambio Climático de Hidalgo (Otazo-Sánchez *et al.*, 2013, pp. 65-81) son los siguientes:

- Introducción y definición de objetivos
- Análisis del contexto energético
- Estimación de indicadores energéticos
- Oferta y demanda interna de energía
- Intercambio regional de energía primaria
- Producción bruta de energía secundaria
- Intercambio regional de energía secundaria
- Consumo neto de energía
- Consumo energético final y sectorizado
- Matrices y diagramas finales del balance de energía

Con cada uno de los elementos del balance de energía es posible determinar las actividades humanas y subsectores energéticos desagregados que consumen, producen o transforman la energía, con lo que se genera un cúmulo de información útil para identificar las oportunidades de mitigación y adaptación al cambio climático.

Uno de los beneficios que se obtienen de la elaboración de un balance energético es la valoración de alternativas tecnológicas, con mayor potencial de disminución de las emisiones de GEI, que sean viables para el contexto social, económico y ambiental del sistema que se estudia.

Para contextualizar la situación energética del entorno a evaluar, se sugiere realizar la identificación cualitativa de los subsectores y el tránsito

de energéticos de importación, generación, transformación y exportación, como se ilustra en la Figura 5.

Mediante el análisis inicial y contextualizado del entorno se establece la situación energética y participación de un sistema local dirigido hacia un conjunto superior de carácter estatal, regional, nacional, internacional o global. Analizando la participación de los sistemas locales en un entorno global es como se estiman las interacciones energéticas que les definen un rol activo tanto en la participación energética como en la generación de emisiones de GEI, además de valorar su contribución al cambio climático. El balance de energía contempla una línea base temporal de información con la que se refiere la recopilación periódica de datos (normalmente se utilizan bases de datos anualizadas) y se actualiza al año más reciente con reportes disponibles.

Figura 5. Representación esquemática de las importaciones/exportaciones de energía de un sistema político-social en estudio, considerando sus procesos internos de generación, transformación y consumo de energía primaria y secundaria, así como el uso eficiente y la integración energética.



Fuente: elaboración propia.

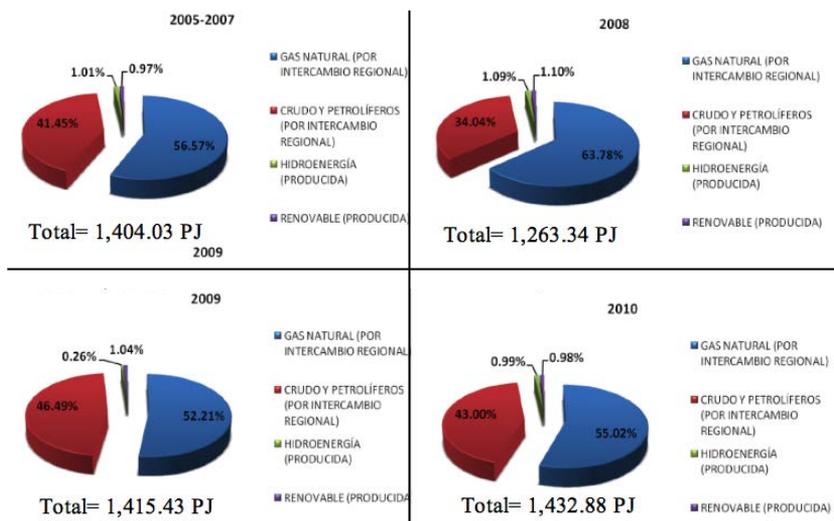
Para la estimación de indicadores energéticos es necesario incluir variables que se combinen en el cálculo de parámetros indicativos, tales como producto interno bruto (PIB) del sistema político-social, intensidad energética (IE), consumo energético per cápita (CE) y relación entre la producción y la oferta interna bruta (RPOI), además del indicador anualizado de eficiencia energética (EE), expresado en valor porcentual.

La oferta y la demanda internas de energía primaria se estiman utilizando los valores de producción interna y de intercambio regional con otros sistemas político-sociales con los que comparten los recursos energéticos primarios. Además, se consideran los sistemas de donde se reciban insumos energéticos primarios y se les devuelven otros productos energéticos primarios o secundarios. Existen entidades que juegan diversos roles, de acuerdo con su participación en un entorno regional energético, por ejemplo:

- Entidad productora neta de energía
- Entidad consumidora neta de energía con actividad transformativa (llevar formas de energía primaria a formas de energía secundaria)
- Entidad consumidora neta de energía sin actividad de transformación

Debido a las limitaciones termodinámicas de eficiencia en los procesos de transformación de energía, no puede tenerse una entidad productora neta de energía secundaria ya que para lograr la transformación de los energéticos siempre se va a requerir llevar a cabo los procesos con un mayor consumo de energía primaria del que se obtiene al transformar al energético secundario. Un ejemplo de los resultados de un balance de energía para estimar el consumo y la oferta bruta del estado de Hidalgo se presenta en las figuras 6 y 7.

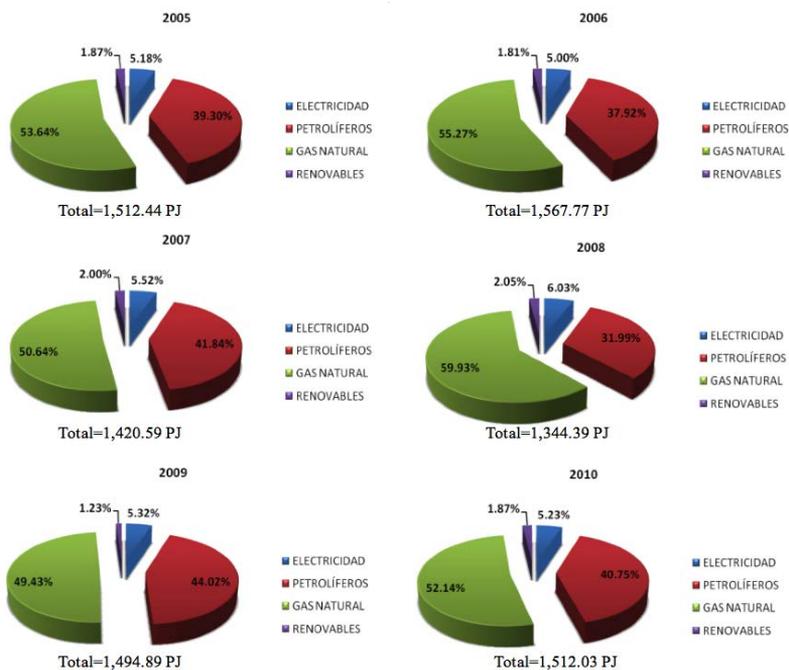
Figura 6. Oferta interna bruta del estado de Hidalgo de 2005 a 2010 (PJ = Petajoules).



Fuente: elaboración propia.

Estimando la diferencia entre la oferta y el consumo de energía se puede determinar la situación energética de una entidad. En el ejemplo que se muestra (ver las figuras 6 y 7) se verifica que el estado de Hidalgo es un consumidor neto de energía, debido a que los valores de consumo total anual son mayores que los de la oferta interna bruta. Adicionalmente, se encontró que el estado de Hidalgo es una entidad con actividad transformativa de energía, por la instalación de la refinería con mayor capacidad de procesamiento en el país.

Figura 7. Consumo de distintos energéticos en el estado de Hidalgo de 2005 a 2010 (PJ = petajoules).



