

CAPÍTULO 3: CAUSAS Y CONSECUENCIAS DEL CAMBIO CLIMÁTICO

3.1 Contexto general

Desde hace más de 60 años, los estudios ecológicos y climatológicos comenzaron a mostrar evidencias del proceso de cambio climático, esencialmente de los aumentos en la temperatura y en la concentración de los GEI. Como se reseñó en el capítulo anterior, una gran cantidad de gases se emiten continuamente a la atmósfera, derivados de la actividad humana, cambiando progresivamente la composición de la misma. Por lo que la concentración de varios de los gases de efecto invernadero ha aumentado considerablemente en los últimos 70 años.

Desde mediados del siglo XIX, los científicos saben que el CO₂ es uno de los principales gases de efecto invernadero de importancia en el balance energético de la Tierra. Las mediciones directas de CO₂ en la atmósfera y en el aire atrapado en el hielo muestran que el CO₂ atmosférico aumentó en más del 40% entre 1800 y 2019. Las mediciones de diferentes formas de carbono revelan que este aumento se debe a las actividades humanas. Otros gases de efecto invernadero (en particular, el metano y el óxido nitroso) también están aumentando como consecuencia de las actividades humanas. El aumento de la temperatura de la superficie global observado desde 1900 es consistente con los cálculos detallados de los impactos del aumento observado en los gases de efecto invernadero atmosféricos (y otros cambios inducidos por el hombre) en el balance energético de la Tierra.

Diferentes influencias sobre el clima tienen diferentes firmas en los registros climáticos. Estas huellas dactilares únicas son más fáciles de ver al sondear más allá de un solo número (como la temperatura promedio de la superficie de la Tierra) y al observar los patrones geográficos y estacionales del cambio climático. Los patrones observados de calentamiento de la superficie, cambios de temperatura a través de la atmósfera, aumentos en el contenido de calor del océano, aumentos en la humedad atmosférica, aumento del nivel del mar y mayor derretimiento de la tierra y el hielo marino también coinciden con los patrones que los científicos esperan ver debido a las actividades humanas.

Los cambios esperados en el clima se basan en nuestra comprensión de cómo los gases de efecto invernadero atrapan el calor. Tanto esta comprensión fundamental de la física de los gases de efecto invernadero, como los estudios de huellas dactilares basados en patrones muestran que las causas naturales por sí solas son inadecuadas para explicar los cambios climáticos

observados recientemente. Las causas naturales incluyen variaciones en la producción del Sol y en la órbita de la Tierra alrededor del Sol, erupciones volcánicas y fluctuaciones internas en el sistema climático (como El Niño y La Niña). Se han realizado cálculos utilizando modelos climáticos para simular lo que habría sucedido con las temperaturas globales si solo los factores naturales estuvieran influyendo en el sistema climático. Estas simulaciones arrojan poco calentamiento de la superficie, o incluso un ligero enfriamiento, durante el siglo XX y el XXI. Solo cuando los modelos incluyen influencias humanas en la composición de la atmósfera, los cambios de temperatura resultantes son consistentes con los cambios observados (Royal Society/National Academy of Sciences, 2020).

De otra parte, debe destacarse el hecho notorio del incremento en la producción de literatura científica en torno al cambio climático, especialmente en lo que ha transcurrido del siglo XXI. Fu y Waltman (2022) reportan la generación de más de 120.000 publicaciones científico-técnicas relacionadas con el cambio climático, solamente entre 2001 y 2018, en los ámbitos de las ciencias físicas, paleoclimatología, ecología del cambio climático, tecnología climática y política climática. Si se incluyen las estimaciones de las publicaciones del siglo XX y las producidas entre 2019 y 2023, es muy probable que se llegue a una cifra cercana a 200.000 publicaciones relacionadas con el cambio climático.

Paralelamente, la progresiva acumulación de datos y registros sobre la variación de los factores climáticos (temperatura, precipitación, concentración de CO₂ y otros gases, entre muchos otros) y el desarrollo de complejos modelos matemáticos y de simulación con apoyo de las técnicas computarizadas, han permitido establecer la certeza de los procesos de cambio global en el clima.

3.2 Más allá de los límites

Ya 14 años antes, un destacado grupo de científicos ambientales, incluyendo algunos sociólogos y economistas, (Rockström, Steffen, Noone, Chapin *et al.* 2009), en un artículo ampliamente citado y discutido en la comunidad científica desde entonces, consideran que las presiones antropogénicas en el sistema de la Tierra han llegado a una escala donde ya no puede negarse que existe un abrupto cambio ambiental global, proponiendo un nuevo enfoque de la sostenibilidad integral en el que definen los límites planetarios necesarios dentro de los cuales la humanidad funcione con seguridad. Transgredir uno o más límites planetarios puede ser perjudicial o incluso catastrófico, debido al riesgo de traspasar umbrales que desencadenen un

cambio del medio ambiente no lineal y abrupto, a escala continental y planetaria. Rockström *et al.* (2009) identifican nueve límites planetarios y, con base en conocimientos científicos probados, proponen las debidas cuantificaciones para siete de ellos:

- El cambio climático (concentración de CO₂ en la atmósfera <350 ppm y/o un cambio máximo de 1 W/m² en el forzamiento radiativo),
- Acidificación de los océanos (pH del agua de mar superficial estado de saturación con respecto a la aragonita ≥ 80% del nivel pre-industrial),
- El ozono estratosférico (<5% de reducción en la concentración del O₃ con respecto al nivel preindustrial de 290 unidades Dobson),
- Ciclo biogeoquímico del nitrógeno (limitar la fijación industrial y agrícola de N₂ a 35 Tg N/año) y el ciclo del fósforo (ingreso anual de P en los océanos que no exceda 10 veces el fondo natural desgaste del P),
- El uso mundial de agua dulce (<4.000 km³/año de uso consuntivo de los recursos de escorrentía),
- El cambio del sistema Tierra (<15% de la superficie terrestre libre de hielo bajo tierras cultivadas),
- La velocidad a la que se pierde la diversidad biológica (tasa anual de <10 extinciones por millón de especies).
- La contaminación química y
- La carga de aerosoles atmosféricos.

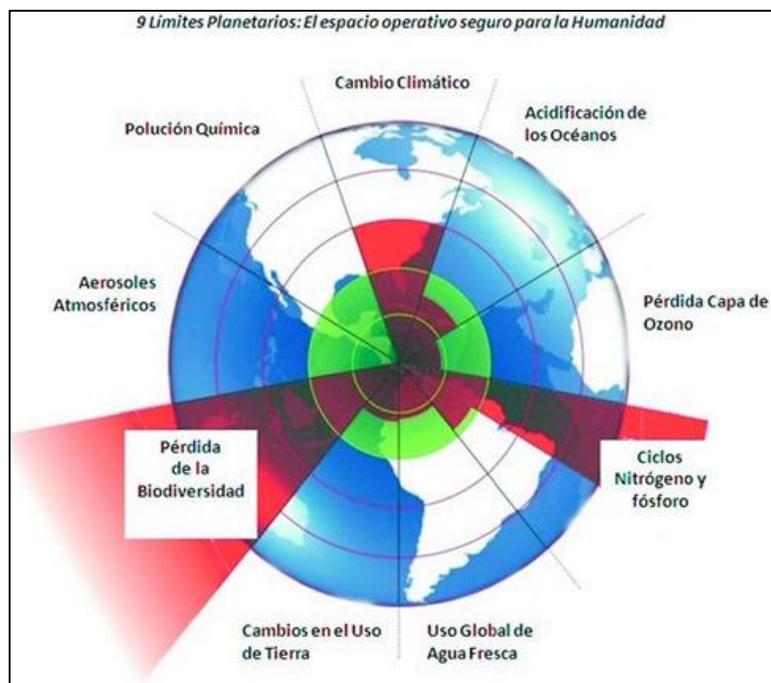
En la Figura 5 (próxima página) se visualizan los límites planetarios identificados por Rockström *et al.* (2009), quienes estiman que la humanidad ya ha transgredido tres límites planetarios: la pérdida de biodiversidad, el cambio climático y los cambios en los ciclos globales del nitrógeno y del fósforo. Los límites planetarios son interdependientes, porque uno de ellos puede transgredir o modificar la magnitud de otros o provocar su modificación. Los impactos sociales de transgredir estos límites estarán en función de la capacidad de recuperación socio-ecológica de las sociedades afectadas. Debe destacarse que seis años después, Rockström (2015), al actualizar el estudio de los límites planetarios, reiterativamente afirma que:

