

COSTOS DE INACCIÓN ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA DEL RÍO AMAZONAS AMAZONAS.

Revisión Sistemática de Literatura Académica.



Ejecutores

Coordinación: Eduardo Buroz

Especialista en Cambio Climático e impactos a la Biodiversidad: Alicia Villamizar

Analista de impactos medio físico y costos de inacción: Juan Andara

Analista de impactos medio socioeconómico: María Teresa Buroz Echenagucia

Gerencia de proyecto: Betina Ayala

Control editorial: Luz Avendaño

**COSTOS DE INACCIÓN ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA
DEL RÍO AMAZONAS.**

Revisión Sistemática de Literatura Académica.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	9
2. IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA DEL AMAZONAS Y PARAMOS ANDINOS	23
2.1 IMPACTOS SOBRE LA BIODIVERSIDAD	24
2.1.1 <i>Impactos ocasionados por cambio en régimen de lluvia y temperatura</i>	26
2.1.2 <i>Impactos ocasionados por eventos hidrológicos extremos: sequías e inundaciones.</i>	29
2.1.3 <i>Impactos ocasionados por la deforestación.</i>	30
2.1.4 <i>Impactos debidos a incendios forestales.</i>	32
2.1.5 <i>Retroalimentación entre los impactos de la deforestación, incendios forestales y el cambio climático en la Biodiversidad de la cuenca del Amazonas.</i>	37
2.1.6 <i>Impactos sobre las especies de flora y fauna.</i>	39
2.1.7 <i>Impactos sobre la resiliencia de los ecosistemas y el equilibrio del carbono.</i>	44
2.1.8 <i>Impactos de alteración del equilibrio de carbono y la preservación de la biodiversidad.</i>	47
2.2 IMPACTOS SOBRE EL SISTEMA HÍDRICO	52
2.2.1 <i>Impactos sobre la precipitación.</i>	52
2.2.1.1 Reducción general de las precipitaciones.	52
2.2.1.2 Aumento de los extremos de precipitación.	52
2.2.1.3 Alteración de los patrones estacionales de escurrimiento.	52
2.2.1.4 Impactos diferenciados sobre las cuencas y subcuencas situadas al este y al oeste y al norte y sur de la cuenca amazónica.	53
2.2.2 <i>Impactos sobre el régimen de evapotranspiración y temperatura.</i>	56
2.2.2.1 Cambios en los patrones espaciales y temporales.	56
2.2.2.2 Impactos de la fragmentación del bosque y las sequías.	56
2.2.2.3 Interacción con la deforestación.	56
2.2.2.4 Inconsistencias entre modelos.	56
2.2.2.5 Datos satelitales.	57
2.2.2.6 Incrementos proyectados de temperatura y sus efectos.	57
2.2.2.7 Relación con el cambio en el uso del suelo.	58
2.2.2.8 Aumento del estrés por calor.	58
2.2.2.9 Alteraciones en los procesos ecológicos.	58
2.2.3 <i>Impactos sobre el régimen de infiltración, aguas freáticas y aguas subterráneas.</i>	59
2.2.3.1 Infiltración y aguas subterráneas.	59
2.2.4 <i>Impactos sobre el régimen de escorrentía y aguas superficiales.</i>	60
2.2.4.1 Disminución del Caudal.	60

2.2.4.2	Incremento en el riesgo de inundaciones.	60
2.2.4.3	Almacenamiento hídrico.	61
2.2.4.4	Retroalimentación con el cambio en el uso del suelo.	61
2.2.4.5	Los niveles de los ríos.	61
2.2.5	<i>Impactos sobre la relación suelo – agua – planta.</i>	62
2.2.5.1	Disponibilidad de agua.	62
2.2.5.2	Capacidad de retención de nutrientes en el suelo.	62
2.2.5.3	Transporte de agua en el sistema suelo-planta.	62
2.2.5.4	Dinamismo de Carbono y nutrientes en el suelo.	63
2.2.5.5	Resiliencia de la vegetación ante el cambio climático.	63
2.2.6	<i>Impactos sobre la ocurrencia de eventos hidrológicos extremos: sequías e inundaciones.</i>	64
2.2.6.1	Sequías.	64
2.2.6.2	Inundaciones.	65
2.2.6.3	Lluvias de sequo.	66
2.2.7	<i>Impactos sobre procesos geodinámicos: erosión y sedimentación.</i>	67
2.2.7.1	Aumento en la erosión por cambios en el uso del suelo.	67
2.2.7.2	Alteración de la dinámica de sedimentos.	69
2.2.7.3	Impactos en ecosistemas y calidad del agua.	70
2.2.7.4	Consecuencias de escenarios futuros de cambio climático.	70
2.2.8	<i>Impactos sobre cuerpos de agua y biodiversidad: caudal ecológico, eutroficación, calentamiento.</i>	71
2.3	IMPACTOS SOBRE LA ACTIVIDAD ECONÓMICA Y LOS ASENTAMIENTOS HUMANOS	72
2.3.1	<i>Impactos sobre el abastecimiento de agua y la seguridad hídrica</i>	72
2.3.1.1	Disminución de los recursos hídricos.	72
2.3.1.2	Impactos en la calidad del agua.	72
2.3.1.3	Riesgos para los ecosistemas acuáticos.	73
2.3.1.4	Desafíos socioeconómicos.	73
2.3.1.5	Proyecciones futuras de seguridad hídrica.	73
2.3.2	<i>Impactos sobre la producción hidroenergética y el suministro de energía</i>	73
2.3.2.1	Reducción en la generación hidroeléctrica.	73
2.3.2.2	Alteración de los caudales fluviales.	74
2.3.2.3	Ecosistemas acuáticos y conectividad.	74
2.3.2.4	Desafíos socioeconómicos.	75
2.3.2.5	Afectación a la generación de energía hidroeléctrica	76
2.3.3	<i>Impactos sobre la agricultura y ganadería</i>	76
2.3.3.1	Disminución en la productividad agrícola.	76
2.3.3.2	Expansión agrícola y cambios en el uso de suelo.	77
2.3.3.3	Impactos en la ganadería.	77
2.3.3.4	Erosión y degradación del suelo.	77
2.3.3.5	Impactos socioeconómicos en la agricultura	78
2.3.4	<i>Impactos sobre la navegabilidad fluvial</i>	79

2.3.4.1	Alteraciones en los regímenes hidrológicos.	79
2.3.4.2	Impacto de las sequías extremas.	80
2.3.4.3	Sedimentación y navegación.	81
2.3.4.4	Infraestructura y planificación.	81
2.3.5	<i>Impactos sobre comunidades aborígenes</i>	82
2.3.5.1	Pérdida de seguridad alimentaria y nutricional.	82
2.3.5.2	Alteraciones en el Uso de la Tierra y desplazamientos.	82
2.3.5.3	Impactos en la salud y los recursos hídricos.	83
2.3.5.4	Pérdida de conocimientos tradicionales.	83
2.3.5.5	Vulnerabilidad económica y exclusión.	83
2.3.6	<i>Impactos sobre la salud humana.</i>	83
2.3.6.1	Incremento en enfermedades transmitidas por vectores.	83
2.3.6.2	Inseguridad hídrica y enfermedades relacionadas con el agua.	85
2.3.6.3	Estrés térmico y enfermedades respiratorias.	85
2.3.6.4	Impactos en la seguridad alimentaria y nutrición.	86
2.3.6.5	Vulnerabilidad psicosocial.	86
2.4	IMPACTOS SOBRE LOS PARAMOS ANDINOS.	86
2.4.1	<i>Reducción de la cobertura de páramo.</i>	86
2.4.2	<i>Alteración de los servicios ecosistémicos.</i>	86
2.4.3	<i>Aumento de la evapotranspiración.</i>	87
2.4.4	<i>Vulnerabilidad de especies clave.</i>	87
2.4.5	<i>Disminución de la regulación hídrica.</i>	87
2.5	INFORMACIÓN ESPECÍFICA. ANÁLISIS DE ESTUDIOS.	90
3.	EL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA DEL RÍO AMAZONAS	99
3.1	LOS ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO	99
3.1.1	<i>Trayectorias de Concentración Representativa (RCP).</i>	99
3.1.2	<i>Reporte Especial de Escenarios de Emisiones (SRES).</i>	99
3.1.3	<i>Escenarios de Cambio de Uso de Suelo.</i>	99
3.1.4	<i>Modelos Regionales y Multimodelos.</i>	100
3.1.5	<i>Escenarios de Hibridación Climática y Socioeconómica.</i>	100
3.2	MODELOS DE SIMULACIÓN	101
3.2.1	<i>Modelos de Circulación General (GCMs).</i>	101
3.3	MODELOS MÁS USADOS	102
3.3.1	<i>MGB-IPH</i>	102
3.3.2	<i>ORCHIDEE</i>	102
3.3.3	<i>Hydro-BID y VIC.</i>	103
3.4	COBERTURAS ESPACIALES DE LOS MODELOS DE SIMULACIÓN	103