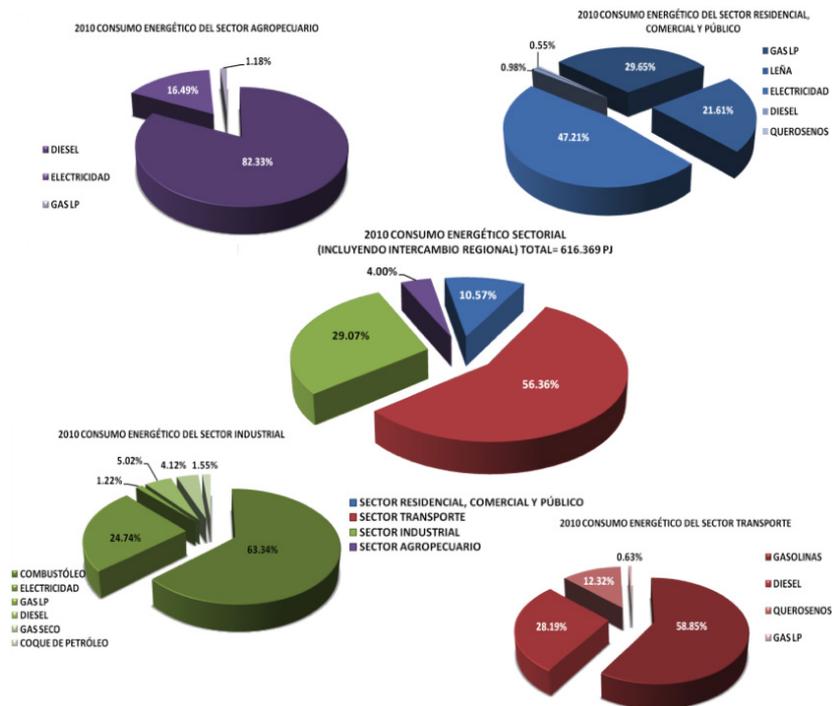
Fuente: elaboración propia.

Por su situación geográfica, se identifica al estado de Hidalgo como una entidad con un intercambio regional muy activo debido a que consume petróleo crudo y gas natural de los estados vecinos, para procesarlos en la refinería ubicada en la entidad y convertirlos a combustibles, gas LP y energía termoeléctrica que exporta a los estados del centro del país.

Finalmente, en el balance de energía se estiman los consumos netos de energía y se analizan los sectores consumidores para vincularlos a la generación de GEI y encontrar las áreas de oportunidad que se pueden explotar en aras de aumentar la sustentabilidad de los procesos y aumentar la eficiencia del uso de la energía en la entidad. Como ejemplo de ello se presenta en la Figura 8 la distribución porcentual del consumo de energía, sectorizado y por tipo de insumo energético, del estado de Hidalgo para el año 2010.

Una vez determinado el balance de energía, a un nivel de desagregación suficiente, es posible identificar los sectores consumidores, su importancia y los tipos de energéticos que se consumen principalmente. Con esta información es posible planificar un sistema político-social de oferta y consumo de energía en sus diversas formas y, a su vez, asociarlo con la generación de GEI para estimar la manera en la que la implementación de alternativas tecnológicas y la adopción de formas más eficientes de producir y consumir la energía nos permiten mitigar los efectos del cambio climático y adaptarnos a las condiciones que el futuro nos plantee, con una visión de sustentabilidad mediante la cual sea posible asegurar la viabilidad energética de nuestras nuevas generaciones.

Figura 8. Consumo de energía sectorizado y por tipo de insumo energético del estado de Hidalgo en el año 2010 (PJ = Petajoules).



Fuente: elaboración propia.

Las alternativas tecnológicas

Una vez revisados los efectos del cambio climático asociados a la generación de GEI, y realizado el análisis sectorizado y desagregado con el balance de energía, es posible revisar alternativas tecnológicas que ayuden a mejorar la eficiencia energética en la generación de satisfactores sociales. Lo anterior permitirá realizar consumos energéticos racionales y alternativos que aporten sustentabilidad al desarrollo económico. Para evaluar el potencial de distintas alternativas tecnológicas que incrementen la sustentabilidad del sector energético, se plantean en la Tabla 3 los subsectores de consumo y los principales combustibles que utilizan.

Tabla 3. Subsectores de consumo de energía y principales insumos energéticos utilizados.

Subsector de consumo energético	Principales insumos utilizados	
Transporte (56.3%)	Gasolina (58.9%)	Diésel (28.2%)
	Queroseno (12.3%)	Gas LP (0.6%)
Industrial (29.1%)	Combustóleo (63.4%)	Electricidad (24.7%)
	Diésel (5.0%)	Gas seco (4.1%)
	Coque (1.6%)	Gas LP (1.2%)
Residencial, comercial y público (10.6%)	Electricidad (47.1%)	Gas LP (29.7%)
	Leña combustible (21.6%)	Diésel (1.0%)
	Querosenos (0.6%)	
Agropecuario (4.0%)	Diésel (82.3%)	Electricidad (16.5%)
		Gas LP (1.2%)

Fuente: elaboración propia.

La tabla anterior indica los subsectores de consumo energético ordenados por su importancia: transporte, industrial, residencial, comercial y público, y agropecuario. Así, las medidas dirigidas al sector transporte tendrán mayor impacto en la mitigación del cambio climático que las enfocadas al sector

agropecuario. Del mismo modo, en cada sector se pueden enfocar medidas y alternativas de mayor impacto acordes con el energético de mayor consumo. En las Tablas 4 a 7 se plantean diversas opciones con viabilidad tecnológica y económica para su implementación.

Tabla 4. Alternativas tecnológicas que minimicen la generación de GEI mediante la disminución del consumo energético del subsector transporte.

Energético	Alternativas tecnológicas
Gasolina	<ul style="list-style-type: none"> • Mejorar la calidad de la gasolina (incremento del octanaje, ultra bajo azufre y disminución del contenido de benceno) • Mejora en la eficiencia energética de los motores • Uso de vehículos híbridos y eléctricos • Programas de verificación vehicular y uso compartido de automóviles • Uso de energía solar para satisfacer requerimientos energéticos menores
Diésel	<ul style="list-style-type: none"> • Uso de mezclas de biocombustibles con bajo uso de aditivos • Mejora de la calidad de combustibles (ultra bajo azufre) • Uso de sistemas eléctricos retroalimentados • Programas de verificación vehicular y uso compartido • Uso de energía solar para requerimientos energéticos menores • Transición a sistemas ferroviarios que alternen el uso de energía eléctrica para transportación de pasajeros y de carga
Querosenos	<ul style="list-style-type: none"> • Uso de mezclas de biocombustibles con bajo uso de aditivos • Implementación de sistemas de integración de energía asociados al movimiento del medio de transporte (por ejemplo, turbinas y generadores eléctricos) • Uso de energía solar para requerimientos energéticos menores
Gas LP	<ul style="list-style-type: none"> • Cambio al uso de gas natural con menor potencial de calentamiento • Uso de energía solar para requerimientos energéticos menores

Fuente: elaboración propia.

Las alternativas tecnológicas sugeridas para el sector transporte van dirigidas al consumo de gasolina y todos los medios de transporte en el rango de carga ligera a media ligera que utilizan este tipo de combustible y propician la mayor movilidad de las personas. En un proceso de transición en las formas energéticas de transportación se vislumbra la mejora de la calidad de los combustibles, seguida de la implementación de medios de transporte sustentables.

Tabla 5. Alternativas tecnológicas que minimicen la generación de GEI mediante la disminución del consumo energético del subsector industrial.

Energético	Alternativas tecnológicas
Combustóleo	<ul style="list-style-type: none"> • Implementación de sistemas de cogeneración energética • Integración energética mediante la instalación de redes de intercambiadores de calor • Aprovechamiento de gases de combustión para el precalentamiento de corrientes de proceso • Acoplamiento térmico de procesos para minimizar el consumo de energía • Análisis exergético de los procesos industriales para mejorar su eficiencia
Electricidad	<ul style="list-style-type: none"> • Instalación de sistemas eólicos y solares para consumos eléctricos de baja tensión • Instalación de sistemas de ciclo combinado • Aprovechamiento de residuos de tipo biológico para la generación de biogás y electricidad derivada • Instalación de sistemas bioclimáticos con menor consumo eléctrico • Actualización tecnológica de sistemas de iluminación con el uso de tecnologías LED

Diésel	<ul style="list-style-type: none"> • Uso de mezclas de biocombustibles con bajo uso de aditivos • Uso de energía solar y eólica para satisfacer requerimientos energéticos menores
Gas seco	<ul style="list-style-type: none"> • Uso de energía solar y eólica para satisfacer requerimientos energéticos menores • Implementación de sistemas de integración de energía
Coque	<ul style="list-style-type: none"> • Uso de sistemas de precalentamiento con gases de combustión • Uso de combustibles alternativos y complementarios
Gas LP	<ul style="list-style-type: none"> • Cambio al uso de gas natural con menor potencial de calentamiento • Uso de energía solar y eólica para requerimientos energéticos menores • Implementación de sistemas de integración de energía

Fuente: elaboración propia.