La humanidad se ha convertido en la fuerza dominante de cambio en la Tierra, superando en importancia a las fuerzas geofísicas que hasta ahora han dado forma a la biosfera. En esta nueva época geológica, a menudo llamada *Antropoceno*, se puede agregar un nuevo riesgo profundo a las preocupaciones convencionales sobre la disminución de los recursos y la contaminación local: la acción humana podría empujar al sistema terrestre a cambios abruptos e irreversibles de la ecósfera planetaria. Las repercusiones podrían resultar calamitosas a nivel local, regional y global. (Rockström, 2015: p.1).

Igualmente reconoce y alerta el citado autor que ya se ha sobrepasado un cuarto límite: los cambios de uso de la tierra, lo cual sugiere la probabilidad de que, en el año 2050, la capacidad de carga de la biósfera no pueda cubrir las necesidades de sustento alimentario de la población, que en ese momento estará cercana a los 9.100 millones de habitantes. Rockström propone de manera categórica que la humanidad tiene que cambiar el paradigma actual de producción, consumo y desgaste de los recursos de la biósfera, mediante una transformación radical en el comportamiento individual y colectivo frente al medio ambiente.

Figura 5.

Límites planetarios: el espacio operativo seguro para la humanidad



Fuente: Rockström *et al.*, (2009).

En el mismo contexto, McAlpine, Seabrook, Ryan *et al.* (2015) argumentan la necesidad de un cambio transformacional en las ideas, actitudes y comportamientos de la sociedad y sus líderes, mediante el cambio mental en el intelecto humano mediante la educación y la formación; así como en la motivación individual y colectiva para reconfigurar los valores, preferencias y comportamientos de los individuos y de las colectividades u organizaciones en las que hacen vida (vecindades, iglesias, organizaciones civiles, instituciones de educación, etc.), con base en principios éticos, espirituales y solidarios hacia los otros y hacia el entorno circundante.

Gerten *et al.* (2020), al analizar los planteamientos de los autores citados sobre los límites planetarios, concuerdan con la propuesta de lograr transformaciones significativas en los patrones de producción y consumo vigentes, mejor uso de los fertilizantes nitrogenados y del fósforo, hacia un uso sustentable y racional de los recursos disponibles (tierras y agua para riego), la disminución de sólo un 25% de las pérdidas y desperdicios de alimentos, así como un mejor aprovechamiento y distribución de las cosechas; todo ello permitiría según las proyecciones de Gerten y asociados, lograr niveles de producción alimentaria suficientes para alimentar una población mundial de 10.300 millones de personas más allá del año 2050.

Más recientemente, Ripple *et al.* (2022), en un documento que intenta alertar la inminente emergencia climática a la que nos dirigimos, denuncia que las actuales políticas nacionales e internacionales sobre el medio ambiente, muy a pesar del Acuerdo de París de 2015, conducen a que en el año 2100 el aumento de la temperatura global puede llegar los 3°C, un valor que no se había alcanzado en los últimos 3 millones de años.

3.3 El cambio climático y sus efectos sobre la biósfera

Como se evidenciará a lo largo de este capítulo, el impacto del cambio climático se manifiesta de maneras muy diversas y en ámbitos diferentes, lo cual dificulta la comprensión cabal del problema y sus implicaciones. Porque sucede que muy a menudo los cambios o alteraciones en alguno de los componentes de la biosfera, tiene consecuencias en algún otro o en varios de ellos.

A continuación, se amplía la información relacionada con las principales interacciones y consecuencias del cambio climático en el funcionamiento y procesos de los ecosistemas y sus componentes.

Nolan, Overpeck, Allen *et al.* (2018) indican que los ecosistemas terrestres son muy sensibles al cambio de temperatura y sugieren que sin reducciones importantes en las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera (es decir, en línea con las previstas en el Acuerdo de París de 2015), la mayoría de los ecosistemas terrestres en todo el mundo corren el riesgo de transformación importante, con la consiguiente interrupción de los servicios de los ecosistemas y los impactos en la biodiversidad.

El rápido cambio climático antropogénico está afectando a los ecosistemas a través de cambios en las condiciones medias y en la variabilidad climática, junto con otros cambios asociados, como el aumento de la acidificación de los océanos y las concentraciones de dióxido de carbono en la atmósfera. También interactúa con otras presiones sobre los ecosistemas, incluida la degradación, la defaunación y la fragmentación. Es necesario comprender la dinámica ecológica de estos impactos climáticos, identificar puntos críticos de vulnerabilidad y resiliencia e identificar intervenciones de gestión que puedan ayudar a la resiliencia de la biosfera al cambio climático. Es necesario explorar y cuantificar los mecanismos, el potencial y los límites de las soluciones al cambio climático basadas en la naturaleza. Concluimos identificando algunas prioridades para la investigación académica y la implementación práctica, con el fin de maximizar el potencial para mantener una biosfera diversa, resistente y que funcione bien en las condiciones desafiantes del siglo XXI (Malhi, Franklin, Seddon *et al.*, 2020).

A) Energía y clima

En los últimos 200 años la energía fósil ha sido consumida por los seres humanos a una velocidad muy superior a la que se regenera, por lo que se considera no renovable. Esta energía no participa naturalmente en el balance de los ciclos biogeoquímicos del carbono y el oxígeno y los flujos unidireccionales de energía que ocurren en la biósfera, detonados por la energía solar incidente sobre la Tierra. Más bien, el consumo de energía no renovable y sus consecuencias crea perturbaciones en dichos ciclos, al inyectar grandes cantidades de CO₂ y otros gases a la biósfera. El acelerado desarrollo de la humanidad, durante los últimos 150 años, se ha basado en la capacidad de incrementar los aportes de energía requeridos para la transformación, aprovechamiento y producción de bienes y servicios, a partir de los recursos naturales renovables y no renovables. Entre los recursos no renovables esenciales están los combustibles fósiles, que no son más que la energía contenida en sumideros de carbono, acumulada durante los últimos 600 millones de años, depositada en capas profundas de la corteza terrestre en forma de carbón (hulla), petróleo y gas.

Esta energía, contenida en la biomasa producida en la época carbonífera, proviene de los procesos naturales de producción de los organismos vivos de la época. Una parte de esa biomasa, compuesta principalmente por fitoplancton, zooplancton, algas y otros seres vivos, se acumuló en las profundidades de los mares y la corteza terrestre, quedando enterradas en capas de sedimentos terrestres, producto de la dinámica tectónica y los cataclismos ocurridos en esa época. Dicha energía se denomina energía fósil, capturada en compuestos de carbono e hidrógeno, que al contacto con el oxígeno se libera como calor (Ahuja and Tatsutani, 2008).