3.4.1	<i>Modelos Regionales.</i>	104
3.4.2	<i>Multimodelos.</i>	104
3.4.3	<i>Simulaciones de Uso del Suelo.</i>	104
3.4.4	<i>Simulaciones Continentales.</i>	104
3.5	CONSIDERACIONES SOBRE IMPACTOS EN LA CUENCA AMAZÓNICA Y EN OTRAS REGIONES TROPICALES	105
3.5.1	<i>Alteración del sistema regulador del ciclo de carbono.</i>	105
3.5.2	<i>Anomalías en el flujo de humedad Amazonia -Altiplano.</i>	105
3.6	IMPACTOS SOBRE EL CLIMA AMAZÓNICO SEGÚN LOS MODELOS DE SIMULACIÓN	105
3.6.1	<i>Reducción de precipitaciones y cambios de estacionalidad.</i>	105
3.6.1.1	Incrementos de lluvia en el este y disminuciones en el oeste.	106
3.6.1.2	Reducción de flujo de humedad desde la Amazonia al norte de la América del Sur.	106
3.6.1.3	Incremento de la frecuencia de extremos cálidos y húmedos.	106
3.6.1.4	Posibilidad de eventos de inflexión.	106
3.6.2	<i>Extensión de la Temporada Seca.</i>	106
3.6.3	<i>Aumento de la Temperatura.</i>	107
3.6.4	<i>Aumentos en los Caudales Máximos y Mínimos.</i>	109
3.6.5	<i>Reducción en la Evapotranspiración.</i>	109
3.6.6	<i>Aumentos en el Riesgo de Incendios Forestales.</i>	110
3.6.6.1	Resiliencia de los bosques.	110
3.6.6.2	Áreas protegidas y territorios indígenas.	110
3.6.6.3	Factores de riesgo de incendios forestales.	111
3.6.6.4	Factores de perturbación y propensión a incendios de vegetación.	112
3.7	LOS MODELOS HIDROLÓGICOS BAJO CONDICIONES DE CAMBIO CLIMATICO	113
4.	LAS ACCIONES DE MITIGACION Y ADAPTACIÓN FRENTE A LOS IMPACTOS CLIMATICOS: NDC y NAP	115
4.1	BOLIVIA	118
4.2	BRASIL. NAP / NDC	120
4.3	COLOMBIA	123
4.4	ECUADOR	124
4.5	GUYANA	127
4.6	PERÚ	130
4.7	SURINAM	132
4.8	VENEZUELA	134

5. APROXIMACIÓN A LA DETERMINACIÓN DE COSTOS DE INACCIÓN	136
5.1 MARCO TEÓRICO	136
5.2 PROPUESTAS METOLÓGICAS PARA LA DETERMINACIÓN DE COSTOS DE INACCIÓN	139
5.2.1 <i>Estimación de pérdidas y daños.</i>	139
5.2.2 <i>Escenarios y simulaciones en la valoración de los costos de inacción.</i>	140
5.2.3 <i>Modelo de Correlación.</i>	141
5.2.4 <i>Modelo contrafactual.</i>	142
5.3 PROPUESTA METODOLÓGICA PARA DETERMINACIÓN DE COSTOS DE INACCIÓN EN LA CUENCA AMAZÓNICA	144
5.4 APRECIACIÓN DE LAS VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL METODO PROPUESTO	147
5.4.1 <i>Ventajas.</i>	147
5.4.2 <i>Desventajas.</i>	148
5.5 VACÍOS DE INFORMACIÓN POTENCIALES Y ESTRATEGIAS DE SOLUCIÓN	148
5.5.1 <i>Falta de datos regionales detallados.</i>	148
5.5.2 <i>Fortalecimiento de bases de datos públicas.</i>	148
5.5.3 <i>Impactos económicos indirectos.</i>	148
5.5.4 <i>Proyecciones de largo plazo.</i>	149
5.5.5 <i>Impactos socioculturales.</i>	149
5.6 PUNTOS DÉBILES DE LA METODOLOGÍA POR TIPO DE ACTOR Y ESTRATEGIAS PARA SUPERARLOS	150
5.7 APORTES A LA GESTIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA AMAZONÍA DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA	151
6. ESTIMACIÓN PRELIMINAR DE COSTOS DE INACCIÓN EN LA CUENCA AMAZONICA	152
6.1 ESCENARIO SELECCIONADO	152
6.2 OBJETIVOS	152
6.3 APLICACIÓN DEL MÉTODO PROPUESTO	153
6.4 DESARROLLO DEL ANÁLISIS	153
6.4.1 <i>Valor de la pérdida de biodiversidad y servicios ecosistémicos.</i>	154
6.4.2 <i>Valor de los servicios a la agricultura y perdidas de productores agrícolas.</i>	156

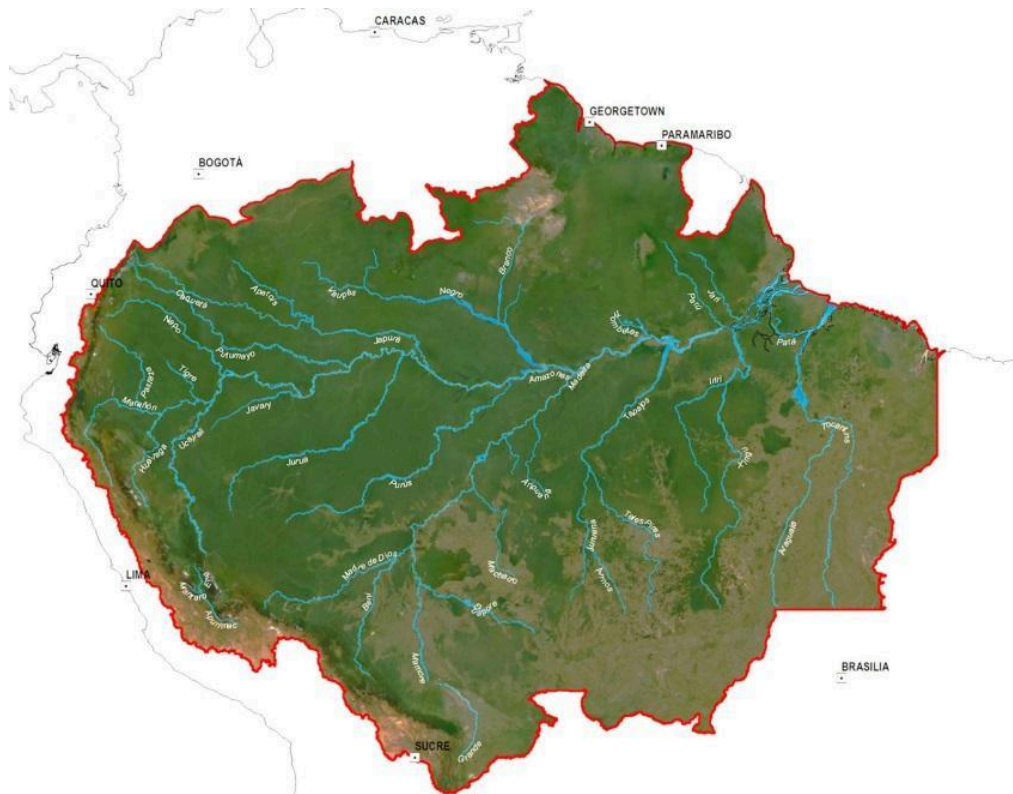
6.4.3	<i>Costos médicos, sanitarios, reducción de vida y muertes debido a incendios forestales.</i>	158
6.4.4	<i>Daños a la infraestructura.</i>	159
6.4.5	<i>Pérdida de carbono almacenado.</i>	160
6.5	MONETIZACIÓN DEL IMPACTO CLIMÁTICO	165
6.5.1	<i>Costo Social del Carbono.</i>	165
6.5.2	<i>Costos Totales de Inacción.</i>	167
6.6	ESTRATEGIAS PROPUESTAS PARA MEJORAR LAS ESTIMACIONES DE LOS COSTOS DE INACCION PARA LA AMAZONIA	169
6.6.1	<i>Incertidumbre en las estimaciones.</i>	169
6.6.2	<i>Falta de datos específicos regionales.</i>	169
6.6.3	<i>Subestimación de los costos intangibles.</i>	170
6.6.4	<i>Falta de análisis de superposición de costos.</i>	170
6.6.5	<i>Falta de enfoque en las externalidades positivas.</i>	171
6.6.6	<i>Falta de consideración de los efectos a largo plazo.</i>	171
7	REFLEXIONES Y ANÁLISIS FINAL	171
7.1	OPORTUNIDADES PARA FORTALECER LA VOLUNTAD POLÍTICA Y LA APROPIACIÓN SOCIAL DE LOS HALLAZGOS DEL ESTUDIO	172
7.2	OPORTUNIDADES PARA FORTALECER METAS CLIMÁTICAS (NACIONALES/REGIONALES), POLÍTICAS Y MEDIDAS SECTORIALES	172
7.3	ACCIONES PARA EVITAR PUNTOS DE NO RETORNO EN EL AMAZONAS.	177
	LISTA DE CUADROS Y FIGURAS	178
	GLOSARIO DE SIGLAS	181
	BIBLIOGRAFÍA	182

1. INTRODUCCIÓN

La cuenca del Amazonas es un complejo de sistemas biofísicos y humanos sometido a impactos y amenazas de naturaleza hidrológica, así como por diversas problemáticas ambientales que han causado daños socioeconómicos y ecológicos en la cuenca y en ambientes de páramos de países vecinos (Zulkafli, Buytaert, Manz, & et al, 2016), (Barichivich, Gloor, Peylin, & et al, 2018), (Marengo, Espinoza, R.FU, & et al, 2024).

La Figura 1 representa a la Región Amazónica (Organización del Tratado de Cooperación Amazónica (OTCA), 2021) la cual tiene alrededor del 80,25% de las ecorregiones asociadas a bosque húmedo tropical, lo que representa aproximadamente 6,3 millones de km² del total de la Región.