Para el sector industrial (ver Tabla 5) se observan esquemas de integración energética y mayor eficiencia en el uso actual de los energéticos más utilizados. Para este subsector es difícil intentar cambios significativos en el tipo de combustibles y energéticos empleados debido al alto poder calorífico que requiere, sin embargo, es posible implementar sistemas industriales que aumenten la eficiencia energética de alta potencia.

En la Tabla 6 se presenta el subsector residencial, comercial y público con las mayores oportunidades de innovación en las alternativas tecnológicas de sustentabilidad energética. Este subsector muestra un alto potencial de mitigación de los efectos del cambio climático, ya que es distribuido, productivo y tangible para la sociedad. Además, es posible mitigar el cambio climático incrementando la rentabilidad de las actividades del subsector mejorando su eficiencia energética. La mejora tecnológica en la vida diaria es realmente una inversión a favor de la economía de los usuarios finales.

Tabla 6. Alternativas tecnológicas que minimicen la generación de GEI mediante la disminución del consumo energético del subsector residencial, comercial y público.

Energético	Alternativas tecnológicas
Electricidad	<ul style="list-style-type: none"> • Uso de energía solar y eólica para satisfacer requerimientos energéticos menores • Uso de sistemas de iluminación más eficientes y actualizados con tecnologías LED • Uso de reguladores de corriente en equipos de refrigeración • Uso de sistemas inteligentes de control de energía eléctrica • Instalación de sistemas bioclimáticos y de iluminación natural • Instalación de sistemas de aislamiento térmico
Gas LP	<ul style="list-style-type: none"> • Uso de calentadores termosolares de agua • En lo posible, realizar la transición al uso de gas natural • Instalación de sistemas bioclimáticos • Instalación de sistemas de aislamiento térmico • Instalación de calentadores de paso y de bajo consumo de gas LP
Leña combustible	<ul style="list-style-type: none"> • Uso de astillas combinadas con biomasa combustible • Uso de estufas solares y estufas ecoeficientes • Uso térmico integrado para calefacción y calentamiento de agua • Uso de energía solar y eólica para satisfacer requerimientos menores de energía
Diésel	<ul style="list-style-type: none"> • Uso de energía solar y eólica para satisfacer requerimientos energéticos menores • Uso de mezclas de biocombustibles con mínimo uso de aditivos
Querosenos	<ul style="list-style-type: none"> • Cambio al uso de gas natural para satisfacer requerimientos energéticos • Uso de energía solar y eólica para satisfacer requerimientos energéticos menores

Fuente: elaboración propia.

Finalmente, el subsector agropecuario presenta un alto potencial para disminuir sus emisiones de GEI o su huella de carbono, sobre todo en el sentido de aprovechar los recursos naturales de mejor manera para mantener altos niveles de productividad con el menor daño ambiental posible. El aprovechamiento de la biomasa residual, proveniente de las actividades ganaderas, resulta de interés para mitigar el cambio climático por emisiones de metano, además de que agrega valor, productividad y rentabilidad a las actividades agropecuarias. La integración energética de la biomasa residual, producida en este subsector, plantea una atractiva oportunidad de mitigación ambiental.

Tabla 7. Alternativas tecnológicas que minimicen la generación de GEI mediante la disminución del consumo energético del subsector agropecuario.

Energético	Alternativas tecnológicas
Diésel	<ul style="list-style-type: none"> • Uso de mezclas con biocombustibles con mínimo uso de aditivos • Uso de energía solar y eólica para satisfacer requerimientos energéticos menores • Uso de residuos agrícolas para producir biocombustibles • Aprovechamiento de biogás proveniente de residuos agropecuarios
Electricidad	<ul style="list-style-type: none"> • Uso de energía solar y eólica para satisfacer requerimientos energéticos menores • Uso de sistemas eléctricos sostenibles como las micro hidroeléctricas instaladas en canales de riego y cuerpos dinámicos de agua • Generación de energía eléctrica a partir de biogás y biocombustibles • Transición a la agricultura protegida y controlada • Uso de sistemas solares de bombeo a baja presión • Implementación de sistemas agro-robóticos con uso de energía solar

Gas LP	<ul style="list-style-type: none"> • Producción de biogás a partir de residuos agrícolas y agropecuarios • Aislamiento térmico de sistemas generadores de energía con gas LP • Uso de energía solar y eólica para requerimientos energéticos menores
--------	---

Fuente: elaboración propia.

Conclusiones

En este capítulo se han revisado los principales gases de efecto invernadero que contribuyen al fenómeno del cambio climático, haciendo énfasis en aquellos relacionados con actividades del sector energético, de forma que se han vinculado los subsectores y los insumos energéticos más utilizados, además de que se han mostrado ejemplos de cuantificación del sector y sus características, mediante la aplicación de la metodología del balance de energía para sistemas político-sociales. Con este fundamento ha sido posible identificar oportunidades para el desarrollo tecnológico que aporten soluciones para minimizar las emisiones de GEI y aumentar la eficiencia energética, como medidas de mitigación del cambio climático, que permitirán alcanzar objetivos superiores de sustentabilidad energética. Con todo lo anterior ha quedado ilustrado que es factible alcanzar el desarrollo económico basado en el conocimiento científico y el desarrollo tecnológico, logrando así transitar a escenarios más convenientes para lograr la adaptación de los seres humanos a los efectos, hasta hoy tangibles, del cambio climático.

Referencias

- Cronin, J., Anandarajah, G., y Dessens, O. (2018). Climate Change Impacts on the Energy System: A Review of Trends and Gaps. *Climatic Change*, 151(2), 79-93.
- De Angelo, J., Azevedo, I., Bistline, J., Clarke, L., Luderer, G., Byers, E., y Davis, S. J. (2021). Energy Systems in Scenarios at Net-zero CO₂ Emissions, *Nature Communications*, 12:6096, 1-10.

- Otazo Sánchez, E. M., Pavón Hernández, N. P., Bravo Cadena, J., Pulido Silva, M. T., López Pérez, S., Razo Zárate, R., González Ramírez, C. A., Sánchez Rojas, G., Martín Hernández, C. Y., Fragoso López, P. I., Rodríguez Laguna, R., Galindo Castillo, E., Vargas Zenteno, M., Velázquez Alonso, F., Domínguez Soto, J., Cruz Domínguez, P. E., Maycotte Morales, C. C., Pérez Ramírez, N. G., Cortés Blobaum, H. J., y Herrera Muñoz, G. y Uribe Gutiérrez, D. (2013). *Programa Estatal de Acción ante el Cambio Climático de Hidalgo*. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo; Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales del Estado de Hidalgo.
- Sener (2021). *Balance Nacional de Energía 2020*. Secretaría de Energía; Subsecretaría de Planeación y Transición Energética; Dirección General de Planeación e Información Energéticas.
- Splitter, N., Gladkikh, G., Diemer, A., y Davidsdottir, B., (2019). Understanding the Current Energy Paradigm and Energy System Models for More Sustainable Energy System Development, *Energies*, 12(8), 1-22.



Arte del cambio climático: la asignatura pendiente

Elisa Ontiveros Delgadillo Delgadillo

Introducción

La foto de Fabrice Monteiro (2018) es impresionante. La figura humana posa sobre montones de basura y, ataviada con un traje ritual, diseñado por Adriana Kanal, compuesto por desechos de cinta de video, partes de mangueras y tubos de PVC, comparte el primer plano con el fuego que consume cables enmarañados que cuelgan de una frágil vara sostenida con sus propias manos; tras ella, cascarones de computadoras apilados y, como fondo, un cielo gris que oscurece el espacio de una casa. La construcción del discurso de devastación del que todos somos, aun sin proponérselo, partícipes resulta

impactante: no es necesario vivir en Senegal para percatarnos cómo es que el cambio climático afecta la vida de esa región y, por lo tanto, también de la nuestra: la fotografía elabora una visión de *nosotros*. Esta es una de las tantas producciones dentro de la denominación *Climate Change Art*.