El desarrollo científico/tecnológico actual y la capacidad de extracción y utilización de la energía contenida por millones de años en los depósitos de carbón, petróleo y gas han permitido que la raza humana, en aras de la satisfacción de sus necesidades y modos de vida, haya impulsado el desarrollo urbano e industrial en los países desarrollados, al mismo tiempo que ha introducido perturbaciones significativas en los procesos y funcionamiento de los ecosistemas. De esta manera, ha alterado, fragmentado o destruido hábitats en los distintos biomas y ecosistemas creando desbalances en los ciclos biogeoquímicos y el reciclaje de la materia.

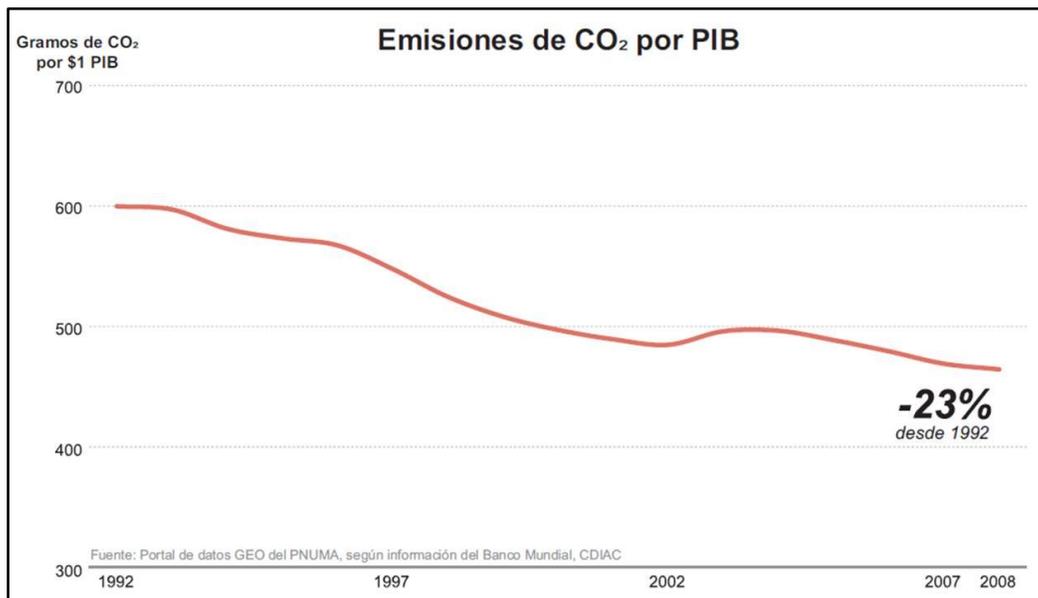
Los vehículos de transporte, fábricas industriales y plantas de generación de electricidad expulsan en la atmósfera miles de millones de toneladas de CO₂ anualmente. En este contexto, el consumo exacerbado de energía fósil provoca la emisión de grandes cantidades de CO₂ y otros compuestos contaminantes de la atmósfera. Esta transferencia de carbono desde las profundidades de la corteza terrestre a la atmósfera, combinada con las alteraciones y reducción de la cubierta vegetal y del carbono del suelo, constituyen factores determinantes en las alteraciones climáticas que nos afectan actualmente (Omer, 2010).

Aun cuando en los últimos 40 años se ha mejorado la eficiencia en el aprovechamiento de los recursos energéticos (Figura 6), en todo el mundo existe hoy día la necesidad urgente de una profunda transformación de la infraestructura de producción y uso de energía actuales hacia niveles de mayor eficiencia y sustentabilidad (UN Environment, 2019). Este hecho es ampliamente reconocido en el contexto de la creciente preocupación sobre el cambio climático global. Pero sucede a menudo que las preocupaciones sobre sostenibilidad a largo plazo del medio ambiente se ven eclipsadas por urgencias más inmediatas de acceso y costos de la energía.

De acuerdo con el informe sobre fuentes de energía y mitigación del cambio climático del IPCC (2011), la demanda de energía y servicios asociados, para cumplir con el desarrollo social y económico y mejorar la salud humana bienestar y la salud, va en aumento. Desde 1850, aproximadamente, el uso global de combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas) ha aumentado progresivamente hasta dominar el suministro de energía, dando lugar a un rápido crecimiento del dióxido de carbono (CO₂) liberado a la atmósfera. Para finales de 2008, las concentraciones han aumentado a más de 420 ppm, lo que representa un incremento de 47% sobre los niveles preindustriales.

Figura 6.

Relación entre el contenido de CO₂ en la atmósfera y el Producto Interno Bruto mundial, entre 1992 y 2008



Fuente: UNEP/GEO5 (2012).

No obstante, hay un reconocimiento unánime acerca de la necesidad de desarrollar y utilizar fuentes de energías renovables, o limpias, como las denominan los expertos, tales como energía eólica, energía solar, energía geotérmica y biocombustibles (etanol), en lugar de los combustibles fósiles altamente contaminantes. Estos temas relacionados con la energía renovable son pertinentes, particularmente desde la perspectiva de los países en desarrollo, donde una parte significativa de la población aún carece de acceso a servicios básicos de energía eléctrica.

Thomas Friedman, intelectual y columnista del New York Times y ganador de varios premios Pulitzer, plantea la hipótesis de que, a partir del año 2000, vivimos una nueva era: “la era del clima y la energía”, la cual viene determinada por una cadena de eventos históricos ya mencionados en secciones anteriores –crecimiento poblacional, creciente urbanización, globalización, crecimiento económico no sustentable, deterioro de los ecosistemas, pérdida de biodiversidad, cambio climático, entre otros– (Friedman, 2008). Pero destaca un aspecto que considera fundamental: el mundo emprendió en los años de la década de los 60 una senda en la que empezó a aumentar vertiginosamente la demanda global de energía, de recursos naturales y de alimentos. Ello ha permitido la reconstrucción económica de Europa y Japón después de la II Guerra Mundial y, posteriormente, un desarrollo acelerado en los países industrializados, alcanzando un gran bienestar y altos niveles de calidad de vida y mejorando la eficiencia en el uso de la energía. Pero en muchos países en desarrollo, en su deseo de alcanzar los niveles y calidad de vida de los industrializados, han incrementado similarmente la demanda de bienes y servicios, y aparejadamente la demanda de energía, todo ello facilitado por la globalización de la economía.

Sin embargo, la realidad indica que este proceso es insostenible en el tiempo; el consumo de energía basada en los combustibles fósiles es la causa principal de los problemas ambientales; ha habido una especie de ceguera desde el punto de vista medioambiental, en todos los niveles y estratos. A pesar de los esfuerzos realizados durante los últimos 20 años, la situación actual se ha empeorado, al punto de poder estar llegando a un punto de inflexión o umbral más allá del cual las consecuencias pueden ser catastróficas. La irrupción de los países emergentes (BRICS¹³) en la economía global está acelerando el proceso. Para Friedman, se necesita rediseñar y reinventar el modo de vida en los países industrializados (y en desarrollo¹⁴), a través de una economía más limpia, más eficiente, sobre la base de energía renovable limpia o “verde”, no contaminante, donde priven los valores y actitudes conservacionistas hacia los recursos naturales y la biodiversidad, las innovaciones tecnológicas limpias, el aprendizaje de las experiencias exitosas de producción y consumo limpios y los nuevos valores éticos como la responsabilidad individual, social e institucional sustentables, a escala global. De hecho, este es uno de los principios fundamentales sobre los cuales descansa la propuesta de la Economía verde.