Figura 1. *Región Amazónica. Se observa la red hidrográfica principal de la cuenca*



Fuente: La Amazonía (OTCA, 2024) <https://otca.org/la-amazonia/>

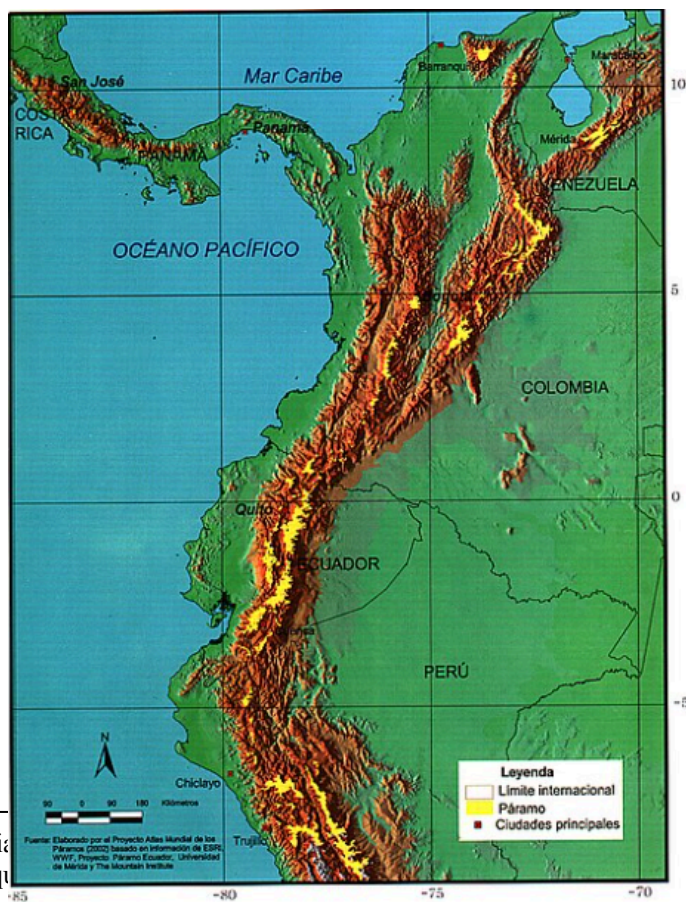
Las más recientes proyecciones del clima (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.), 2023) advierten que bajo

diferentes escenarios SSP-RCP¹, una serie de impulsores (drivers) a gran escala del cambio ambiental que operan simultáneamente e interactúan de forma no lineal en la Amazonia – por ejemplo, el cambio de uso de la tierra y el cambio climático - pueden inducir mayor frecuencia de eventos climáticos extremos, lo que aumentará la exposición y vulnerabilidad de la cuenca del Amazonas.

Existen diferentes aproximaciones para hacer este balance, pero en esta oportunidad se plantea, en lugar de generar nueva información, hacer una Revisión Sistemática de Literatura con la ayuda de Inteligencia Artificial. Este procedimiento investigativo espera demostrar que constituye una metodología práctica para consolidar el conocimiento actual para generar estrategias climáticas mejoradas en un menor tiempo, para tomadores de decisión y para la próxima generación de NDCs.

En este contexto se desarrolla una Revisión Sistemática de Literatura (o RSL) para desarrollar a un contexto actualizado que considere el estado actual de los principales impactos de los escenarios climáticos considerando la cuenca del río Amazonas (incluidos los páramos andinos con vertiente hacia el Amazonas). Los páramos de la cordillera de Los Andes se indican en la Figura 2.

Figura 2. Paramos de la cordillera de Los Andes



¹ SSP-RCP: Trayectorias Representativas (RCP), que responden al clima a diferentes escenarios de emisiones. La combinación SSP1...5-xy simboliza una de las 5 trayectorias socioeconómicas asociada a una trayectoria de concentración de GEI que puede variar entre 2.6 y 8.5 W/m². En el Anexo 1 se muestran los diversos escenarios propuestos por el IPCC.

de Concentración Intergubernamental para estudiar cómo

Fuente: Proyecto Atlas Mundial de los Páramos.

Los documentos que respaldan la Revisión Sistemática de Literatura (RSL) provienen de una exhaustiva revisión de productos académicos e informes técnicos oficiales de los gobiernos de los países amazónicos, relacionados con dichos sectores. La metodología de búsqueda y análisis de información se presenta en el Anexo 1.

Los documentos fueron analizados y sistematizados usando diversas aplicaciones de IA y posteriormente utilizados para desarrollar el estado del arte de los efectos ambientales del cambio climático en la cuenca amazónica y su evaluación de impactos físico – naturales y socioeconómicos.

La búsqueda de literatura cubrió el período 2000-2024, y consideró los escenarios del clima formulados para el 2050 y el 2070.

Con esta información se espera poder estimar los posibles costos de inacción basados derivados del análisis de los documentos oficiales de las Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC, por sus siglas en inglés) y los últimos Planes Nacionales de Adaptación (NAP, por sus siglas en inglés) de los países de la cuenca.

El punto de partida del análisis es la consideración de los elementos de inflexión climática. Estos son componentes del sistema terrestre que pueden experimentar cambios abruptos e irreversibles si se supera un cierto umbral de temperatura. Estos cambios pueden tener consecuencias significativas para el clima global y los ecosistemas. La pérdida masiva de bosques es un elemento de inflexión climática.

Como se indicó en el sistema climático global, los elementos de inflexión² son áreas del sistema terrestre que pueden representar un umbral crítico, donde una pequeña perturbación puede ser suficiente para desencadenar una fuerte respuesta no lineal del sistema mayor, con el potencial de cambiar cualitativamente el estado de toda la región debido a factores internos auto forzantes. A medida que avanza el calentamiento global, existe un mayor riesgo de que uno o varios elementos de inflexión en el sistema climático crucen un umbral crítico. Esto claramente tendrá graves consecuencias para el clima global, los ecosistemas y las sociedades humanas. Si bien los procesos subyacentes se comprenden bastante bien, no está claro cómo sus interacciones podrían afectar la estabilidad general del sistema climático de la Tierra (Wunderling, Donges, Kurths, & et al, 2021).

¿Por qué la cuenca amazónica?

El bosque amazónico es el bosque tropical más grande del mundo. Se extiende por nueve países de Sudamérica: Brasil, Perú, Colombia, Bolivia, Ecuador, Guyana, Surinam, Venezuela y la Guayana Francesa. Cubre un área de aproximadamente 8,1 millones de kilómetros cuadrados, lo que lo hace más grande que la suma de todos los demás bosques tropicales del mundo. Debido al cambio climático global y diversas intervenciones

² Los elementos de inflexión climática comprenden sistemas de la criosfera (por ejemplo, Groenlandia, la capa de hielo de la Antártida, el permafrost), la biosfera (por ejemplo, la selva amazónica (AMAZ) y los arrecifes de coral y los sistemas de circulación (por ejemplo, sistemas monzónicos, AMOC).

humanas está considerado como un ámbito geográfico de inflexión climática, que además de su inmensa masa vegetal, es hábitat de una importante biodiversidad global, a manera de ejemplo, alberga una de cada diez especies conocidas en la Tierra, incluyendo: el 10% de las especies de mamíferos, el 20% de las especies de aves y el 10% de las especies de peces del mundo. Aunque es difícil calcular la población de esta región debido a la falta de información detallada, se estima que la Amazonía será el hogar de aproximadamente 56 millones de habitantes hacia 2025 (Duran & T. Carvalho, 2024), (Schiavina, Freire, Carioli, & et al, 2023a), (Freire, MacManus, Pesaresi, & et al, 2016)

El bosque amazónico también es el hogar de muchas culturas indígenas, que suman cerca de 2,2 millones de aborígenes. Estas culturas tienen un profundo conocimiento del bosque y sus recursos (The Nature Conservancy (TNC), 2022).

La proyección de una mayor amenaza climática para la Amazonia a futuro plantea altos riesgos de cambios irreversibles con implicaciones regionales y globales. La actividad humana se manifiesta en un extendido proceso de expansión de la frontera agropecuaria mediante la deforestación y sustitución del bosque por praderas ganaderas y agricultura intensiva.

Para la selva amazónica, su intrincada red de reciclaje de humedad desempeña un papel crucial de auto estabilización de su cobertura vegetal evitando transformarse en una sábana seca. En efecto, el bosque amazónico es tan grande que prácticamente genera su propio clima a través de procesos a gran escala de evapotranspiración, condensación y precipitación. Además, el bosque amazónico también ayuda a regular el clima global al absorber dióxido de carbono de la atmósfera.

Sin embargo, el cambio climático, la deforestación y los incendios continuos podrían constituir un factor determinante en el tipo de bosques que podría existir a futuro (Nobre, Sampaio, Borma, & et al, 2016) y causar un colapso que se perpetúe a sí mismo (WHRC, 2020).

Si las temperaturas superan los 3,5°C, los estudios recientes sugieren que es probable que la Amazonia cruce un punto de inflexión. Los riesgos aumentan si la deforestación supera el 40%, sin embargo, en realidad, estos factores a menudo se combinan, lo que significa que el punto de inflexión puede alcanzarse con niveles de calentamiento global de 1,5-2°C si la deforestación alcanza el 20-25 %. (Harris, Jones, Osborn, & et al, 2014a), (Taylor, Dyer, & Yúnez-Naude, 2012), (Esquivel-Muelbert, Baker, Dexter, & et al, 2019), (Lovejoy & Nobre, 2019), (Castanho, Coe, Brando, & et al, 2020).

A nivel mundial en 2024, la concentración de CO₂ alcanzó un valor de 422,5 ppm (Friedlingstein & et al, 2024) y culminó como el año más caliente jamás registrado, superando por 1,5°C el nivel preindustrial (Naciones Unidas, 2025). Si las áreas forestales esenciales dejan de contribuir con su humedad, los impactos podrían ser graves. (Gatti L. , Basso, Miller, & et al, 2021) exploraron en la Amazonía, el efecto del cambio climático y las tendencias de deforestación sobre las emisiones de carbono y encontraron *que la intensificación de la estación seca y el aumento de la deforestación parecen promover el estrés del ecosistema, el aumento de la ocurrencia de incendios y mayores emisiones de*

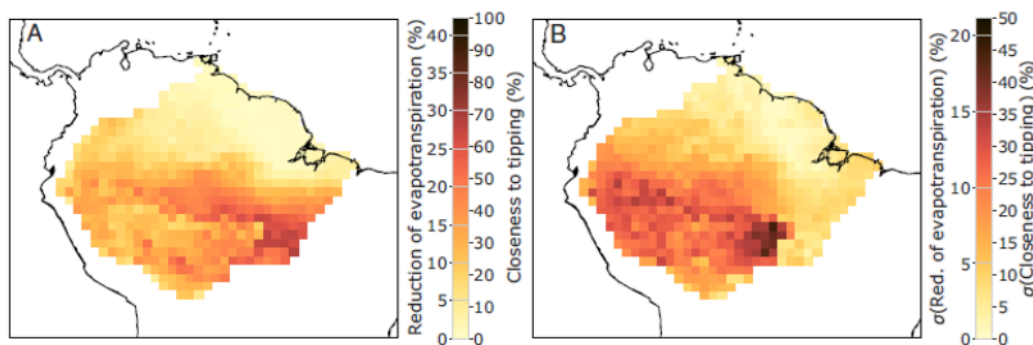
carbono en la Amazonia oriental, lo que coincide con un aumento en la mortalidad de los árboles y una reducción de la fotosíntesis como resultado de los cambios climáticos en la Amazonia.