La escuela es un lugar extraordinario. Si bien es cierto que, como plantea Bourdieu (2009), es el lugar donde se crean y legitiman las diferencias sociales: reproductora de las estructuras sociales (*un lieu de reproduction des structures sociales*), también es cierto que es uno de los espacios donde se posibilita la reflexión para modificar las estructuras sociales. Dicho de otro modo, la escuela es un espacio dinámico donde germinan las posibilidades de cambio en todos los niveles: social, ideológico, artístico, económico, científico, tecnológico e incluso espiritual. Dichas modificaciones pueden ir desde lo individual hasta aquellas que involucren a toda la sociedad. Pertenecer a una comunidad universitaria nos hizo preguntarnos cómo es que un problema tan grave como el cambio climático se trata al interior de la educación artística en las licenciaturas de la Universidad de Guadalajara.

En este trabajo nos planteamos como objetivo caracterizar el lugar que otorga la U de G al arte del cambio climático, a las ciencias ambientales y en general a la educación ambiental en las licenciaturas de arte a través de la revisión de sus programas de estudio. La razón de ello radica en la plataforma primaria de una determinada política educativa que se expresa en el plan de estudios que se ofrece. Establecimos el porcentaje que las asignaturas de aprendizaje sobre los temas antes mencionados (como instrucción básica, especializante u optativa) ocupan dentro de los planes de estudio de las licenciaturas artísticas. De igual forma, revisamos acciones que con respecto al cambio climático ha emprendido la Universidad de Guadalajara.

Por último, una vez obtenidos los resultados del análisis, fijamos no solo lo que no hay en la oferta académica, sino que planteamos propuestas para que la educación artística desde una perspectiva ambiental deje de ser un asunto aplazado en los planes de estudio.

Contexto

La Universidad de Guadalajara está integrada por una Red de Centros Universitarios temáticos y regionales, por el Sistema de Educación Media Superior que ofrece tres modalidades de bachillerato (general por competencias, técnicos y tecnológicos) y por el Sistema de Educación Virtual, que brinda educación media superior y superior, así como diversos posgrados. Y, por supuesto, en esta red están integrados los órganos de gobierno y las demás dependencias de la administración general. (1)

En 2019, con la llegada de Ricardo Villanueva Lomelí a la rectoría, el impulso a temas sobre sustentabilidad y cambio climático ha estado presente de manera destacada, no solo en su agenda sino a través de su integración tanto en los planes de desarrollo de sus diferentes centros como en su misión (Universidad de Guadalajara, 2019).

La Universidad de Guadalajara, generadora de alianzas

En la revisión de la historia reciente de la U de G pudimos constatar que esta ha sido y es una activa promotora de la educación ambiental en la región Centro Occidente de nuestro país, de forma destacada en el estado de Jalisco y en redes con los estados de Nayarit y Colima. Basta con revisar algunas acciones clave de su historia reciente para acreditarlo. Durante el año 2010 anunció que se integraría al Centro Cultural Universitario (2) el Museo de Ciencias Ambientales (MCA) y que el diseño estaría a cargo del estudio de arquitectura noruego Snohetta (3). En el documento “Instrucciones para diseñar un museo de historia natural... pero diferente” se plantea que: “este museo será muy específico: será universitario, y por ende universal. Debe realizar actividades de docencia, investigación, vinculación social, divulgación de la ciencia y difusión de la cultura, tanto entre su comunidad universitaria como hacia la sociedad en su conjunto” (Santana *et al.*, 2021, p. 5).

De igual manera, la Universidad de Guadalajara ha construido una genealogía en la que se ha mostrado como documentada aliada sobre el estudio del cambio climático. En su Museo de las Artes (MUSA) se llevó a cabo en el año 2017 el diálogo Hablemos del Cambio Climático entre académicos de Jalisco y científicos del Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)

(4). No solo eso: en 2018 se fundó la Alianza para la Acción Climática en Guadalajara (ACA-GDL) con el liderazgo del Instituto de Planeación y Gestión del Desarrollo del Área Metropolitana de Guadalajara (Imeplan) y la Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial (Semadet), la Universidad de Guadalajara y la Coordinación de WWF México (2018), con el propósito de generar acciones contra el cambio climático.

Además, en la sesión extraordinaria del 18 de diciembre del 2019, ya con el actual rector, el Consejo General Universitario (CGU) dictaminó que el año 2020 fuera declarado como Año de la Transición Energética, con el fin de crear conciencia y reducir los efectos de la huella de carbono que en la Universidad se producen. Entre los trabajos que se implementaron estuvieron la instalación de paneles solares, huertos fotovoltaicos, lámparas ahorradoras de energía y sistemas de control automatizado en la Red Universitaria, al igual que la renovación de los parques vehiculares al tipo eléctrico e híbrido.

Por último, tenemos que registrar la participación de la Universidad de Guadalajara en la LA Art Show, una de las ferias de arte más importantes en Estados Unidos, mediante su Museo de las Artes y su Museo de Ciencias Ambientales, con dos instalaciones de la artista Claudia Rodríguez (“En festival de Los Ángeles...”, 2022): *En la otra cascada*, que consistió en la presentación de una red de rafia, en memoria la caída de agua denominada Salto del Río Santiago, en cuya elaboración intervinieron 400 personas del municipio de Juanacatlán, y *Chapala también se agota*, donde la artista expone imágenes de la desecación del lago de Chapala a través de una serie de fotografías y una llave de agua que goteaba. Esta exposición terminó apenas en enero de 2022.

En el *Plan de Desarrollo Institucional 2019-2025, Visión 2030* (PDI), la Universidad de Guadalajara planteó el cambio de nomenclatura de funciones sustantivas a propósitos sustantivos:

Debemos transitar a un modelo en que la docencia, la investigación y la extensión no sean categorías funcionales únicas, sino propósitos más amplios que representen el sustento y al mismo tiempo los fines esenciales de todas las actividades universitarias. Nuestros propósitos

como institución pueden y deben referirse a la ampliación de las fronteras del conocimiento, la transformación de la vida de las personas, el desarrollo de una sociedad inclusiva, justa y equitativa, así como contribuir a la mejora del bienestar local, regional y nacional (Universidad de Guadalajara, 2019b).

La labor universitaria se centró en cuatro propósitos sustantivos:

- Docencia e Innovación académica
- Investigación y transferencia tecnológica y del conocimiento
- Extensión y responsabilidad social
- Difusión de la cultura

Las acciones referidas respecto al quehacer de la Universidad de Guadalajara en el tema que nos ocupa están relacionadas, de manera primordial, a la extensión, pero además debemos señalar que la Universidad de Guadalajara ofrece posgrados, licenciaturas y diplomados con relación al estudio del medio ambiente en áreas de ingeniería, derecho y salud. Al revisar el Repositorio Institucional de la Universidad de Guadalajara (2021), (5) donde, además de otros documentos, se encuentran las tesis y artículos de investigación generados por sus estudiantes, académicos, investigadores y egresados, constatamos que tanto a nivel licenciatura como en posgrados existen diversos trabajos sobre cambio climático, sustentabilidad y medio ambiente, lo cual es consecuente con las acciones de la institución: cuando un tema se vuelve materia de estudio, en la educación formal, hay producción en y para la misma institución.

Política de sustentabilidad. La Universidad de Guadalajara planteó en 2014 su Política Institucional de Sustentabilidad. En ella establece acciones directas y transversales para impactar en toda la Red e instituir la responsabilidad sustentable en ella. La manera de lograrlo fue mediante propuestas que incidieran en sus funciones sustantivas —ahora propósitos sustantivos— a través de cuatro ejes: educación para el desarrollo sostenible, gestión ambiental, mitigación y adaptación al cambio climático y responsabilidad social universitaria y calidad de vida.

De esta política emergió el programa Universidad Sostenible, en el desde su página web asentó: “asumamos nuestro compromiso de gestar y articular un cambio en nuestro quehacer cotidiano y emprendamos un nuevo camino que incluya desde la eliminación de la pobreza hasta el combate al cambio climático para construir un mundo mejor” (Universidad Sostenible, 2014).

En el eje de Educación para el Desarrollo Sostenible se consigna que “Busca permear la docencia y el proceso enseñanza-aprendizaje a través del fortalecimiento de contenidos, la formación y actualización de profesores, y es una oportunidad para fortalecer el modelo educativo a través del involucramiento activo de los estudiantes y de todos los actores de la comunidad universitaria” (idem).