¹³ Brasil, Rusia, China, India y Sur África

¹⁴ Añadido nuestro

3.4 El cambio climático está poniendo en riesgo la seguridad energética en todo el mundo

Así lo señala la Organización Meteorológica Mundial de forma tajante en su último Informe Anual sobre el Estado de los Servicios climáticos¹⁵, presentado en octubre de 2022, en la Consejo Mundial de Energía. El cambio climático afecta el suministro de combustible, la producción de energía y la resiliencia física de la infraestructura energética actual y futura. La generación de electricidad existente en la actualidad está siendo puesta a prueba debido a las olas de calor y las sequías, por lo que es aún más importante reducir las emisiones de combustibles fósiles. El impacto de estos fenómenos meteorológicos, hídricos y climáticos extremos más frecuentes e intensos ya es evidente.

En consecuencia, la preocupación por cómo repercute el aumento de la temperatura mundial en la seguridad energética es primordial en la carrera hacia las emisiones netas cero que promueve la ONU. Las emisiones netas cero se consiguen cuando el CO₂ emitido por las actividades humanas se equilibra mundialmente con el CO₂ que se elimina en un período específico.

Para 2050, las necesidades mundiales de electricidad —que aumentarán con el transcurso de los años, y en las que la electrificación será un factor estratégico fundamental para abordar los objetivos de las emisiones netas cero— *se cubrirán principalmente con energías renovables*, entre las que la energía solar será la mayor fuente de suministro. La transición a las energías renovables contribuirá a aliviar el creciente estrés hídrico mundial, puesto que la cantidad de agua utilizada para generar electricidad mediante la energía solar y eólica es mucho menor que la que utilizan las centrales eléctricas más tradicionales, las cuales se abastecen de combustibles fósiles o energía nuclear.

B. Biodiversidad y clima

La biodiversidad constituye la red vital de la que dependemos para muchísimas cosas —alimentos, agua, medicinas, un clima estable y crecimiento económico, entre otras. Más de la mitad del PIB mundial depende de la naturaleza. Más de mil millones de personas dependen de los bosques para su subsistencia. Y la tierra y el océano absorben más de la mitad de las emisiones de carbono. Pero la naturaleza está en crisis. El cambio climático desempeña un papel cada vez más importante en el declive de la biodiversidad. Como se mencionó en el capítulo 3, la pérdida de la biodiversidad es uno de los límites planetarios que ya ha sido transgredido, tanto en la biodiversidad genética como en la de especies.

¹⁵ <https://public.wmo.int/en/our-mandate/climate/wmo-statement-state-of-global-climate>

Es conveniente recordar las conclusiones de Charles Perrings, reconocido académico de la Universidad Estatal de Arizona, en un informe solicitado por el Banco Mundial (World Bank, 2010), quién resume acertadamente las implicaciones recursivas entre el cambio climático y la biodiversidad. Señala el autor que el cambio climático está induciendo una respuesta de adaptación por parte de la biodiversidad mundial. Esto incluye cambios en la distribución de las especies y la abundancia, los cambios en el momento de la reproducción en animales y plantas, los cambios en patrones de migración de animales y aves, y los cambios en la frecuencia y severidad de los brotes de plagas y enfermedades. Pero en la actualidad en muchos casos la adaptación no ha sido suficiente y los umbrales de desaparición de muchas especies se han alcanzado. Hasta un millón de especies están amenazadas por el riesgo de extinción, siendo para muchas de ellas cuestión de décadas. Ecosistemas únicos como partes de la selva amazónica están pasando de ser sumideros de carbono a fuentes de carbono debido a la deforestación. Y 85% de los humedales, como las marismas y los manglares, que absorben grandes cantidades de carbono, han desaparecido. El cambio climático ha transformado los ecosistemas marinos, terrestres y de agua dulce en todo el mundo. Ha provocado la pérdida de especies locales, el aumento de enfermedades y ha impulsado la mortalidad masiva de plantas y animales, dando lugar a las primeras extinciones provocadas por el clima (ONU, 2023).

El comportamiento de algunas especies está alterándose y ciertas relaciones mutualísticas de larga data pueden verse interrumpidas, así como la aparición de amenazas de extinción dentro de los hábitats y las condiciones que son necesarias para la supervivencia de especies migratorias (Mooney *et al.*, 2009). Algunos de estos efectos son el resultado directo de cambios en la temperatura, las precipitaciones, el nivel del mar o las tempestades. Otros son el efecto indirecto de los cambios, por ejemplo, en la frecuencia de los incendios forestales cada vez más frecuentes debido al incremento global de la temperatura.

En general, las especies se están moviendo de menor a mayor altitud, y de menores a mayores latitudes, a pesar de que la rapidez de la respuesta varía considerablemente. En cualquier ecosistema, los cambios en la frecuencia e intensidad de las perturbaciones determinan la velocidad de los cambios en los ensambles de plantas y animales y sus interacciones, algunas veces potenciadas, pero en otras con consecuencias que pueden ser letales (Walther, 2010).

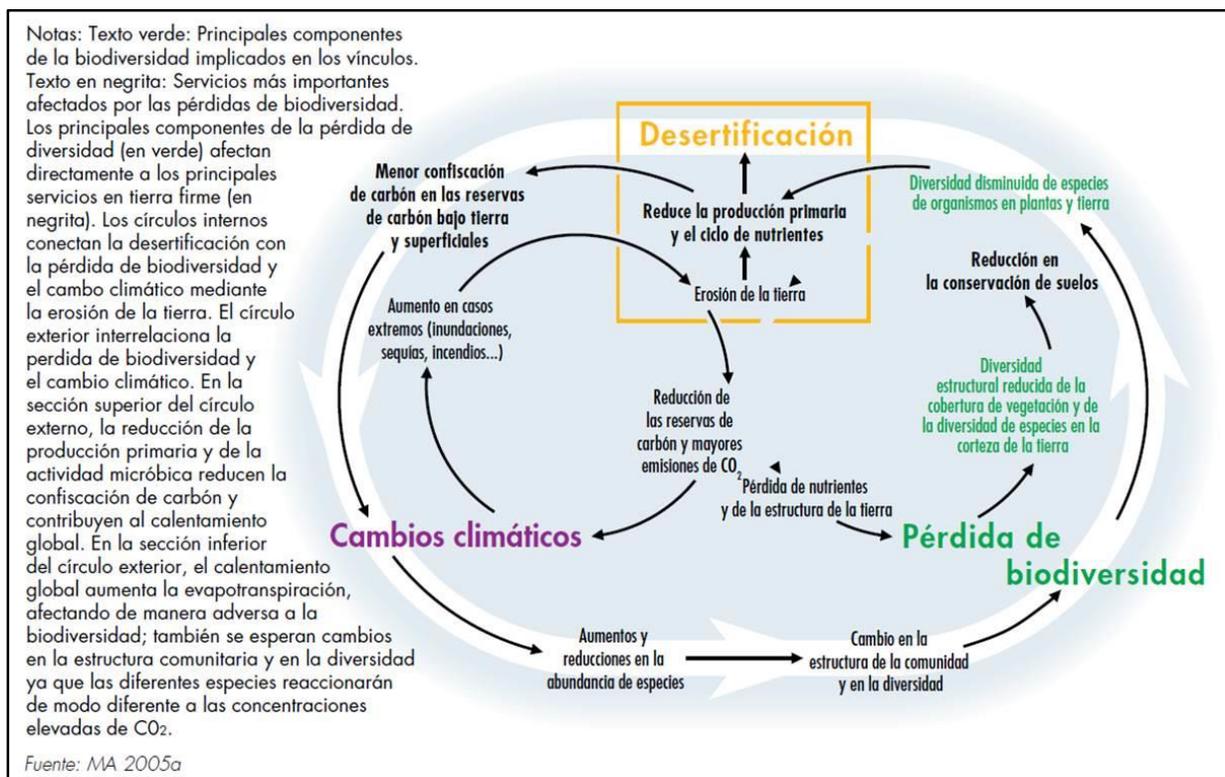
Desde una perspectiva conservacionista, la característica fundamental del cambio climático es que afecta diferencialmente la probabilidad de que las especies puedan ser llevadas a la extinción. Se ha argumentado que el riesgo de extinción es probable que aumente en muchas