(Jimenez, Marengo, Alves, & et al, 2021) comprobaron que, en el Nordeste de Brasil, el fenómeno de El Niño de 2015-16 aumentó el efecto de la sequía que comenzó en 2010 y reportan que el Ministerio de Integración de Brasil (www.mi.gov.br), informó que durante el periodo 2012-2016, 33,4 millones de personas se vieron afectadas por la sequía, con un daño estimado de 104 mil millones de reales (alrededor de US\$ 30 mil millones).

Las sequías recurrentes en la selva amazónica pueden superar su capacidad adaptativa lo que conduce a transiciones forestales auto amplificadas y contribuye a un tercio de todos los eventos de inflexión (eventos de no retorno o tipping points). Sobre la base de la suposición de que los procesos de inflexión en la selva amazónica están condicionados por la capacidad adaptativa de ésta a escala local y regional, (Wunderling, Staal, Sakschewski, & et al, 2022) estiman que una cascada de eventos a través del sistema acoplado bosque-clima puede ser responsable de alrededor de un tercio ($35,9 \pm 4,9\%$) de los eventos de inflexión local en la selva amazónica. Los autores reconstruyeron el reciclaje dinámico de la humedad atmosférica, para estudiar cómo el cambio climático puede exceder la capacidad de adaptación del bosque y posteriormente desencadenar puntos de inflexión locales que caen en cascada a través del sistema de la selva amazónica.

Un aspecto por tomar en cuenta para efectos del manejo de estos eventos en cascada es que ocurren, incluso, cuando se considera que el bosque está adaptado a las condiciones climáticas locales. El elemento de inflexión local debido a la intensidad fluctuante de la estación seca es el impulsor dominante ($64.0 \pm 5.0\%$) en comparación con las fluctuaciones en las precipitaciones anuales. Con un aumento potencial de futuros eventos de sequía extrema, el clima regional promedio será más seco y, por lo tanto, algunas partes de la selva amazónica podrían quedar bajo un riesgo inminente de inestabilidad y podrían pasar a un estado de menor cobertura o quedar sin cobertura de bosques. Los resultados indican que los eventos de inflexión local ocurren con mayor frecuencia en el sureste de la Amazonia, como se observa en la Figura 3 (Wunderling, Staal, Sakschewski, & et al, 2022).

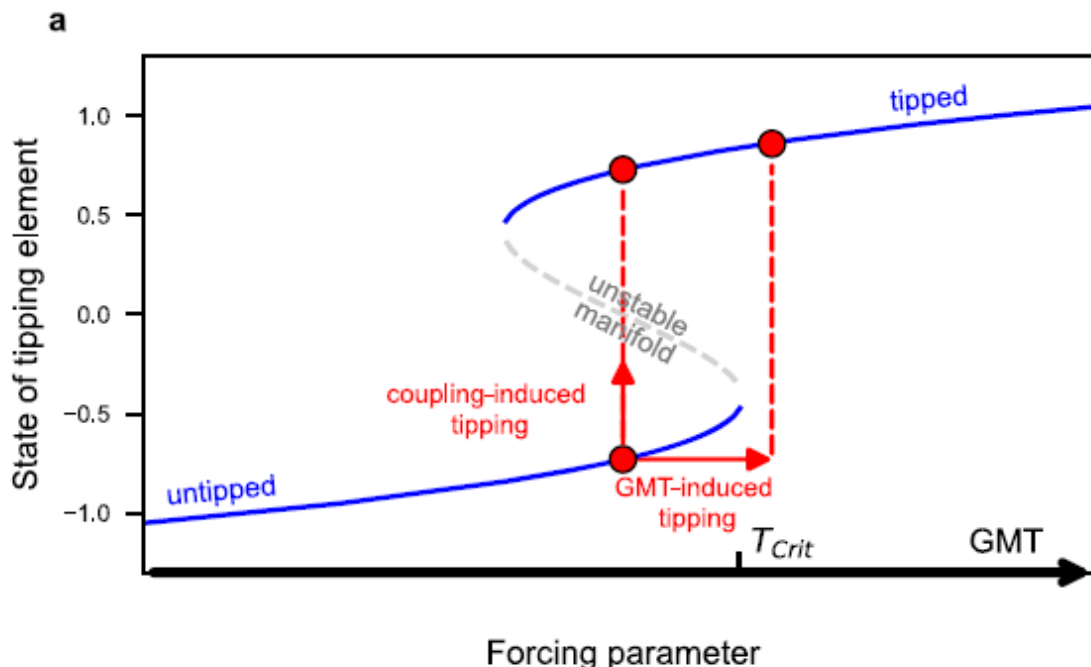
Figura 3. Localización de la ocurrencia de eventos de inflexión local



Nota: Se puede observar que el cambio es mayor en la parte sur de la selva amazónica, lo que significa que esta región es más vulnerable que la parte norte. Tomado de Wunderling et al. (2022), con modificaciones. (Wunderling et al., 2022).

(Möller, Högner, Schleussner, & et al, 2024) desarrollaron el siguiente diagrama esquemático de bifurcación de pliegues de un elemento de inflexión con respecto a la temperatura media global (GMT) como parámetro de forzamiento y dos estados estables separados por la variedad inestable. Las flechas rojas indican la dirección de retroalimentación de todo el sistema si se produce un forzamiento. Esto significa que, si el sistema es empujado a través de la variedad inestable, se moverá hacia el estado de equilibrio estable opuesto.

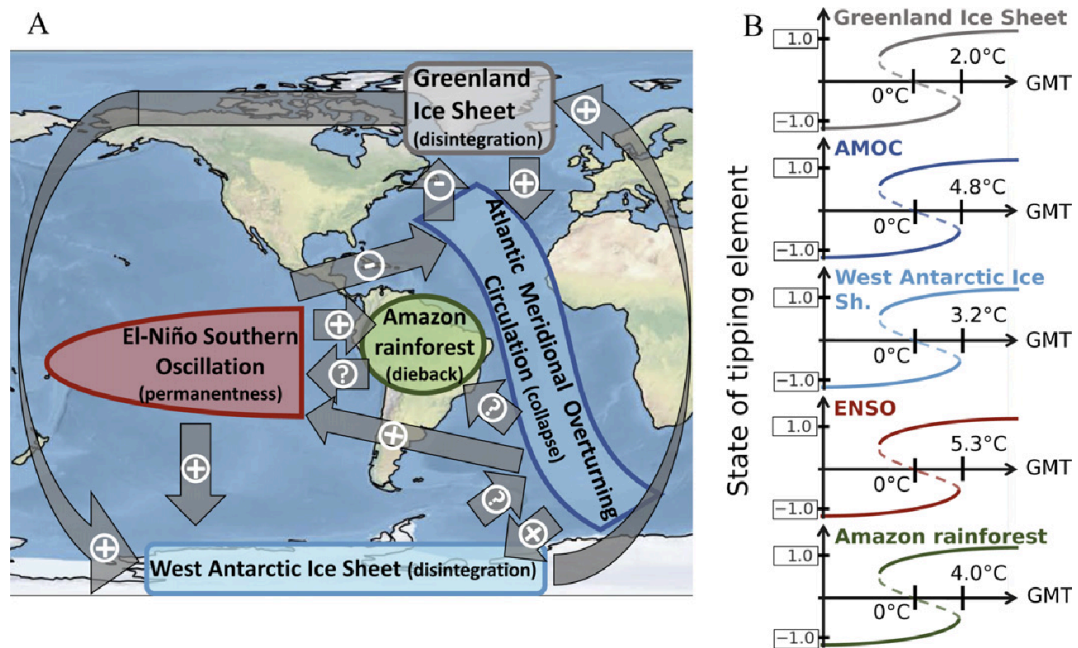
Figura 4. Riesgo de inflexión y elementos de inflexión en interacción



Fuente: (Möller, Högner, Schleussner, & et al, 2024)

En un estudio que abarca cinco elementos de inflexión y sus interacciones, que incluye (i) las capas de hielo de Groenlandia (SIG), (ii) la circulación meridional de retorno del Atlántico (AMOC), (iii) las capas de hielo de la Antártida Occidental, (iv) la Oscilación del Sur de El Niño (ENSO) y (v) la selva amazónica (AMAZ) (Figura 5), se encontró que existe un rango estrecho de aumento de la temperatura media global en el cual los elementos de inflexión individuales pueden transgredir su estado sin desencadenar una cascada de cambios de no retorno o *tipping points*.

Figura 5. Mapa mundial con conexiones mostradas para cinco elementos de inflexión



Notas: (A) Mapa mundial con conexiones mostradas para cinco elementos de inflexión donde la estructura de interacción se conoce desde un punto de vista de juicio de expertos. Cada eslabón representa un mecanismo físico y tiene una cierta fuerza. Una flecha positiva implica un efecto que acerca el elemento de inflexión a su punto de inflexión, una flecha negativa impulsa el elemento de inflexión alejado de su punto de inflexión y un signo de interrogación representa una dirección poco clara. (B) Diagrama de bifurcación de cada uno de los elementos de inflexión sin acoplamiento. En el eje x, el calentamiento global promedio requerido para el punto de inflexión se muestra en grados por encima de los niveles de temperatura media global preindustrial para el elemento de inflexión respectivo. (Wunderling, Gelbrecht, Winkelmann, & et al, 2020).

El diagrama de bifurcación en los respectivos elementos de inflexión (SIG, ENSO, AMOC y AMAZ), permite observar que por encima de una fuerza de interacción de 0,2 a 0,4 (para un rango de interacción entre 0.00 y 0.10), a medida que el SIG y ENSO se acercan a su punto de inflexión sería inevitable una cascada de efectos debido a sus fuertes vínculos de interacción con AMOC o AMAZ, respectivamente (Wunderling et al., 2020).