Una vez establecidos la importancia y el tratamiento de la educación ambiental y, en particular, sobre el cambio climático, revisamos el área de la educación artística superior en la U de G.

La educación artística superior en la Universidad de Guadalajara. El Centro Universitario de Artes, Arquitectura y Diseño (CUAAD) oferta trece licenciaturas, doce maestrías y dos doctorados, en el marco de las disciplinas artísticas. El Centro Universitario de Tonalá (CU Tonalá), que se encuentra en la zona conurbana de Guadalajara, también ofrece dos licenciaturas en este campo: la Licenciatura en Diseño de Artesanías y la Licenciatura en Historia del Arte. Estas quince licenciaturas se imparten en modalidad presencial. Anotaremos una licenciatura más, en Gestión Cultural, así como una maestría y un doctorado en Gestión de la Cultura, por parte de la U de G Virtual.

Esta investigación trabajó en el análisis de las 16 licenciaturas artísticas, pero de manera primordial se concentró en el CUAAD, ya que reúne la mayoría de ellas. Este centro universitario en su misión y visión asienta que “Sus egresados satisfacen con relevante capacidad las demandas sociales, ambientales, productivas y culturales de México y su Región” (Centro Universitario de Arte, Arquitectura y Diseño, 2019).

Es precisamente esta última línea, sumada al planteamiento del *Plan de Desarrollo Institucional* (PDI) y a la Política Institucional Sostenible, ya

expuestos, lo que nos animó a investigar cómo es que incide la educación formal, expresada en los programas curriculares, sobre al cambio climático o, en general, sobre el medio ambiente, en la educación artística en la U de G.

Alcances y limitaciones. El presente trabajo se centró en las licenciaturas en arte que ofrece la Universidad de Guadalajara. Analizamos tiempos y créditos invertidos en los programas académicos que, como asignaturas básicas, especializantes y optativas, se otorgan a las unidades de aprendizaje con relación al cambio climático o de ciencias ambientales. Trabajamos con los planes de estudio vigentes y con los que están en proceso de implementación.

Formulación del problema. Al empezar a documentar la labor de la Universidad de Guadalajara sobre el cambio climático, los resultados arrojaron dos hechos fundamentales: el primero consiste en que esta se centra, como ya lo habíamos señalado, en el área de la extensión; el segundo, que entre los centros universitarios inscritos en el eje uno de Universidad Sustentable, Educación para el Desarrollo Sostenible (EDS), no está incluido el CUAAD. Además, obtuvimos otro dato interesante: la artista que representó al MCA y al MUSA en la feria LA ArtShow, Claudia Rodríguez, no es egresada de la Universidad de Guadalajara sino del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente (ITESO). De ninguna manera se trata de una defensa sobre la pertenencia universitaria, sino más bien nos intrigó saber qué había sobre las producciones de egresados U de G respecto al cambio climático. Sí, sí está consignado en la misión y visión del CUAAD que los estudiantes logren un perfil integral que incluye la educación sobre el medio ambiente, y tuvimos que preguntarnos cómo es que se implementa desde los planes de estudio.

Lo antes expuesto nos llevó a examinar qué (asignaturas, unidades de aprendizaje o materias), cómo (si tenían carácter de básica, especializante u obligatoria a lo largo del trayecto formativo) y cuánto (cuáles eran los porcentajes de créditos y dedicación) se estudia respecto al conocimiento sobre cambio climático, ciencias ambientales y en general en torno a la educación ambiental en dichas licenciaturas para proponer rutas que sitúen a sus estudiantes en contextos vivos que enriquezcan su propia práctica.

Variable independiente: la educación para el desarrollo sostenible desde la Política Institucional de Sostenibilidad en la Universidad de Guadalajara.

Variable dependiente: la educación ambiental para el estudio del arte del cambio climático en licenciaturas del área del arte en de la Universidad de Guadalajara.

Desarrollo

Referentes teóricos

Elliot W. Eisner (1933-2014) fue maestro e investigador, defensor y promotor de la educación artística en el currículum escolar desde la instrucción básica. Perteneció a la corriente de la pedagogía progresista. Formuló conceptos fundamentales en la pedagogía: el aprendizaje físico de la acción creadora y la noción de currículum nulo, en los que planteó cómo se puede desaparecer lo que no se enseña de manera explícita en la educación institucionalizada.

En *Cognición y currículum*, Eisner (1994) expuso que las decisiones en el proceso de la educación y las instituciones no son actividades de carácter neutral: las escuelas alientan lo que valoran; desde allí podemos entender qué se ofrece a los estudiantes y cuál es la base de la selección.

Arrieta de Meza y Meza Cepeda (2001) señalan cinco tipos de construcción del currículum: currículum oficial, currículum operacional, currículum oculto, currículum nulo y extra currículum.

El primero contiene los planes de estudios formales, así como los materiales que se emplean para implementarlos. El segundo refiere las secuencias de las prácticas tanto profesionales como de servicio social. El tercero se ubica en los valores, que aun cuando no estén reconocidos de forma abierta, las instituciones adaptan e incorporan a la vida académica. El cuarto se refiere a las materias que no se enseñan o que se enseñan poco, y luego, dada su irrelevancia, no se consideran importantes y se pueden pasar de largo o incluso evaluar de forma diferente a las otras asignaturas del programa. Por último, el quinto se centra tanto en asignaturas como en acciones (visitas, intervenciones, etcétera) de carácter voluntario u opcional para los alumnos.

Por otra parte, Eisner (1992) explicó la enseñanza del arte, además de en el ámbito productivo, en la esfera conceptual y en el terreno crítico. Estableció que se designa de manera errónea a la cognición como exclusiva del campo de las ciencias duras. Algo propio de la actividad mental, desde esa visión, se aparta lo afectivo, lo que tiene relación con el cuerpo, los sentimientos y los sentidos: las otras formas de aprender, aprehender y conocer. Eisner (1994) afirmó asimismo que no puede existir ninguna actividad cognitiva que no sea a la vez afectiva. Según Terradellas y Masgrau (2014), Eisner elaboró la noción de conocimiento somático a partir de la necesidad de los sentidos para la construcción de mundo. Reivindica que el arte y la ciencia son versiones de construcción del conocimiento: las artes, al igual que la ciencia, propician un pensamiento sofisticado de alto nivel, por lo cual las materias de estudio pueden pasar por las diferentes disciplinas y aportan desde diferentes lugares. (6)

Metodología

Para analizar el caso se desarrolló una investigación cualitativa. El tipo de estudio que se eligió fue no experimental, de carácter descriptivo y transversal, ya que nos concentramos en el análisis de los planes de estudio vigentes desde 2019 y hasta 2022 (período de funciones de la actual rectoría).

La población que se examinó estuvo integrada por los programas de estudio de las licenciaturas en artes de la U de G. Estos se agrupan en dos modalidades: virtual, con una licenciatura, y presencial, con quince licenciaturas. Aquí la relación de ellas:

- Modalidad virtual:

Licenciatura en Gestión Cultural

- Modalidad presencial:

Licenciatura en Arquitectura

Licenciatura en Diseño de Artesanías

Licenciatura en Artes Audiovisuales

Licenciatura en Artes Escénicas para la Expresión Dancística

Licenciatura en Artes Escénicas para la Expresión Teatral

Licenciatura en Artes Visuales para la Expresión Fotográfica

Licenciatura en Artes Visuales para la Expresión Plástica

Licenciatura en Diseño, Arte y Tecnologías Interactivas

Licenciatura en Diseño para la Comunicación Gráfica
 Licenciatura en Diseño Industrial
 Licenciatura en Diseño de Interiores y Ambientación
 Licenciatura en Diseño de Modas
 Licenciatura en Historia del Arte
 Licenciatura en Música
 Licenciatura en Urbanística y Medio Ambiente

Trabajamos con una muestra dirigida que estuvo constituida por las materias sobre cambio climático o, en su defecto, ciencias ambientales que tuvieran carácter de básica, especializante u optativa, en las diferentes modalidades de las licenciaturas. Buscamos, en un primer momento, la confirmación de su presencia y equilibrio en los planes de estudio, y después, en un segundo momento, cuadrarlas con el perfil de egreso. Esto nos permitió tener un panorama sobre su situación en la integración de los planes curriculares. Para tal efecto acudimos al análisis documental de la oferta académica que cada licenciatura plantea en sus sitios.