especies que ya son vulnerables, debido en parte al tiempo que les toma a muchas especies adaptarse al cambio climático. Estos impactos sobre la biodiversidad son motivo de preocupación por el costo potencialmente alto asociado con las enfermedades zoonóticas emergentes y los cambios en la distribución de los vectores de enfermedades existentes. Concretamente, los cambios en las prácticas agrícolas han sido implicados en la aparición de una serie de enfermedades zoonóticas.

Las complejas interacciones entre la biodiversidad, el cambio climático y los ecosistemas han dado origen a situaciones emergentes, como lo es la desertificación de algunas regiones, como se pueden visualizar esquemáticamente en la Figura 7.

Figura 7.

Interacciones entre el cambio climático y a biodiversidad y la desertificación



Fuente: UNEP/GEO4 (2007)

3.5 Un enfoque sinérgico entre la biodiversidad y el clima reduciría los efectos negativos

El informe conjunto del IPCC y la Plataforma internacional para la Biodiversidad y los Servicios Ecosistémicos (IPBES) (Pörtner, Scholes, Agard *et al.*, 2021), constituye un recurso esencial para la comprensión del tema de esta sección, como lo describen los propios autores:

Los impactos del cambio climático y la pérdida de biodiversidad son dos de los desafíos y riesgos más importantes para las sociedades humanas; al mismo tiempo, el clima y la biodiversidad están entrelazados a través de vínculos mecánicos y retroalimentaciones. El cambio climático exacerba los riesgos para la biodiversidad y los hábitats naturales y gestionados; al mismo tiempo, los ecosistemas naturales y gestionados y su biodiversidad juegan un papel clave en los flujos de gases de efecto invernadero, así como en el apoyo a la adaptación climática. ... Limitar el calentamiento global para garantizar un clima habitable y proteger la biodiversidad son objetivos que se apoyan mutuamente, y su logro es esencial para brindar beneficios a las personas de manera sostenible y equitativa. (Pörtner *et al.*, 2021: p.14)

Las principales conclusiones del estudio conjunto IPCC/IPBES (Pörtner *et al.*, 2021) se sintetizan a continuación:

- El aumento del consumo de energía, la sobreexplotación de los recursos naturales y la transformación sin precedentes de los paisajes terrestres, de agua dulce y marinos, en los últimos 150 años, han ido aparejados con los avances tecnológicos y han respaldado mejores niveles de vida para muchas sociedades y regiones. Sin embargo, también han provocado cambios en el clima y una disminución acelerada de la diversidad biológica en todo el mundo, ambos afectando negativamente muchos aspectos de la buena calidad de vida. El reforzamiento mutuo del cambio climático y la pérdida de biodiversidad significa que la resolución satisfactoria de cualquiera de los problemas requiere la consideración del otro.
- Las políticas previas, hasta ahora, han abordado en gran medida los problemas del cambio climático y la pérdida de biodiversidad de forma independiente. Las políticas que abordan simultáneamente las sinergias entre la mitigación de la pérdida de biodiversidad oportunidad de maximizar los cobeneficios y ayudar a cumplir las aspiraciones de desarrollo para todos.

- *A medida que avanza el cambio climático, la distribución, el funcionamiento y las interacciones de los organismos y, por lo tanto, de los ecosistemas, se alteran cada vez más.* La capacidad de adaptación de la mayoría de los ecosistemas y sistemas socioecológicos se verá superada por el cambio climático antropogénico constante, y se requerirá una capacidad de adaptación significativa para hacer frente al cambio climático residual, incluso con una reducción ambiciosa de las emisiones.
- En un mundo cada vez más afectado por el cambio climático, *el mantenimiento de la biodiversidad depende de esfuerzos de conservación mejorados y bien enfocados, coordinados y respaldados por fuertes esfuerzos de adaptación e innovación.* Los enfoques de conservación de la biodiversidad, como las áreas protegidas, han sido esenciales para los éxitos hasta la fecha, pero, en conjunto, han sido insuficientes para detener la pérdida de biodiversidad a escala mundial.
- *Un nuevo paradigma de conservación abordaría los objetivos simultáneos de un clima habitable, una biodiversidad autosuficiente y una buena calidad de vida para todos.* Los nuevos enfoques incluirían tanto la innovación como la adaptación y ampliación de los enfoques existentes. Las acciones para proteger, gestionar de manera sostenible y restaurar los ecosistemas naturales y modificados que abordan los desafíos sociales, como la mitigación y adaptación climáticas, a menudo se denominan soluciones basadas en la naturaleza (SBN).
- Las SBN pueden desempeñar un papel importante en la mitigación del cambio climático, pero se debate su alcance y solo pueden ser efectivas con reducciones ambiciosas en todas las emisiones de gases de efecto invernadero causadas por el hombre. Las SBN pueden ser más efectivas cuando se planifican para la longevidad y no se enfocan únicamente en el secuestro rápido de carbono.
- El área de tierra y océano intacta y efectivamente protegida que se requiere para cumplir con los tres objetivos de un clima habitable, una biodiversidad autosuficiente y una buena calidad de vida aún no está bien establecida. Aunque la implementación de SBN también crea beneficios colaterales para la adaptación al cambio climático, para la naturaleza y sus contribuciones a las personas. Evitar y revertir la pérdida y degradación de ecosistemas terrestres y oceánicos ricos en carbono y especies es de suma importancia para las acciones combinadas de protección de la biodiversidad y mitigación del cambio climático con grandes cobeneficios de adaptación.

- Las prácticas agrícolas y forestales sostenibles pueden mejorar la capacidad de adaptación, aumentar la biodiversidad, aumentar el almacenamiento de carbono en las tierras agrícolas y los suelos y la vegetación de los bosques, y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Tanto en los sistemas terrestres como marinos, existen opciones para combinar medidas basadas en la naturaleza y basadas en la tecnología para la mitigación y adaptación al cambio climático, al mismo tiempo que se contribuye a la biodiversidad.