(Möller, Högner, Schleussner, & et al, 2024) consideran que, en el marco de las trayectorias actuales de emisiones, es muy posible que se sobrepase temporalmente el límite de calentamiento global de París de 1,5 °C. Si se sobrepasara permanentemente este límite, aumentaría considerablemente la probabilidad de que se desencadenen elementos de inflexión climática. (Möller, Högner, Schleussner, & et al, 2024) estudiaron los riesgos de inflexión asociados a varios escenarios de emisiones futuras relevantes para las políticas climáticas actuales. Demostraron que, si se siguen estas políticas durante este siglo, el riesgo de inflexión para el año 2300 sería del 45 % incluso si las temperaturas se reducen por debajo de los 1,5 °C.

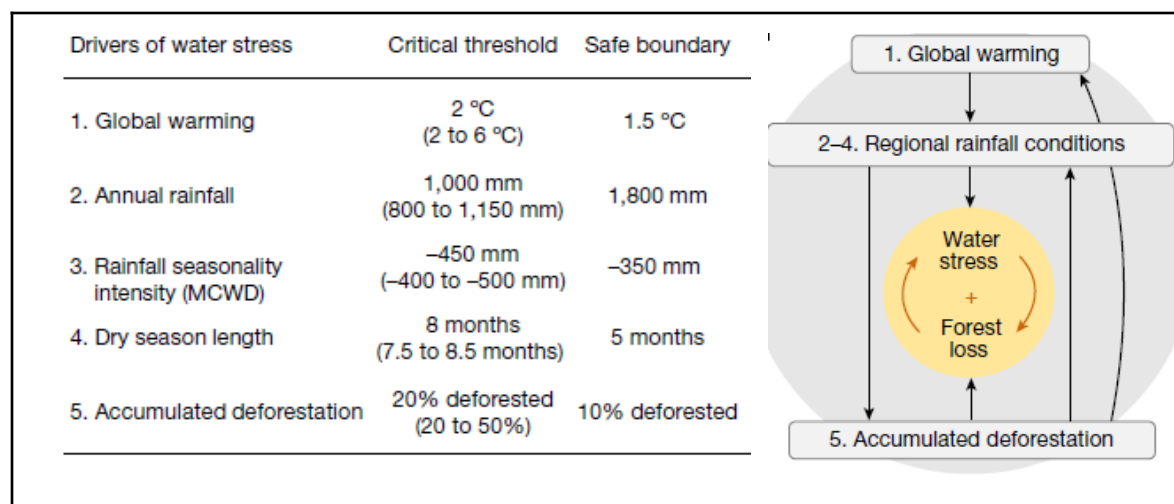
(Möller, Högner, Schleussner, & et al, 2024) determinaron que el riesgo de inflexión para el año 2300 aumenta con cada 0,1 °C adicional de sobrepaso por encima de los 1,5 °C y se acelera fuertemente para el calentamiento máximo por encima de los 2,0 °C. Lograr y mantener al menos cero emisiones netas de gases de efecto invernadero para 2100 es fundamental para minimizar el riesgo de inflexión a largo plazo.

Otro elemento de inflexión es el deshielo del permafrost, que son suelos congelados que contienen el doble del carbono de la atmósfera actual, además de grandes cantidades de metano. Esta reserva de carbono congelado permanece estable mientras siga congelado. Pero a medida que el permafrost se deshiele se espera que contribuya crecientemente a las emisiones de CO₂ y metano, causando un mayor calentamiento que llevará a su vez a un mayor deshielo. (Vélez Upegui, 2022)

En general, estas interacciones tienden a desestabilizar la red de elementos de inflexión. La permanencia de la Oscilación del Sur (El Niño) disminuye la reversión de la Circulación Meridional Atlántica (AMOC, siglas en inglés) que es un sistema de corrientes oceánicas que transporta agua, calor y nutrientes en el Atlántico, lo que a su vez incrementa la permanencia del Niño, que provoca la muerte regresiva del bosque amazónico. El deshielo de Groenlandia podría incrementar la CMA, pero se desconoce su efecto sobre el bosque amazónico y a su vez la respuesta del bosque amazónico sobre El Niño. El análisis revela el papel cualitativo de cada uno de los elementos de inflexión dentro de la red. Las capas de hielo polares en Groenlandia y la Antártida occidental son a menudo los iniciadores de cascadas de inflexión, mientras que la AMOC actúa como mediador que transmite cascadas. Esto indica que las capas de hielo, que ya corren el riesgo de transgredir sus umbrales de temperatura dentro del rango del Acuerdo de París de 1,5°C a 2°C, son de particular importancia para la estabilidad del sistema climático en su conjunto.

Además de los elementos de inflexión de orden global descritos previamente (Flores, Montoya, Sakschewski, & et al, 2024) identificaron cinco puntos críticos en la Amazonía, cada uno relacionado con un factor de estrés particular, tal como se muestra en la Figura 6.

Figura 6. Factores particulares de estrés climático en la Amazonía



Fuente: (Flores, Montoya, Sakschewski, & et al, 2024)

(Flores, Montoya, Sakschewski, & et al, 2024) utilizando datos de cobertura arbórea de la cuenca amazónica *identificaron un umbral potencial de 1000 mm de precipitación anual por debajo del cual los bosques se vuelven escasos e inestables. Entre 1000 y 1800 mm de precipitación anual, existen ecosistemas de cobertura arbórea alta y baja en la Amazonia como dos estados estables alternativos. Dentro del rango de biestabilidad en condiciones de precipitación anual, los bosques tienen relativamente más probabilidades de colapsar cuando se los perturba gravemente, en comparación con los bosques en áreas con precipitaciones anuales superiores a 1800 mm. En áreas donde las precipitaciones caen por debajo de los 1.800 mm anuales, los bosques se vuelven inestables, con un mayor riesgo de cruzar puntos de inflexión.*

El cruce de puntos de inflexión podría conducir a tres ecosistemas alternativos: (i) "bosques degradados" en regiones con condiciones de lluvia que sustentan bosques estables; ii) "ecosistemas abiertos degradados" en regiones que sustentan tanto bosques como estados no forestales (es decir, biestables); y (iii) sabanas de arena blanca en regiones forestales estables y biestables en áreas inundadas estacionalmente. Cada alternativa está asociada a diferentes combinaciones de perturbaciones y mecanismos de retroalimentación (Hirota, Nobre, Alencar, & et al, 2022).

Aunque es poco probable una variable de forzamiento capture todos los aspectos involucrados, existe una conexión conocida entre la temperatura y la muerte regresiva del Amazonas. Por ejemplo, los aumentos en la amplitud del ciclo estacional de la temperatura revelan disminuciones en la fracción evaporativa y, por lo tanto, una desecación en la cuenca del Amazonas. Las altas sensibilidades del ciclo estacional de la temperatura al calentamiento global son más propensas a incurrir en eventos abruptos de muerte regresiva de los bosques bajo el modelo de simulación CMIP6³. Existe también, un vínculo entre las anomalías de temperatura y la productividad de la Amazonía. Por lo tanto, la temperatura del aire juega un papel importante en el control de la resiliencia del bosque (Clarke, Huntingford, Ritchie, & et al, 2023).

Aproximadamente, el 18% de la Amazonia ha sido convertida a diversos usos de la tierra y al menos un 17% del bioma ha sido degradado (Panel Científico por la Amazonía (SPA), 2023). La intervención humana ha puesto en riesgo de extinción a muchas especies, al reducir sus rangos de distribución y alterar las interacciones entre especies (Bodmer, P.E. Puertas, M. Antúnez, & et al, 2014), (Moraes, Santos, Goncalves, & et al, 2020). También se ha visto alterada la función natural del bosque amazónico y de otros ecosistemas en el equilibrio del carbono (almacenamiento y secuestro) (Paredes-Trejo, Barbosa, Giovannettone, & et al, 2022), la disminución de la productividad de la cuenca y su resiliencia (Esteban et al., 2021), y su capacidad para suministrar servicios ecosistémicos a escala regional y global (Moraes, Correa, Doria, & et al, 2021).

³ Coupled Model Intercomparison Project (CMIP6), es una colaboración entre grupos de modelado climático de todo el mundo para generar datos de modelos climáticos globales.

Al respecto, los estudios analizados en esta RSL sugieren "*puntos de inflexión*"⁴ (tipping points) que no deben ser transgredidos: 4°C de calentamiento global o el 40% del total de zona deforestada a escala global (Xu, Zhang, Riley, & et al, 2022), (Banerjee, Cicowiez, Macedo, & et al, 2022).

Con una revisión sucinta sobre las medidas de mitigación y adaptación (M&A) presentadas por los gobiernos de la cuenca del Amazonas en sus más recientes Comunicaciones Nacionales Determinadas⁵ (NDC, por sus siglas en inglés) y en sus Planes Nacionales de Adaptación (NAP, por sus siglas en inglés) se trata de conocer y en consecuencia consolidar los esfuerzos en cada país de la cuenca en cuanto a las medidas de adaptación para la Amazonía. Estas se centran en maximizar la conservación frente a la intensificación de actividades económicas, como la agricultura tradicional, la minería legal y la explotación de petróleo, actividades que en la actualidad representan, aproximadamente, el 16% de la pérdida de ambientes naturales⁶ por uso antrópico⁷ en la cuenca del Amazonas (MAPBiomas, 2024).

Según (OTCA. Organización del Tratado de Cooperación Amazonica, 2021), las actividades económicas en la cuenca son diversas y están orientadas a la extracción de recursos naturales como materia prima, fundamentalmente; su aumento también responde al crecimiento de la población de la región amazónica. Las actividades se concentran principalmente al sureste y oeste de la región (arco andino de la cuenca, limítrofe con Colombia, Ecuador y Perú), con una tendencia creciente de expandirse hacia las zonas centrales, menos intervenidas. Estas actividades comprenden principalmente, la minería, petróleo y gas, agricultura, ganadería, explotación del bosque natural y producción hidroenergética. Adicionalmente se debe considerar el impacto generado por la red vial que da soporte logístico a estas actividades. Además, existen una serie de actividades económicas de mediana y pequeña escala, entre las que están el comercio, la construcción, la industria manufacturera, actividades agropecuarias en ciertos sectores (plantaciones indígenas⁸, silvicultura, pesca y caza) y el turismo, a menor escala.