Como primer instrumento aplicamos una lista de cotejo que nos arrojó la panorámica general a propósito de la integración de materias y las clasificamos, según su carácter, en básicas, especializantes u optativas.

Tabla 1. Unidades de aprendizaje de las diferentes licenciaturas de Arte de la U d G.

Licenciatura	Modalidad	Oferta asignaturas sobre CC o CA		Carácter		
		SÍ	NO	Básica	Especializante	Optativa
Arquitectura	Presencial					
Diseño de Artesanías	Presencial					
Artes Audiovisuales	Presencial					

Artes Escénicas para la Expresión Dancística	Presencial					
Artes Escénicas para la Expresión Teatral	Presencial					
Artes Visuales para la Expresión Fotográfica	Presencial					
Artes Visuales para la Expresión Plástica	Presencial					
Diseño, Arte y Tecnologías Interactivas	Presencial					
Diseño para la Comunicación Gráfica	Presencial					
Diseño Industrial	Presencial					
Diseño de Interiores y Ambientación	Presencial					
Diseño de Modas	Presencial					
Gestión Cultural	Virtual					
Historia del Arte	Presencial					
Música	Presencial					
Urbanística y Medio Ambiente	Presencial					

Fuente: elaboración propia.

Esto nos facilitó la organización de la muestra no probabilística y por conveniencia. Los criterios de inclusión que se determinaron fueron los siguientes:

- Planes de estudio vigentes, de nivel licenciatura, de la Universidad de Guadalajara.
- Planes de estudio del área de arte en general.

Mientras que los criterios de exclusión fueron:

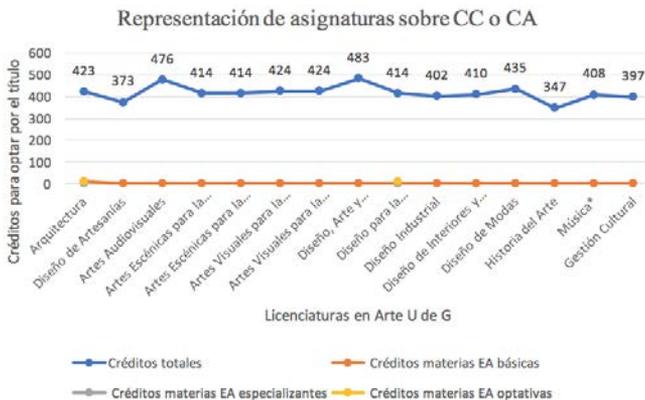
- Planes de estudio de otra universidad
- Planes de estudio, de nivel licenciatura, especializados en ciencias ambientales del área de Arte. (6)

Las unidades de análisis fueron asignaturas o unidades de aprendizaje de educación ambiental (EA), término abarcativo para cambio climático y ciencias ambientales, como parte de la educación para el desarrollo sostenible (EDS), integradas en los precitados programas de las diversas licenciaturas.

Una vez delimitados los datos anteriores pudimos advertir que solo dos de las quince ofrecen asignaturas en el área de estudio que nos ocupa.

Observamos en la siguiente gráfica la incidencia de materias sobre cambio climático o, como habíamos establecido, EA en los diversos planes de estudio de las licenciaturas. De igual manera, por su caracterización, se muestra cuál es el número de créditos que el estudiante debe tener para poder titularse, es decir, el número de créditos que certifica su trayectoria académica.

Gráfica 1. Representación de asignaturas de EA en las diversas licenciaturas de Arte de la U de G.



Fuente: elaboración propia.

El sistema de créditos en la Universidad de Guadalajara permite al estudiante inscribirse en una licenciatura y organizar su propio currículo. Es decir, una vez cubierta el área básica, él puede elegir cuáles materias tomar para lograrse un perfil acorde a sus aptitudes y sus intereses.

En las siguientes tablas establecimos dónde y cuántas asignaturas se ubican en las licenciaturas de Arquitectura y de Diseño para la Comunicación Gráfica, únicas que contienen materias de EA. Es pertinente no perder de vista que solo las básicas son cursadas por toda la población estudiantil, mientras que las especializantes y las optativas implican la voluntad y afinidad para cursarlas.

Tabla 2. Licenciatura en Arquitectura: áreas de formación, asignaturas en EA y créditos.

Áreas de formación	Créditos	Asignaturas en EA	Créditos
Básica	367	Procesos edificatorios sustentables	6
Especializante	36	Proyecto bioclimático	4
		Ecología urbana	6
		Proceso del diseño bioclimático y térmico de edificios	4
		Proceso del diseño bioclimático	4
		Arquitectura alternativa y ecoturística	5
Optativa	20	Conceptos de psicología ambiental	6
Número mínimo total de créditos para optar por el grado	423	Número de créditos totales EA	35

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Licenciatura en Diseño para la Comunicación Gráfica: áreas de formación, asignaturas en EA y créditos.

Áreas de formación	Créditos	Asignaturas en EA	Créditos
Básica	386	No presenta	
Especializante	7	No presenta	
Optativa	21	Ecología	5
		Ecología urbana	5
Número mínimo total de créditos para optar por el grado	414	Número de créditos totales EA	10

Fuente: elaboración propia.

A partir de la localización de estas asignaturas realizamos un comparativo para saber cuál es el porcentaje de sus créditos que ocupan en los programas que sí las incluyen, según los siguientes criterios:

1. Créditos totales para titularse.
2. Porcentajes parciales en cuanto a su carácter de básicas, especializantes u optativas en los planes de estudio.
3. Porcentaje que representa cada asignatura en relación con su carácter de básica, especializante u optativa.
4. Porcentaje de cada asignatura con relación al total de créditos para aspirar al título.

Tabla 4. Licenciatura en Arquitectura, porcentajes.

Créditos totales para aspirar al título en la Licenciatura de Arquitectura	Porcentaje parciales según su carácter	Porcentaje que representa cada asignatura en relación con su carácter de básica, especializante u optativa	Porcentaje de cada asignatura con relación al total de créditos para aspirar al título
423	<i>Básicas</i> 86.70%	<i>Básica</i> Procesos edificatorios sustentables: 1.63%	<i>Básica</i> Procesos edificatorios sustentables 1.41%
	<i>Especializantes</i> 8.50%	<i>Especializantes</i> Proyecto bioclimático: 11.11%	<i>Especializantes</i> Proyecto bioclimático: 0.94%
		Ecología urbana: 16.66%	Ecología urbana: 1.41%
		Proceso del diseño bioclimático y térmico de edificios: 11.11%	Proceso del diseño bioclimático y térmico de edificios: 0.94%
<i>Optativas</i> 4.70%	Proceso del diseño bioclimático: 0.94%	Proceso del diseño bioclimático: 0.94%	
	Arquitectura alternativa y ecoturística: 16.66%	Arquitectura alternativa y ecoturística: 1.41%	
	Conceptos de psicología ambiental: 13.88%	Conceptos de psicología ambiental: 1.18%	
	<i>Optativa</i> Conceptos de psicología ambiental: 4.72%	<i>Optativas</i> Conceptos de psicología ambiental: 1.41%	

Fuente: elaboración propia.

Tabla 5. Licenciatura en Diseño para la Comunicación Gráfica, porcentajes.

Créditos totales para aspirar al título en la Licenciatura de Diseño para la Comunicación Gráfica	Porcentajes parciales según su carácter	Porcentaje que representa cada asignatura en relación con su carácter de básica, especializante u optativa	Porcentaje de cada asignatura con relación al total de créditos para aspirar al título
414	<i>Básicas</i>	<i>Básica</i>	<i>Básica</i>
	93.23%	No registra	No registra
	<i>Especializantes</i>	<i>Especializantes</i>	<i>Especializantes</i>
	1.69%	No registra	No registra
	<i>Optativas</i>	<i>Optativas</i>	<i>Optativas</i>
	5.07%	Ecología: 23.80%	Ecología:1.20%
		Ecología urbana: 23.80%	Ecología urbana: 1.20%

Fuente: elaboración propia.