C. Agua y Clima

El agua es el principal medio a través del cual el cambio climático influye en los ecosistemas de la Tierra y por lo tanto los medios de subsistencia y el bienestar de las sociedades. Los cambios en las precipitaciones –debido a las temperaturas más altas que el promedio y las temperaturas extremas– afectarán la disponibilidad de recursos hídricos a través de cambios en la forma, frecuencia, intensidad y distribución de las precipitaciones, la humedad del suelo, el derretimiento de los glaciares y la capa de hielo de los polos y los flujos de aguas subterráneas. El calentamiento global tendrá un impacto sobre la temperatura del agua, que se espera que tengan un efecto sustancial en el flujo de energía y en el reciclaje de la materia. Esto a su vez puede dar lugar a proliferación de algas, un aumento en el afloramiento de cianobacterias tóxicas y en consecuencia una disminución de la biodiversidad. La composición y calidad del agua en ríos y lagos podrían verse afectados debido a las alteraciones en la precipitación y la temperatura de derivados del cambio climático (Bates *et al.*, 2008). Hay una creciente evidencia de que esto ya está ocurriendo en muchas regiones, provocando un mayor deterioro de la calidad del agua en el futuro. El panorama mundial, sin embargo, es complicado y desigual, en las diferentes regiones, cuencas hidrográficas y localidades, las cuales están siendo afectadas en diferentes grados y de diversas maneras (UNEP, 2009; 2010; UN-Water, 2019¹⁶).

Desde el lado de la oferta, UN-WATER (2010; 2019) resalta que el cambio climático afecta el ciclo del agua directamente y la cantidad y calidad de los recursos hídricos disponibles para satisfacer las necesidades de las sociedades y los ecosistemas de diversas maneras:

¹⁶ UN-WATER es una iniciativa interinstitucional de las 28 organizaciones que componen el sistema de las Naciones Unidas. Se encarga de reforzar la coordinación y la coherencia entre las entidades de las Naciones Unidas que abordan cuestiones relativas a todos los aspectos del agua dulce y del saneamiento tales como los recursos hídricos superficiales y subterráneos, la interfaz entre el agua dulce y el agua del mar y las catástrofes naturales relacionadas con el agua. Mayor información disponible en el sitio <http://www.unwater.org/index.html>.

- La creciente demanda mundial de agua conlleva un aumento de la necesidad de bombeo, transporte y tratamiento de agua con un alto consumo energético, y ha contribuido con la degradación de sumideros de carbono fundamentales que dependen del agua como, por ejemplo, las turberas. Asimismo, algunas medidas de mitigación del cambio climático, como el fomento del uso de biocombustibles, pueden exacerbar aún más la escasez de agua. El aumento de la intensidad de las precipitaciones, causada por el cambio climático, provoca una mayor escorrentía y menor recarga de los acuíferos.
- El retroceso de los glaciares, la descongelación del permafrost y los cambios en las precipitaciones de nieve y lluvia pueden afectar a los flujos estacionales.
- Los períodos secos más largos tienden a reducir la recarga de los acuíferos, reducir los caudales mínimos en los ríos y la disponibilidad de agua, la agricultura, el abastecimiento de agua potable, la fabricación y producción de energía, la refrigeración de las plantas térmicas y la navegación.
- El cambio climático afectará directamente la demanda de agua de la industria y uso doméstico o de riego. La demanda de agua para el riego aumentaría a medida que aumenta la transpiración, debido a las altas temperaturas.
- Un impacto de primer orden del cambio climático es la propagación de enfermedades infecciosas, muchas de las cuales se transmiten a través del agua y ya representan una carga considerable para las poblaciones vulnerables de todo el mundo. Las enfermedades transmitidas por el agua, como el cólera, son muy sensibles a los cambios de temperatura, precipitación y humedad.

Por otra parte, el aumento de la intensidad de las lluvias, el derretimiento del hielo glaciar y la deforestación a gran escala ya están aumentando la erosión del suelo y reduciendo los nutrientes en la capa arable. En consecuencia, habrá cambios en el funcionamiento de los ecosistemas, lo que probablemente incrementará la pérdida de la biodiversidad y los daños en los servicios ecosistémicos. El aumento del nivel del mar tendrá graves efectos sobre los acuíferos costeros, que suministran gran parte del agua a muchas ciudades y comunidades aledañas. La pérdida de humedales también pone en peligro la salud y la productividad futuras de los ecosistemas y amenaza a la biodiversidad, alterando la idoneidad de extensas regiones para la producción de alimentos y la presencia de poblaciones humanas, y contribuye a las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero. Por lo tanto, su protección y recuperación es un componente esencial en cualquier estrategia general de adaptación al clima.

Este fenómeno también tendrá un impacto severo en la producción de alimentos en las principales regiones deltaicas, las cuales constituyen fuentes de alimentos en muchos países. Los ecosistemas costeros también se verían profundamente afectados, incluyendo:

- la pérdida de la productividad de los estuarios,
- la eliminación de hábitats para la reproducción de especies,
- los cambios en las islas que actúan como barreras,
- la pérdida de humedales, y
- una mayor vulnerabilidad tanto a la erosión costera como a las inundaciones.

Una gestión conjunta de las aguas superficiales y subterráneas puede potenciar la resiliencia a las sequías y hacer frente a la escasez de agua, lo que permitiría ampliar la capacidad total de almacenamiento de agua en la región. Las iniciativas para la gestión conjunta del agua, como la recarga gestionada de los acuíferos y el control de crecidas para el riego son soluciones sostenibles, rentables y escalables y podrían ser especialmente importantes en el contexto de los países en desarrollo. Las intervenciones en forma de políticas, como la planificación urbana integrada, la gestión de riesgos, el uso generalizado de sistemas de alerta temprana y la participación de las comunidades pueden reducir la exposición de las ciudades al riesgo de crecidas y sequías (UN-Water, 2019).

D. Agricultura y Clima

Uno de los factores de mayor relevancia, relacionado con el cambio climático, es que la agricultura, además de constituir un servicio ecosistémico esencial para el ser humano, también es una fuente importante de emisión de CO₂, N₂O y de CH₄, tres de los principales gases invernadero. La continua expansión de la superficie cultivada a expensas de la deforestación, principalmente en los países en desarrollo, disminuye la capacidad natural de absorción del anhídrido carbónico.

La agricultura mayormente intensiva en los países desarrollados (Norteamérica y Europa y Japón) y emergentes (China, India, Brasil, entre otros) está basada en el uso masivo de energía, especialmente combustibles para la mecanización intensiva, la aplicación de grandes cantidades de fertilizantes para los cultivos y pasturas, sistemas de riego poco eficientes, y la aplicación generalizada de agroquímicos (herbicidas, insecticidas, fungicidas, antiparasitarios, antibióticos, entre otros). Ello trae como consecuencia la contaminación de suelos, ríos, lagos, acuíferos y, en general, un gran deterioro ambiental de las zonas y sistemas de producción intensiva, por lo

general cercanas a los grandes centros urbanos. Por otra parte, los rebaños ganaderos, especialmente los rumiantes (bovinos, caprinos y ovinos) generan grandes cantidades de CH₄ como producto de la digestión de la fibra que consumen, representando cerca de 13% de las emisiones globales de CH₄ (IPCC, 2014; 2022).