La exposición y la vulnerabilidad de los ecosistemas amazónicos a los impulsores de cambio ambiental se presentan de forma desigual en el territorio de la cuenca, así como

⁴ IPCC (2021) Umbrales críticos en los sistemas de la Tierra que pueden conducir a cambios irreversibles.

⁵ Las NDCs representan la contribución de cada país al cumplimiento de las metas del Acuerdo de París. El Acuerdo fue adoptado en la COP 21 en París, haciendo énfasis en la necesidad urgente de abordar la brecha entre las emisiones resultantes de los compromisos agregados de los países (NDCs) y de las emisiones necesarias para mantener la temperatura muy por debajo de 2°C (PNUD, 2022).

⁶ Incluye: Formación forestal; Formación sabánica / Bosque abierto; Manglar; Bosque inundable

Formación natural no forestal inundable; Formación campestre o herbazal; Afloramiento rocoso; Otra formación natural no forestal; Playa, duna o banco de arena; Otra área natural sin vegetación; Río, lago u océano; Glaciar (BioMaps, 2024)

⁷ Incluye: Pasto; Agricultura; Silvicultura; Palma aceitera; Mosaico de agricultura y/o pastos; Infraestructura urbana; Minería; Otra área antrópica sin vegetación (BioMaps, 2024).

⁸ Las plantaciones indígenas son los cultivos que realizan los pueblos originarios para obtener alimentos y otros recursos. Estos cultivos se han desarrollado a lo largo de miles de años y se adaptan a las condiciones geográficas y climáticas de cada región.

también en los ambientes de páramo de países vecinos. Se estima que los ecosistemas de páramo en la cuenca amazónica sean extremadamente vulnerables al cambio climático. Se proyecta una disminución drástica de la inmersión en nubes, lo que llevará a la sequía y la invasión de árboles. (Helmer, Gerson, Baggett, & et al, 2019) Esto resultará en una pérdida significativa de biodiversidad, alteraciones en el ciclo del agua y degradación del suelo. Al variar en magnitud, frecuencia y duración, demandan diferentes acciones de política pública, acordes a cada conjunto de características, lo que exige conocimientos específicos para asegurar el éxito de la conservación, la protección y el uso de los recursos naturales y de los bienes y servicios ambientales que estos brindan a la región amazónica (Olaya López, 2022).

El conocimiento descrito de los efectos sobre los ecosistemas amazónicos debidos a los cambios globales y específicos en el clima amazónico y que será objeto de una revisión de la evaluación cada uno de ellos, es decir su medición como impacto tiene el propósito de conocer el modo como los gobiernos han decidido mediante qué medidas de adaptación han decidido procurar minimizar los daños causados por la situación global cuya mitigación depende de la acción concertada de las naciones del mundo.

Las acciones decididas por los gobiernos son declaradas para conocimiento de los esfuerzos que cada nación, de modo que ese conocimiento de la utilización de fondos que podría ser usados para el desarrollo sirva de acicate para cada nación cumpla con su compromiso de mitigación del fenómeno global.

La buena disposición ostensible en las NDC puede verse superada por múltiples razones que cada gobierno debe asumir. Muchas veces no es posible considerar el impacto económico de atrasar o suspender una acción ya decidida. En ocasiones porque no se conoce como hacerlo y en otros casos por la falta de información para hacer la determinación. El propósito de este trabajo es precisamente determinar el estado del arte en cuanto a estimación de costos de inacción en la región amazónica.

Esta Introducción procura poner en contexto el objeto del desarrollo del trabajo: el modo de determinar los efectos económicos y sociales del cambio climático en la cuenca del Amazonas.

Se ha podido constatar que si bien existen numerosos estudios sobre la economía del cambio climático en América Latina y El Caribe (ALC) (Chisary, J.A., & S.J., 2012), (Watson & Schalateck, 2019), (CEPAL, 2018), (CEPAL, 2023), los análisis de costos de inacción ante el cambio climático son muy escasos⁹.

Los costos de inacción han sido definidos por (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2021) *como aquellos asociados con no actuar para mitigar y adaptarse al cambio climático. Se refieren a los impactos económicos, sociales y ambientales negativos que resultarían de no tomar medidas para abordar el cambio climático. Estos costos pueden incluir pérdidas de vidas humanas, daños a la infraestructura, pérdida de biodiversidad,*

⁹ Chile, por ejemplo, acordó que para el 2021 se realizaría una estimación de costos de la inacción asociados al cambio climático, dentro de sus políticas, estrategias y planes de cambio climático.

aumento de los desastres naturales, entre otros efectos adversos. (Ranasinghe, Ruane, Vautard, & et al, 2021)

Los análisis de costos de inacción surgen para facilitar comunicar a los tomadores de decisión la inconveniencia de mantener la tendencia “*business as usual*” (BAU), al permitir apreciar las pérdidas económicas por el deterioro de los servicios ecosistémicos que resulten o puedan resultar afectados.

Los costos de inacción, según (Stern N. , The economics of climate change:the Stern review , 2007) se refieren a las consecuencias económicas y sociales negativas que resultan de no tomar medidas adecuadas y oportunas ante un problema o desafío. Estos costos pueden manifestarse de diversas formas, como:

- *Pérdidas económicas:* Disminución del Producto Interno Bruto (PIB), reducción de la productividad, pérdida de empleos, daños a la infraestructura y los activos, entre otros.
- *Impactos sociales:* Aumento de la pobreza, la desigualdad, la inseguridad alimentaria, los desplazamientos de población, los conflictos sociales, entre otros.
- *Daños ambientales:* Degradación de los ecosistemas, pérdida de biodiversidad, aumento de la contaminación, eventos climáticos extremos, entre otros.

Stern destaca que los costos de inacción suelen ser significativamente mayores que los costos de tomar medidas preventivas o correctivas a tiempo. En otras palabras, a menudo es más costoso no hacer nada que actuar, ya que las consecuencias negativas que se derivan de no abordar un problema o desafío de manera oportuna en términos económicos, sociales y ambientales suelen ser mucho mayores que los costos de actuar. (Stern N. , The economics of climate change:the Stern review , 2007), buscó resaltar la necesidad de realizar acciones preventivas ante la posibilidad de mayores daños a futuro. En su Informe, Stern estimó que los costos de inacción ante los impactos del cambio climático se reflejarían en una reducción del 20% del PIB Global para el 2050.

En el trabajo de (Nagy, Caffera, Aparicio, & et al , 2006) ya se advertía que en ALC el costo estimado por los daños esperados debido al calentamiento global para el 2050 podría variar entre el 1,3% y el 7% del PIB, sugiriendo que los impactos climáticos proyectados serían lo suficientemente importantes como para tomarlos en cuenta en la planificación de acciones climáticas, principalmente de adaptación. Para el 2023, la CEPAL estima que la respuesta al cambio climático costaría a ALC, entre el 2% y el 10% del PIB anual.

La ponderación de los costos por efecto del clima, a escala global y regional, ha estado asociada principalmente a indicadores de vulnerabilidad y consumo relacionados con el calentamiento global pasado y futuro (Stern N. , 2006), (Hope & Castilla-Rubio, 2008), (Nobre, Sampaio, Borma, & et al, 2016), (CEPAL, 2010), (CEPAL, 2016), (CEPAL, 2023). En la actualidad, más de 79% de los países de la región de ALC muestra una menor capacidad de respuesta al cambio climático que el promedio mundial (Mejía Silva & et al, 2021) lo que indica una mayor vulnerabilidad dentro de los países no incluidos en el Anexo

1 de la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (CMNUCC), grupo al cual pertenecen los países que comparten el territorio de la cuenca del Amazonas.

El impacto asociado a las actividades humanas que tienen lugar en la cuenca amazónica es uno de los impulsores de cambio ambiental más referidos en la literatura consultada. Sus múltiples implicaciones, como se ha indicado previamente, aumentan los riesgos ante los efectos del cambio climático y, en consecuencia, los costos de daños y pérdidas asociados. Cuantificar dichos costos resulta una tarea compleja ante las múltiples amenazas que desencadenan. Las incidencias del aumento de la frecuencia e intensidad de eventos hidroclimáticos extremos y del cambio climático en la cuenca del Amazonas, muestra: (i) que la tendencia al calentamiento ha aumentado desde los años 2000 (Zhu, Li, Ciais, & et al, 2023); (ii) que se ha intensificado el ciclo hidrológico (Longo, Saatchi, Keller, & et al, 2020) y (iii) que se ha extendido la duración de la estación seca en el sur de la Amazonia (Staal, Flores, D Aguiar, & et al, 2020).

La evaluación de las inundaciones y sequías, debidas principalmente a la variabilidad climática y al cambio de uso de la tierra, advierte sobre las amenazas de riesgos asociados a eventos singulares a gran escala¹⁰ que pudieran desencadenar efectos en cascada y llevar a los ecosistemas de la cuenca a cambios sin retorno –funcionales, estructurales– (Wunderling, Staal, Sakschewski, & et al, 2022), cuya incertidumbre complica aún más la posibilidad de determinar los costos asociados a su atención y en consecuencia, la dificultad para estimar los costos de inacción. La estimación de los costos de inacción podría reducir o evitar costos económicos mayores vinculados a la gestión del cambio climático y optimizar el uso de los recursos financieros multilaterales disponibles para la cuenca del Amazonas, así como en cada país de la cuenca.

Una mirada aproximada a escala regional de los riesgos resultantes de integrar la vulnerabilidad hidroclimática y socioeconómica de la región se muestra en el Atlas de Vulnerabilidad de la Región Amazónica¹¹ (OTCA. Organización del Tratado de Cooperación Amazonica, 2021) El Atlas permite identificar espacialmente las vulnerabilidades de la cuenca. Se considera una herramienta muy útil a escala país en la gestión de riesgos de desastre asociados al cambio climático, que puede acoplarse con alguno de los múltiples abordajes para el manejo del riesgo contemplados en el Mecanismo de Varsovia (Warner & Weisberg, 2023) y en la Convención de Cambio Climático (UNFCCC, 2019), de los cuales forman parte los países amazónicos.