Una vez obtenidos los resultados pasamos a la discusión de ellos.

Conclusiones

Expuesto lo anterior, tenemos que dejar asentado lo siguiente:

El objetivo de este trabajo fue caracterizar el lugar que otorga la Universidad de Guadalajara a la educación ambiental, en cuanto a la política educativa correspondiente a las licenciaturas de arte, a través de la revisión de sus programas de estudio. Al respecto, los datos que nos aportó el análisis fueron: solo dos licenciaturas, Arquitectura y Diseño para la Comunicación Gráfica, ofrecen materias de EA para la EDS.

También establecimos los porcentajes que las asignaturas sobre EA ocupan dentro de los planes de estudio en las licenciaturas artísticas que sí las ofrecen como básicas, especializantes u optativas. Debemos subrayar que aun cuando en Arquitectura existen materias de EA a lo largo de todo el trayecto formativo, sus porcentajes, tanto en su misma categoría como en relación con los créditos totales, son ínfimos: en las básicas, 1.41%; de las especializantes, el rango se sitúa en 0.94% el menor y el 1.41% el mayor; por último, en el caso de las optativas es del 1.41%.

En Diseño para la Comunicación Gráfica el porcentaje es inferior: apenas llega al 1.20% y son materias con carácter de optativas. Por otra parte, pertenecen al plan de estudios saliente; en el nuevo no hay ninguna unidad de aprendizaje sobre EA.

¿Qué sucede entonces? ¿Qué podemos leer con estos resultados? ¿Cómo lograr los perfiles de egreso planteados en su visión? ¿Será suficiente con instalar paneles solares, clasificar los contenedores de basura en orgánica e inorgánica o cambiar los vehículos de los directivos por modelos híbridos para que el estudiante de artes se forme una conciencia sobre el cambio climático y que el arte del cambio climático se vuelva una opción creativa? ¿Cómo conciliar los huertos fotovoltaicos o los focos ahorradores con el uso y la experimentación de materiales sustentables para las diversas carreras artísticas que se enseñan en la U de G? ¿Cómo lograr que, al igual que en las carreras de ingeniería, derecho o salud, existan tesis en el Repositorio Institucional de la U de G sobre el cambio climático de creadores escénicos, pintores, fotógrafos o bailarines? No fue el propósito de esta investigación desestimar el esfuerzo que se realiza en toda la Red Universitaria. Es obvio que las acciones antes mencionadas reportan beneficio dentro y fuera de sus centros universitarios. Reducir las emisiones de carbono como institución es fundamental. La discusión giró sobre qué es lo que falta para que esta política permee de manera consolidada a todas las carreras del campo de las artes.

Por otra parte, el hecho de que fueran licenciaturas afines como Arquitectura, Diseño e incluso Urbanística y Medio Ambiente, que por su condición especializada quedó fuera de este estudio, las que sí presentaron asignaturas de EA y no las otras (Diseño de Artesanías, Artes Audiovisuales, Artes Escénicas para la Expresión Dancística, Artes Escénicas para la

Expresión Teatral, Artes Visuales para la Expresión Fotográfica, Artes Visuales para la Expresión Plástica, Diseño, Arte y Tecnologías Interactivas, Diseño Industrial, Diseño de Interiores y Ambientación, Diseño de Modas, Gestión Cultural e Historia del Arte) nos colocó ante otros cuestionamientos: ¿el músico no construye discursos sonoros sobre las catástrofes y las maravillas que vive? ¿Los bailarines no exhiben propuestas coreográficas de paisajes que solo residen en la memoria? ¿Los artesanos, diseñadores de moda y artistas plásticos no necesitan un espacio educativo formal para reflexionar sobre los materiales que emplean en sus creaciones?

Consideramos que el fondo del asunto radica en que se prepondera la vinculación sobre la formación. Podemos considerar la lógica de esta visión si nos concentramos en la función pedagógica de las artes: las producciones artísticas se exhiben. No obstante, los procesos creativos implican, además de la conceptualización, la producción que tiene que ver con el apropiamiento de saberes y habilidades que se brindan dentro de la escuela.

Mientras no se incluya en los diferentes planes de estudio de las licenciaturas de arte una asignatura sobre cambio climático, ciencias ambientales y en general sobre educación ambiental, de manera básica (tenerlas como optativas no garantiza que todos los estudiantes las cursen), no se cumplirá la aspiración de una educación integral, tal y como se manifiesta en la Política Institucional de Sustentabilidad de la U de G, ni en la misión y visión asentada en el CUAAD. Pasar de la enunciación a la praxis real implica sacar a estas materias del currículo nulo. Ampliar el panorama de los futuros creadores y profesores de arte abre el campo a la transformación y conciencia de un fenómeno que no va a pasar, sino que ya nos está sucediendo y en el que, queramos o no, contribuimos. Cuando Olafur Eliasson, en cooperación con el geólogo Minik Rosing, exhibió bloques de hielo de Groenlandia en Londres (8) exhibió el problema del calentamiento global pero también exhibió el trabajo y el entendimiento que el arte hace de la ciencia. (9)

Sostenemos que la escuela es un espacio privilegiado para cambiar los paradigmas actuales. Proponemos que se ofrezca educación ambiental en todos los planes de estudio de las carreras de arte y que el CUAAD también se incluya entre los Centros Universitarios que trabajan en el eje de Educación

para el Desarrollo Sustentable. En un primer momento, esta puede concretarse en una unidad de aprendizaje de carácter optativo lo cual no implicaría tener que modificar los trayectos académicos ya establecidos, sino que sumaría al desarrollo del alumno. Una vez con los resultados de la implementación general de esta optativa, se podría hacer una valoración que permitiera, entonces sí, incluirla entre las unidades de aprendizaje obligatorias para que el arte del cambio climático deje de ser una asignatura pendiente.

Notas

- (1) En el Anexo I se encuentra un organigrama sobre la estructura de la Red U de G para explicar su integración.
- (2) El Centro Cultural Universitario se encuentra ubicado en el municipio de Zapopan, dentro de la zona conurbana de Guadalajara. Lo integran el Auditorio Telmex, la Plaza Bicentenario, el Conjunto de Artes Escénicas, la Biblioteca Juan José Arreola y Calle 2.
- (3) Es un estudio internacional de arquitectos creado en 1989. Entre sus trabajos destacan el Museum of Modern Art, en San Francisco, el edificio de la Ópera de Oslo y la Biblioteca de Alejandría en Egipto.
- (4) Organismo fundado en 1988, bajo la tutela de la ONU. Elabora informes que permiten la toma de decisiones para las acciones de mitigación en contra el cambio climático. Ejemplo de ello fue su aporte al Acuerdo de París en 2015.
- (5) La Biblioteca Digital de la Universidad de Guadalajara, donde se encuentra el Repositorio Institucional, ofrece un amplio catálogo de revistas científicas, libros y sitios de consulta. Además, cuenta con un acervo de tesis en todos los niveles tanto de los egresados U de G como de autores externos. También brinda herramientas para facilitar la localización de documentos.
- (6) Eisner (1992) planteaba que los procesos cognitivos y los creativos son altamente intelectuales: mientras que la ciencia revela regularidades, el arte inventa singularidades.
- (7) El caso de la Licenciatura en Urbanística y Medio Ambiente quedó fuera porque en ella la licenciatura presenta en su plan de estudios EDS, por lo que resultaba redundante abordarla.

(8) Resulta muy interesante observar cómo los artistas en las diversas obras sobre cambio climático son auxiliados por científicos de diferentes áreas.

(9) En el Anexo II se enlista una serie de sitios para ver más de arte del cambio climático.