En contraposición, el cambio climático amenaza con provocar daños irreversibles a los recursos naturales de los cuales depende la agricultura. Aunque un calentamiento moderado puede mejorar ligeramente el rendimiento de los cultivos en algunas áreas, en general, las consecuencias negativas eclipsarán cada vez más a las positivas. Las inundaciones y sequías se están volviendo cada vez más frecuentes y graves, lo que probablemente afectará seriamente a la productividad agrícola y a los medios de subsistencia de las comunidades rurales de los países en desarrollo y aumentará el riesgo de que se produzcan conflictos por la tierra y el agua. En países como Etiopía, Somalia, Sudan y Benín las deficiencias en la precipitación y del agua para riego han provocado migraciones de ingentes grupos de población, que terminan por convertirse en refugiados ambientales, con todas las consecuencias socio-políticas que ello implica. En extensas regiones de todos los continentes, la explotación continuada del agua de los grandes acuíferos, está haciendo cada vez más difícil extracción, en tanto que la reposición natural de los mismos es mucho más lenta que la tasa de uso para riego y consumo a la cual están sometidos. Además, el cambio climático propicia la propagación de plagas y especies invasoras y puede aumentar el alcance geográfico de algunas enfermedades.

El reconocimiento de que el cambio climático podría tener consecuencias negativas para la producción agrícola ha generado el deseo de aumentar la resiliencia en sistemas agrícolas. La agricultura practicada bajo enfoques agroecológicos puede ayudar a mitigar el cambio climático, al favorecer la captura de carbono por el suelo, reducir el uso de recursos químicos (pesticidas y fertilizantes), mejorar y favorecer la biodiversidad y propiciar el reciclaje de recursos dentro de las unidades de producción. Un método racional y rentable puede ser la aplicación de una mayor diversificación de los cultivos agrícolas. La diversificación de cultivos puede mejorar la resistencia en una variedad de formas: al generar una mayor capacidad para suprimir los brotes de plagas y amortiguar la transmisión de patógenos, que pueden empeorar bajo escenarios climáticos futuros, así como por la sobrecarga de la producción agrícola debida a los efectos de una mayor variabilidad del clima y los fenómenos extremos. Sin embargo, los incentivos económicos que fomentan la producción de un selecto grupo de cultivos, el impulso de las estrategias de agrobiotecnología, y la creencia de que los monocultivos son más productivos que los sistemas diversificados, han sido obstáculos en la promoción de esta estrategia. No obstante, la

diversificación de cultivos puede ser implementada en una variedad de formas y de escalas, permitiendo a los agricultores elegir una estrategia que aumente tanto la resiliencia como la obtención de beneficios económicos (Lin, 2011).

Recientemente ha surgido el debate en torno a la interacción entre el uso de la tierra, la producción alimentaria y la producción de biocombustibles, referida a sus implicaciones para los programas como las Metas de Desarrollo del Milenio de la ONU, la Erradicación del Hambre y la Pobreza, el Desarrollo Sostenible y la mitigación/adaptación al cambio climático. Si bien es cierto que los biocombustibles se perfilan como una alternativa para reducir las emisiones causantes del cambio climático, no menos cierto es que el uso de la superficie cultivable para la producción de cultivos a ser utilizados en la producción industrial de biocombustibles (maíz, caña de azúcar, palma aceitera, yuca, entre otros) va en desmedro de la producción de alimentos para una población cada vez mayor en el planeta. La UNEP (2009) reconoce que esta situación, junto con los eventos climáticos extremos de los últimos años, los altos precios de los alimentos y la especulación en los mercados internacionales, son factores determinantes de la crisis e inseguridad alimentaria de los años recientes. Igualmente señalan que la competencia entre producción de alimentos y producción de combustibles, junto con la continua degradación de las tierras arables puede provocar en el futuro una disminución de 8 a 20% en la superficie agrícola requerida para mediados del siglo XXI.

En este contexto, Harvey y Pilgrim (2011) plantean que esta situación se debe, principalmente a la creciente demanda y el cambio de los patrones alimentarios, la demanda de energía y materiales derivados de la biomasa, en el contexto del agotamiento del petróleo, las emisiones de gases de efecto invernadero de las actuales prácticas agrícolas, el cambio de uso del suelo y el consecuente cambio climático en sí, como una restricción de los altos niveles de productividad sobre la tierra disponible para el cultivo. Consideran que la suposición de que el aumento de la demanda de materiales energéticos aumentará la competencia por la tierra se basa en la premisa de que, en primer lugar, los recursos petroquímicos serán menores y a un costo cada vez más alto y volátil, y que, en segundo lugar, los sustitutos de los combustibles fósiles para el transporte se obtendrán en medida significativa sólo por los biocombustibles y la biotecnología industrial. Ante la mayor demanda combinada de alimentos y de energía, la presión sobre la conversión de tierras se incrementa, dando lugar a un mayor cambio climático, que a su vez puede afectar la productividad y la disponibilidad de tierra, creando así un círculo vicioso potencial. A ello se agrega la tendencia a la disminución en la tasa de crecimiento de los rendimientos de los principales cultivos observada durante los últimos 40 años. Dada la urgencia y los cambios

radicales que se necesitan para cumplir con la compleja interacción energía-alimentos-ambiente, serán necesarios nuevos modos de gobernanza económica, a escala nacional, regional e internacional, incluyendo nuevos marcos regulatorios para la sustentabilidad y nuevos enfoques en las relaciones geopolíticas y económicas globales entre países y sectores económicos.

A partir de 2010, la FAO viene promoviendo el concepto y la estrategia de la “agricultura climáticamente inteligente”, como una alternativa para hacer frente a los efectos deletéreos que el cambio climático pueda tener sobre más de 800 millones de almas en el globo que dependen enteramente de la producción agrícola de subsistencia (FAO, 2016). La agricultura climáticamente inteligente (CSA, siglas en inglés) constituye un enfoque que ayuda a orientar las acciones necesarias para transformar y reorientar los sistemas agrícolas con el fin de apoyar eficazmente el desarrollo y garantizar la seguridad alimentaria en el contexto de un clima cambiante. La CSA persigue tres objetivos principales: el aumento sostenible de la productividad y los ingresos agrícolas, la adaptación y la creación de resiliencia ante el cambio climático y la reducción y/o absorción de gases de efecto invernadero, en la medida de lo posible.

La CSA constituye un enfoque para desarrollar estrategias agrícolas encaminadas a garantizar la seguridad alimentaria sostenible en el marco del cambio climático. Para la FAO, la CSA provee los medios para ayudar a las partes interesadas a identificar, en los niveles local, nacional e internacional, estrategias agrícolas acordes con las condiciones de cada lugar.

El punto de partida para el análisis de la agricultura climáticamente inteligente son las tecnologías y prácticas a las que los países ya han dado prioridad en sus políticas y planificación agrícolas. Se utiliza información sobre las tendencias del cambio climático recientes y previstas a corto plazo para evaluar el potencial de estas tecnologías y prácticas con respecto a la seguridad alimentaria y la adaptación climática en condiciones de cambio climático específicas de cada lugar, y determinar los ajustes que pueda ser necesario realizar. Entre los ejemplos de estos tipos de ajustes se incluyen la modificación de las épocas de siembra y la adopción de variedades resistentes al calor y a la sequía; el desarrollo de nuevos cultivares; la modificación de la variedad de cultivos y ganado de la granja; la mejora de las prácticas de gestión del suelo y del agua, incluyendo la agricultura de conservación; la integración del uso de previsiones climáticas en la toma de decisiones sobre los cultivos; la ampliación del uso del riego; el aumento de la diversidad agrícola regional; y el cambio a fuentes de subsistencia no agrícolas. Puesto que las condiciones locales varían, una característica esencial de la agricultura climáticamente inteligente es determinar los efectos de las estrategias de intensificación agrícola sobre la

seguridad alimentaria, la adaptación y la mitigación en lugares específicos. Esto es especialmente importante en los países en desarrollo, donde el crecimiento agrícola es generalmente una prioridad absoluta (FAO, 2016).