¹⁰ Según el IPCC (2021), lo eventos singulares a gran escala (RFC5) son cambios relativamente grandes, abruptos y a veces irreversibles en los sistemas causados por el calentamiento global. Los ejemplos incluyen la desintegración de las capas de hielo de Groenlandia y la Antártida. Los eventos singulares a gran escala forman parte de las 5 Razones de Preocupación (RFC, por sus siglas en inglés) en las cuales el IPCC agrupa a las mayores amenazas asociadas al calentamiento global.

¹¹ El proyecto “*Manejo Integrado y Sostenible de los Recursos Hídricos Transfronterizos de la cuenca del Río Amazonas, considerando la Variabilidad y el Cambio Climático*”, fortalece el marco institucional para la planificación, la ejecución de acciones estratégicas de protección y gestión de los recursos hídricos de la Región Amazónica, considerando factores como la variabilidad y el cambio climáticos.

La amplia diferencia y dinámica que presenta la vulnerabilidad entre comunidades humanas y múltiples contextos socioeconómicos en la cuenca del Amazonas¹² puede considerarse una opción complementaria al análisis de riesgos del cambio climático y ser incorporado como impulsor de cambio. Los aspectos institucionales como vulnerabilidades estructurales, independientes del cambio climático, contribuyen a definir y ponderar económicamente, medidas de adaptación efectivas. Ese valor referencial podría ayudar a la vez, a dimensionar con mayor precisión, el costo de inacción.

Otro aspecto de interés vinculado a los costos de inacción es que la economía de la cuenca del Amazonas depende en gran medida de los recursos naturales y de sus respuestas al clima; también depende de los patrones en la distribución del ingreso y de la degradación ambiental que afecta a la cuenca (Marengo & et al, 2012), (Borma & et al, 2013), (Organización del Tratado de Cooperación Amazónica (OTCA), 2021). Estos impulsores de cambio, climáticos y no climáticos, son limitaciones para la adaptación que exacerban los impactos, tanto para el bioma de la cuenca, como para sus países, para regiones vecinas y para sectores y poblaciones específicas. Sin embargo, las métricas necesarias para cuantificar los costos relacionados con la vulnerabilidad a los efectos del clima -sea variabilidad climática o cambio climático- para una estimación referencial de los costos de inacción de las medidas de adaptación no formuladas, no aplicadas o de mala adaptación¹³, aún están incompletas y no todos los países las han definido, o actualizado (Anisimov & Vallejo, 2023).

Para la cuenca del Amazonas, se debe tomar en cuenta que la extracción de recursos naturales – particularmente madera, minerales preciosos y petróleo- es una de sus principales fuentes de ingresos fiscales, sin embargo, también está vinculada al problema del endeudamiento y a la profundización de impactos ambientales y sociales (CEPAL, 2023) que aquejan a la gran mayoría de sus países.

Así como el análisis económico del cambio climático resulta fundamental para diseñar e instrumentar una estrategia consistente de adaptación y mitigación, el estimar los costos de inacción ante los impactos climáticos puede apoyar en obtener una aproximación más realista del costo de los daños y las pérdidas asociadas.

Los costos de inacción, incluso, podrían ser considerados *per se*, como otra amenaza (más exactamente como un conjunto de amenazas), que desencadenan, adicionalmente, impactos intangibles.

A diferencia de las métricas que tradicionalmente se usan en los análisis costo-beneficio de aspectos vinculados al cambio climático, los indicadores que miden los impactos intangibles no están definidos o no están bien definidos, o no son susceptibles de definir (Bofill, 2022).

¹² Referida de forma relevante en la literatura analizada- y que a juicio de Anisimov & Vallejo (2023), las comparaciones cruzadas (en lo relativo a la vulnerabilidad) corren el riesgo de perder información contextual importante sobre las especificidades de cada lugar.

¹³ El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) define la mala adaptación como acciones que aumentan el riesgo de resultados adversos relacionados con el clima o hacen que las personas sean más vulnerables al cambio climático. La mala adaptación puede ocurrir incluso cuando las intenciones son buenas.

En cuanto a las medidas de adaptación enunciadas por los países de la cuenca en sus NDC y NDP más recientes, muy pocas refieren costos, por lo que su uso referencial para estimar los costos de inacción es muy limitado. Se deduce de lo anterior, que es una tarea pendiente a escala de la cuenca e incluso a escala de los países que la comparten. Es clave también, elaborar métricas comunes para definir la adaptación en términos comunes de la vulnerabilidad de la cuenca, estableciendo correlaciones amplias de los impulsores climáticos y no climáticos. Esto a su vez, permitiendo considerar las diferencias en términos de intensidad, frecuencia y duración diferencial con la que estos se manifiestan en todo el territorio de la cuenca.

El reto para determinar el verdadero costo de la no acción incluye superar – en el corto plazo- la poca comprensión, escasa información y la resistencia a aceptar que muchas las inadecuadas estimaciones de los costos de las acciones de mitigación y adaptación, dadas por acertadas, han contribuido a desarrollar resistencias institucionales para decidir la ejecución de las medidas necesarias retrasándolas inadecuadamente o posponiéndolas con la esperanza de no requerir esa erogación.

Finalmente, los hallazgos de esta RSL permiten proponer una metodología para la estimación de costos de inacción que pudiera contribuir a la definición de estrategias climáticas mejoradas en un corto plazo para toma de decisiones y para la próxima generación de Contribuciones Determinadas a nivel Nacional (NDCs por sus siglas en inglés).

Este documento se encuentra estructurado en introducción, 7 capítulos, referencias bibliográficas y anexos.

A continuación, se realiza una breve descripción de los principales elementos que conforman cada capítulo:

Capítulo 1: Impactos del cambio climático en la cuenca del Amazonas y páramos andinos proyectados por los modelos de simulación hidroclimática sobre la biodiversidad, sistema hídrico, actividades económicas y asentamientos urbanos.

Capítulo 2: Se refiere al cambio climático en la cuenca del río Amazonas desarrollando los escenarios de cambio climático, modelos de simulación más usados y las coberturas espaciales de dichos modelos.

Capítulo 3: Contiene las Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC, por sus siglas en inglés) y los Planes de Adaptación (NAP, por sus siglas en inglés) de los países que comparten el territorio de la cuenca del Amazonas (se excluye a la Guyana francesa), presentadas durante el período entre el 2016 y el 2023.

Capítulo 4: Se refiere a los costos de inacción para el área de estudio, considerando un marco teórico para desarrollar una propuesta metodológica.

Capítulo 5: Contiene una estimación preliminar de los costos de inacción en la cuenca amazónica y los páramos andinos.

Capítulo 6 y 7: Se desarrollan reflexiones y análisis del estudio (cap. 6) y las conclusiones del trabajo (cap. 7)

2. IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA DEL AMAZONAS Y PARAMOS ANDINOS

En este capítulo se abordan los impactos del cambio climático proyectados por los modelos de simulación hidroclimática para la cuenca amazónica (incluidos los páramos andinos amazónicos), en el marco de la adaptación al cambio climático. También se considera el impacto en la biodiversidad con énfasis en la deforestación e incendios forestales.

La literatura analizada incluye los impactos que el cambio climático puede causar en la cuenca del Amazonas, considerando las proyecciones de los escenarios del clima para el 2050 y el 2070. Se muestran evidencias de una cadena de amenazas climáticas que comprometen, además del funcionamiento hidroclimático de la cuenca, a su biodiversidad.

Las principales amenazas climáticas se derivan de la ocurrencia y magnitud de eventos extremos de sequía y lluvias que son inducidos por el cambio climático o por variabilidad climática. Se parte de la premisa de que el cambio climático y sus efectos son un problema de y del desarrollo, por tanto, es inducido o fortalecido por las actividades humanas que tienen incidencia directa en la ocurrencia de incendios forestales, sequías e inundaciones de gran magnitud. Así como también en la pérdida de hábitats y de cobertura vegetal, desplazamiento de especies, cambios en la composición de las comunidades de plantas y animales, y eventualmente, en la pérdida de especies amenazadas o en franco peligro de extinción.

La concurrencia de impactos asociados a una serie de actividades humanas que comprometen aún más, la funcionalidad, la diversidad y la resiliencia de los ecosistemas representativos de la cuenca, conforma un escenario actual de pérdida de valores ecológicos y de bienes y servicios ecosistémicos. El costo de pérdida y en particular, el costo de inacción de no proteger dichos valores y bienes ambientales puede resultar magnificado a niveles de irreversibilidad en respuesta a los impactos esperados bajo los escenarios hidroclimáticos y las proyecciones del clima para el 2050 y el 2070 para la cuenca del Amazonas.

Para todo el territorio de la cuenca se identifican acciones comunes asociadas a la actividad humana que contribuyen con el aceleramiento de los efectos del cambio climático. Entre estas acciones destacan: el avance de la frontera agrícola, el inadecuado manejo forestal, la extracción de madera sin control, la deforestación, la exploración, explotación y producción de hidrocarburos, la minería, (en particular la explotación de oro que conlleva a la contaminación de ríos con mercurio y cianuro), y una serie de actividades ilícitas como el contrabando, el narcotráfico y la trata de personas.

Respecto a los escenarios de cambio climático referidos en la literatura científica analizada, principalmente se usan los escenarios SSP-RCP del IPCC, tanto por los países en la elaboración de sus documentos oficiales, como por la comunidad científica que estudia el tema.

2.1 IMPACTOS SOBRE LA BIODIVERSIDAD

Los hallazgos obtenidos mediante la RSL revelan un buen nivel de discernimiento por parte de la comunidad científica, entre los fenómenos del clima asociados a la variabilidad climática y aquellos que pueden ser atribuidos al cambio climático.

La distinción conceptual entre variabilidad natural y cambio climático es esencial para:

1. Diferenciar impactos causados por eventos climáticos que son *naturales* (es decir, que son parte de la variabilidad climática normal de la tierra, no asociada al crecimiento industrial referido en el acuerdo de París¹⁴), de aquellos que son inducidos (activados o causados por las actividades humanas y por el cambio climático).
2. Identificar los impactos que afectan a la biodiversidad que pueden ser efectivamente gestionados a escala de la cuenca y/o a escala nacional.
3. Apoyar en la identificación de costos de inacción asociados a acciones específicas de adaptación, dimensionadas a las escalas referidas en el aspecto #2.