Referencias

- Arrieta de Meza, B., y Meza Cepeda, R. (2001). El currículum nulo y sus diferentes modalidades. *Revista Iberoamericana de Educación*, 25(1), 1-9. DOI: <https://doi.org/10.35362/rie2513143>.
- Bourdieu, P. (2009) La escuela según Pierre de Bourdieu. *Taringa*. Recuperado el 3 de febrero de 2022 de <http://www.taringa.net/posts/videos/3094670/La-escuela-seg%C3%BAnPierre-Bourdieu.html>.
- Centro Universitario de Arte, Arquitectura y Diseño (2019). *Misión y visión*. Recuperado el 30 de enero de 2022 de <http://www.cuaad.udg.mx/?q=mision-y-vision>.
- En festival en Los Ángeles, exhiben contaminación ambiental en Jalisco (2022). *El Informador*. Recuperado el 1 de febrero de 2022 de <https://www.informador.mx/jalisco/En-festival-en-Los-Angeles-exhiben-contaminacion-ambiental-en-Jalisco-20220122-0076.html>.
- Eisner, E. (1992). La incomprendida función de las artes en el desarrollo humano. *Revista Española de Pedagogía*, L(191), 15-34.
- Eisner, E. (1994). *Cognición y currículum*. Amorrortu.
- Monteiro, F. (2018) *La profecía, colección fotográfica*. Recuperado el 27 de enero de 2022 de <https://fabricemonteiro.viewbook.com/>.
- Política Institucional de Sustentabilidad (2014). *Programa de Universidad Sostenible*. Recuperado el 4 de febrero de 2022 de <http://www.sostenible.udg.mx/politica-institucional-de-sostenibilidad>.
- Universidad de Guadalajara (2019). *Plan de Desarrollo Institucional 2019-2025, Visión 2030, "Tradición y Cambio"*. Recuperado el 3 de febrero de 2022 de <https://www.udg.mx/pdi>.
- Universidad de Guadalajara (2019b). *Propósitos sustantivos*. Recuperado el 30 de enero de 2022 de <https://pdi.udg.mx/noticias/estructura-conceptual/propositos-sustantivos>.

- Repositorio Institucional de la Universidad de Guadalajara (2021). *Repositorio de Tesis*. Recuperado el 4 de febrero de 2022 de <https://www.riudg.udg.mx/simple-search?query=Arte+y+cambio+climatico>.
- Santana, E., Vaca, G., Nepote, J., Quintanilla, V., Vargas, S., y Platero, N. (2021). Instrucciones para diseñar un Museo de Historia Natural... pero diferente. *Centro Cultural Universitario*. Recuperado el 1 de febrero de 2022 de <http://centrocultural.org.mx/wp-content/uploads/2021/08/IMAGINANDO-EL-MUSEO.pdf>.
- Snøhetta (2022). *Somos Snøhetta*. Recuperado el 30 de enero de 2022 de <https://snohetta.com/>.
- Terradellas, R., y Masgrau, M. (2014). Las aportaciones de E. W. Eisner a la educación: Un profesor paradigmático como docente, investigador y generador de políticas culturales. *Revista Española de Pedagogía*, LXXII (259), 493-508.
- World Wildlife Fund (2018). *Alianza para la Acción Climática Guadalajara*. Recuperado el 2 de febrero de 2022 de https://www.wwf.org.mx/que_hacemos/cambio_climatico_y_energia/alianzas_para_la_accion_climatica/aca_gdl.

Anexos

Anexo I. La Universidad de Guadalajara

Organigrama de la U de G



Sitio web: <https://www.udg.mx/es/organigrama-de-red-universitaria>.

Inicio » Nuestra Universidad

Red Universitaria de Jalisco

331883 lecturas



Zona Metropolitana de Guadalajara, Jalisco



Estado de Jalisco, México

NUESTRA UNIVERSIDAD

- Presentación
- Directorio
- Organización y estructura
- Órganos de Gobierno
- Red Universitaria de Jalisco**
- Normatividad
- Transparencia
- Manual de Identidad Institucional 2020

Centros Universitarios Temáticos

- CUAAD - Arte, Arquitectura y Diseño
- CUCBA - Ciencias Biológicas y Agropecuarias
- CUCEA - Ciencias Económico Administrativas
- CUCEI - Ciencias Exactas e Ingenierías
- CUCS - Ciencias de la Salud
- CUCSH - Ciencias Sociales y Humanidades

Centros Universitarios Regionales

- CUALTOS - Tepatlán de Morelos
- CUCIÉNEGA - Ocotlán, Atotonilco, La Barca
- CUCOSTA - Puerto Vallarta, Tomatlán
- CUCSUR - Autlán de Navarro, Chuatlán
- CULAGOS - Lagos de Moreno, San Juan de los Lagos
- CUNORTE - Colotlán
- CUSUR - Ciudad Guzmán
- CUCIONALA - Tonalá
- CUVALLES - Ameca

Sistema de Educación Media Superior

Sistema de Universidad Virtual

Sitio web: <https://www.udg.mx/es/red-universitaria>.

CUAAD, oferta académica: licenciaturas.

Centro Universitario de Arte, Arquitectura y Diseño

Acerca de CUAAD Oferta académica Aspirantes y Alumnos Extensión y Difusión Investigación Servicios Comunidad



Inicio » Oferta académica

Licenciaturas

En el **Centro Universitario de Arte Arquitectura y Diseño (CUAAD)** la oferta académica está integrado por el conjunto de programas de licenciatura y de posgrados que ofrece a la sociedad.

En esta sección encontrarás la información que te permita conocer a la oferta de **CUAAD**. En esta sección puedes consultar los programas académicos de licenciatura, posgrados así como diplomados.

Licenciatura

- Arquitectura
- Artes Audiovisuales
- Artes Escénicas para la Expresión Dancística y Artes Escénicas para la Expresión Teatral
- Artes Visuales para la expresión plástica y Artes Visuales para la expresión fotográfica
- Diseño, Arte y Tecnologías Interactivas
- Diseño de Interiores y Ambientación
- Diseño de Modas
- Diseño Industrial
- Diseño para la Comunicación Gráfica
- Música
- Urbanística y Medio Ambiente

Licenciaturas

- › Licenciatura en Arquitectura
- › Licenciatura en Artes Audiovisuales
- › Licenciatura en Artes Escénicas para la Expresión Dancística
- › Licenciatura en Artes Escénicas para la Expresión Teatral
- › Licenciatura en Artes Visuales para la Expresión Fotográfica
- › Licenciatura en Artes Visuales para la Expresión Plástica
- › Licenciatura en Diseño, Arte y Tecnologías Interactivas
- › Licenciatura en Diseño para la Comunicación Gráfica
- › Licenciatura en Diseño Industrial
- › Licenciatura en Diseño de Interiores y Ambientación
- › Licenciatura en Diseño de Modas
- › Licenciatura en Música
- › Licenciatura en Urbanística y Medio Ambiente
- › Nivelación Artes

Sitio web: <http://www.cuaad.udg.mx/?q=oferta/licenciaturas>.

Anexo II. Para saber más sobre el arte del cambio climático

A Song of Our Warming Planet. Institute on the Environment, University of Minnesota.

Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=5t08CLczdK4>.

CCCBLAB: Centro de Cultura Contemporánea de Barcelona, Investigación e Innovación en Cultura.

Sitio web: <https://lab.cccb.org/es>.

Climático Teatro en Acción.

Sitio web: <http://www.climatechangetheatreaction.com>.

El Dado en el Arte.

Sitio web: <https://www.eldadodelarte.com>.

El Ciclo Ártico.

Sitio web: <https://www.thearcticcycleq.org>.

GLACIER: Multimedia Climate Change Ballet by Diana Movius.

Disponible en:

https://vimeo.com/129677171?embedded=true&source=vimeo_logo&owner=31509471.

Kenya Recycling Activists Turn Ocean Plastics into Dhow. Al Jazeera English

Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=EcwoyZR5690&t=2s>.

Leandro Erlich crea conciencia sobre el cambio climático con instalación de atasco en Miami

Disponible en:

https://vimeo.com/377233613?embedded=true&source=vimeo_logo&owner=5604695.

My Modern Met

Sitio web: <https://mymodernmet.com/es/pinturas-cambio-climatico-museo-del-prado-wwf/>.

N+1

Sitio web: <https://nmas1.org>.

Thyssen_Bornemiza, MuseoNacional

Sitio web: https://www.museothyssen.org/sites/default/files/document/2018-02/john%20akomfrah_3%20web.pdf.

Cambio climático: un futuro inexorable
se diseñó en la Editorial Universitaria
de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo,
en el mes de noviembre de 2022.
Cuidado editorial del texto: Julio Romano Obregón.