E. Bosques y Clima

Los bosques desempeñan un papel importante en el ciclo global del carbono. Los árboles absorben carbono de la atmósfera y lo acumulan en la madera; ese carbono se libera a la atmósfera cuando la madera se quema o se descompone. Se calcula que la combustión de madera por sí sola es responsable de la sexta parte de todas las emisiones de gases de efecto invernadero generadas por el hombre, debido principalmente a la deforestación. De la misma manera, los bosques se ven afectados por el cambio climático. Las variaciones en los regímenes de temperatura y precipitación pueden tener efectos en la ecofisiología de los ecosistemas forestales, así como en las comunidades de animales (vertebrados e invertebrados) que hacen vida en ellos.

Sin embargo, los bosques juegan un papel esencial en la prestación de servicios ecosistémicos aprovechables por el hombre, pues contribuyen a almacenar el carbono en la madera y raíces, al tiempo que facilitan el mismo proceso en la capa arable del suelo (carbono orgánico del suelo y de la materia orgánica que contiene).

A finales de 2010 se acordó en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático establecer un mecanismo para recompensar a los países en vías de desarrollo que reduzcan sus emisiones de carbono debidas a la deforestación y a la degradación de los bosques. Se trata del mecanismo de Reducción de emisiones por deforestación y degradación de los bosques (REDD+), una de las alternativas planteadas dentro de los mecanismos de desarrollo limpio, el cual se expondrá en el último capítulo.

De acuerdo con lo señalado por la FAO (2022), el cambio climático constituye hoy día un importante factor de riesgo para la salud de los bosques. Por ejemplo, hay indicios de que la incidencia y la gravedad de los incendios forestales y las plagas están aumentando. Los árboles y los bosques son medios destacados para luchar contra el cambio climático. Los bosques contienen 662 000 millones de toneladas de carbono, lo que constituye más de la mitad de las reservas de carbono mundiales de los suelos y la vegetación. A pesar de la disminución constante de su superficie, entre 2011 y 2020 los bosques absorbieron más carbono del que emitieron gracias a la reforestación, la mejora de la gestión forestal y otros factores.

Los bosques tienen otras múltiples repercusiones en el cambio climático, por ejemplo, emiten aerosoles y afectan al albedo y el vapor de agua atmosférico. La deforestación en los trópicos amazónicos y africanos podría tener efectos regionales considerables sobre las precipitaciones y, por tanto, sobre la agricultura de secano. Las repercusiones de los bosques en las condiciones climáticas pueden ser importantes en todos los ámbitos, desde el local hasta el regional; los árboles de las zonas urbanas, p. ej., reducen hasta en 12°C las temperaturas de la superficie terrestre en Europa central durante verano y en picos de calor (FAO, 2022).

F. Océanos y clima

Aunque uno de los más importantes efectos del cambio climático es la acidificación de los océanos (ver capítulo 10, sección 10.18), la revisión de diversos estudios recientes indica que el rápido aumento las concentraciones de gases de invernadero está conduciendo a los sistemas oceánicos hacia condiciones no observadas u ocurrentes en millones de años, con el riesgo asociado de transformación ecológica fundamental e irreversible (Hoegh-Guldberg y Bruno, 2010). Los impactos del cambio climático antropogénico hasta la fecha incluyen:

- la disminución de la productividad del océano,
- la alteración de la dinámica de la red alimentaria,
- la reducción de abundancia de especies formadoras de hábitat, cambios en su distribución, y
- una mayor incidencia de enfermedades en muchas especies animales y vegetales.

De la misma manera, Doney (2010) argumentan que el cambio climático, el aumento de dióxido de carbono en la atmósfera, los aportes de nutrientes en exceso, y la contaminación en sus múltiples formas están alterando fundamentalmente la química del océano, a menudo en una escala global y, en algunos casos, a tasas muy superiores a las del registro geológico histórico y reciente. La mayoría de las tendencias observadas incluyen un cambio en la química ácido-básica del agua marina, la reducción de oxígeno en el subsuelo, tanto cerca de la costa aguas costeras como en alta mar, el aumento de los niveles costeros de nitrógeno y el aumento generalizado de mercurio y contaminantes orgánicos persistentes. La mayoría de estas perturbaciones, encadenadas directa o indirectamente con la combustión de combustibles fósiles, el uso de fertilizantes y la actividad industrial humana, se prevé que crezcan en las próximas décadas, lo que resulta en el aumento de los impactos negativos sobre la biota del océano y los recursos marinos.

Boyd y Hutchins (2012) han revisado diversos estudios sobre la respuesta de la biota marina ante los cambios globales recientes, y una de las conclusiones se refiere a las diferentes respuestas de la biodiversidad oceánica, dependiendo de su posición en las cadenas tróficas, dada la heterogeneidad I y la interacción de los factores impulsores de los cambios. Los más afectados por los factores impulsores son los productores primarios y descomponedores, los que, en muchos casos, son afectados por la temperatura, los nutrientes disueltos y el pH, mientras que los de 2^o y 3^{er} niveles tienen mayores posibilidades de adaptación, debido a su plasticidad fenotípica y capacidad de movimiento hacia otros hábitats. Los peces y otras especies de la zona pelágica, a su vez, son menos afectados que los de la béntica, aunque los factores de carácter global, como la temperatura y la concentración de CO₂, son los que más alteraciones causan en las zonas pelágicas de altamar. En cambio, en las zonas costeras, el exceso de nutrientes y las partículas orgánicas persistentes provocan mayores alteraciones sobre la biota.

A escala mundial, aproximadamente mil millones de personas dependen de la pesca como su principal fuente de proteína y la mitad de ellas dependen de la pesca y de la acuicultura como medio de vida, sobre todo en los países en desarrollo. La producción primaria anual de los océanos ha disminuido aproximadamente 6% en los últimos 30 años (1980-2010). El cambio climático está afectando la estabilidad y riqueza en los arrecifes coralinos, el pasto marino, los estuarios, las salinas y los manglares, incluyendo a miles de especies que tienen sus hábitats en estos ecosistemas marinos, creando enormes desafíos y altos costos para las sociedades en todo el mundo, particularmente en los países en desarrollo. El cambio climático se prevé que conducirá a una redistribución a gran escala de la pesca comercial, incluyendo una caída de hasta 40% de la captura en los mares tropicales.

Los arrecifes coralinos están siendo impactados negativamente por el cambio climático, especialmente por el incremento de la temperatura en los océanos (Crabbe, 2009), dado que su rango de temperatura para el crecimiento es estrecho, así como por el incremento de CO₂ disuelto, el cual afecta la formación de los compuestos de calcio que los constituyen. El blanqueo de los corales, debido a la pérdida de los flagelados autótrofos *zooxanthellae* –que interactúan simbióticamente con foraminíferos y radiolarios–, es producto del incremento de la temperatura, así como la reducción de su crecimiento y productividad, pudiendo llegar incluso a desaparecer y, con ellos, la diversidad que habita en los arrecifes coralinos.

Debido a su ubicación en áreas con alta densidad poblacional, los estuarios sufren degradación por muchos factores, incluyendo sedimentación, por la erosión del suelo y la deforestación; sobrepastoreo y otras prácticas agrícolas pobres; sobrepesca; drenaje y relleno de humedales; residuos de eutrofización debido a excesivos nutrientes de las aguas residuales; contaminantes como metales pesados, PCB, radionúclidos e hidrocarburos de aguas residuales.