La ocurrencia de los *eventos naturales* del clima no es susceptible de evitar. Sin embargo, sus efectos/impactos pueden ser relativamente controlados y minimizados mediante acciones, normalmente de prevención, que, incorporadas a la gestión de desastres climáticos, contribuyen por igual con la adaptación a los impactos atribuibles a cambio climático. El resultado es una retroalimentación positiva que puede y debe ser aprovechada para optimizar la gestión ante los efectos adversos vinculados al clima.

Como resultado del RSL se determina que la ciencia mantiene un permanente estudio y análisis del rol de las barreras geográficas, de la heterogeneidad del hábitat, del cambio climático y de las interacciones de las especies de flora y fauna, en la generación y el mantenimiento de los ecosistemas. Los eventos climáticos, la geología y la geodiversidad han moldeado por millones de años, los procesos biológicos y ecológicos que determinan los componentes característicos de la biodiversidad del ecosistema amazónico (Guayasamin, Ribas, Carnaval, & et al, 2021), (Val, Figueiredo, Melo, & et al, 2021).

La incompreensión de aspectos claves como el cambio climático o comportamiento natural del clima y la respuesta de la diversidad biológica a tensiones naturales e inducidos, ha conllevado (a escala global y no exclusivamente para la gestión de la biodiversidad), a acciones de mitigación ineficientes o contraproducentes, decisiones de adaptación que pueden conllevar a una *mala adaptación* (Noble, S., Y.A., & et al, 2014).

Para la gestión de la biodiversidad de la cuenca del Amazonas, una precaria o nula comprensión de esta diferencia (entre variabilidad natural y cambio climático), puede traducirse en una relación de perder-perder porque los costos de acción para atender

¹⁴ La variabilidad climática normal de la Tierra se refiere a los cambios naturales en el clima que ocurren a lo largo de diferentes escalas de tiempo, desde años hasta milenios. El Acuerdo de París se centra en abordar el cambio climático causado por actividades humanas, especialmente el crecimiento industrial, que ha aumentado significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero desde la era preindustrial.

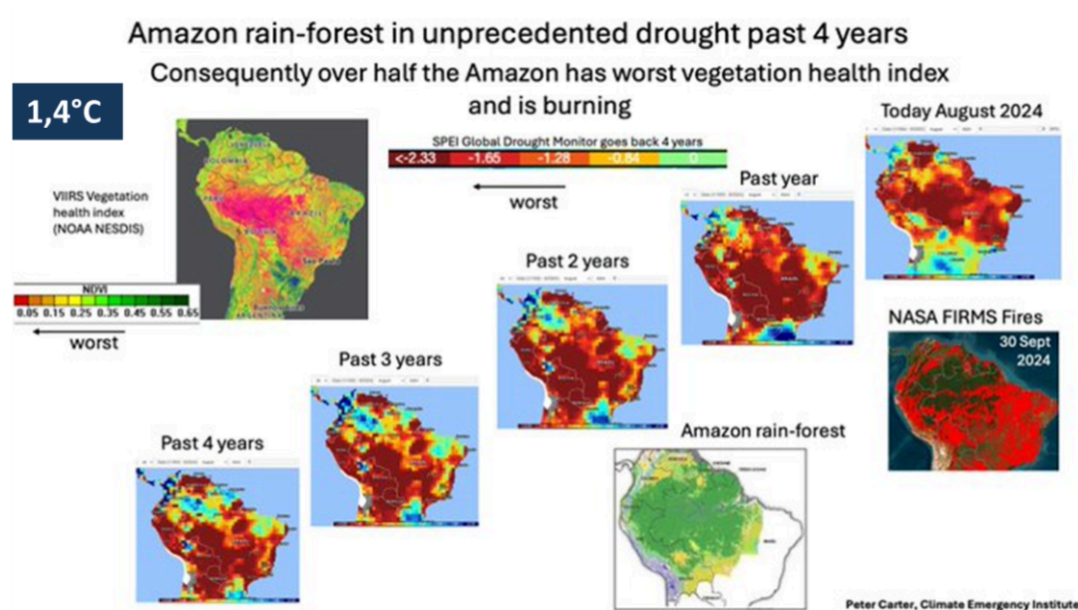
impactos que no pueden ser manejados, se suman a los costos de no acción para impactos atribuibles al cambio climático que sí pueden gestionarse, pero que no son atendidos. El resultado puede medirse en tiempo y dinero perdidos, y lo más preocupante, en una afectación creciente a la biodiversidad de la cuenca, como lo muestran numerosos estudios analizados en este documento.

En este análisis se integra la información consultada respecto a los impactos del cambio climático en la biodiversidad de la cuenca del Amazonas, proyectados por modelos hidroclimáticos y escenarios de cambio climático, principalmente por efecto de la deforestación y los incendios forestales, estén o no expresamente asociados a diversas actividades humanas que tienen lugar en la cuenca. También se analizan las implicaciones de la activación de procesos hidrológicos y geomorfológicos que desencadenan otros impactos, como inundaciones, sequía hidrológica y deslizamientos de masas de tierra, que magnifican los impactos atribuibles al cambio climático en la biodiversidad de la cuenca.

2.1.1 Impactos ocasionados por cambio en régimen de lluvia y temperatura

La cuenca del Amazonas es una de las zonas del planeta más afectadas por las sequías prolongadas, la deforestación excesiva y la quema ilegal. En su conjunto estos factores desencadenan una serie de riesgos que comprometen el funcionamiento hidrológico de la cuenca. En la Figura 7 puede observarse cómo el bosque amazónico ha estado expuesto al aumento sin precedente de la sequía en los últimos cuatro años. Uno de esos riesgos, común a los referidos factores, son los incendios forestales de gran magnitud que a la vez liberan grandes volúmenes de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) asociadas a estos y a otros impactos asociados a la compleja problemática ambiental que presenta la cuenca.

Figura 7. Sequías sin precedentes en el bosque lluvioso (tropical) amazónico. Periodo 2020 – 2024



Fuente: SPEI Monitor Global de Sequía
<https://spei.csic.es/map/maps.html#months=0#month=7#year=2024> (consultado el 18/10/24).

Se ha advertido la importancia de entender las diferencias, no sólo físicas, sino de demandas de política climática, que deben considerarse para gestionar efectivamente los efectos de la variabilidad climática y del cambio climático en la biodiversidad. Respecto a la variabilidad climática, las evidencias científicas disponibles sugieren que esta puede ser uno de los múltiples factores que ha contribuido con la pérdida de resiliencia en la Amazonía desde principios de la década de 2000 (Boulton, Lenton, & Boers, 2022). Varios eventos asociados al funcionamiento actual del sistema climático dan cuenta de ello:

1. Un siglo con la concurrencia de tres sequías prolongadas;
2. Las anomalías positivas de temperatura de la superficie del mar (Sea Surface Temperature SST, por sus siglas en inglés) en el Océano Atlántico tropical norte (en comparación con la climatología, y consistente con un cambio de la Oscilación Multidecadal del Atlántico (OMA) a su fase positiva), y
3. El rol que ejerce el enfriamiento causado por los aerosoles debido a las reducciones en la actividad antropogénica.

En un estudio realizado en 4 regiones amazónicas: Amazonía Central y Oriental, Escudo Guayanés, Amazonía Sur, y Amazonía Occidental, se observaron varias respuestas relevantes con relación a las condiciones hidrológicas dominantes:

1. La diversidad alfa¹⁵ de los árboles varía a lo largo del gradiente de las condiciones hidrológicas locales en función del contexto climático, aumentando hacia condiciones topográficas bien drenadas en bosques húmedos;
2. La densidad de madera aumenta hacia condiciones topográficas bien drenadas en dos de las cuatro regiones amazónicas estudiadas;
3. La composición de especies cambia a lo largo de gradientes de condiciones hidrológicas locales dentro de tres de las cuatro regiones.

El estudio concluye que las condiciones hidrológicas locales son determinantes de la diversidad y de la composición de los bosques amazónicos. Las condiciones hidrológicas locales influyen significativamente en la diversidad y composición de los árboles en toda la cuenca del Amazonas, con suelos bien drenados que aumentan la diversidad y la densidad de madera en los bosques más húmedos (Marca-Zeballos, Moulatlet, Sousa, & et al, 2022).

Una evaluación en profundidad del balance hídrico a lo largo del período 2001-2021 en toda la cuenca del Amazonas, destaca que, en la región sur de la Amazonía, específicamente dentro de la subcuenca del río Madeira¹⁶, se observa la cobertura forestal

¹⁵ Se refiere a la diversidad dentro de un área o ecosistema en particular, y generalmente se expresa por el número de especies (es decir, la riqueza de especies) en ese ecosistema (Whittaker, 1972).

¹⁶ El río Madeira fluye a través de territorio de Brasil, Bolivia y Perú, y su cuenca hidrográfica abarca 1.420.000 km². La mayor parte del río discurre por Brasil, y en un pequeño tramo es la frontera con Bolivia. Alberga especies y ecosistemas complejos que regulan el clima, el cambio climático y los procesos hídricos.

más baja (56,0%), mientras que en la subcuenca norte del río Negro¹⁷ se observa la cobertura forestal más alta (85,0%). Las áreas forestales más preservadas, como las subcuencas de los ríos Negro y Solimões¹⁸, con porcentajes de 81,9% y 74,2%, respectivamente, tienen mayores tasas anuales de precipitación y evapotranspiración a lo largo del tiempo. Por otro lado, las regiones que fueron afectadas por la deforestación más intensa a lo largo del período estudiado, como las subcuencas de Madeira, Tapajós¹⁹ y Xingú²⁰, presentan menores tasas anuales de precipitación y evapotranspiración, con porcentajes de preservación de 54,6%, 62,6% y 70,7%, respectivamente. A medida que el ritmo de deforestación se desaceleró entre 2003 y 2013, las tasas de precipitación anual aumentaron en un 12,0%, mientras que la evapotranspiración disminuyó en un 2,0%. Los bosques desempeñan un papel crucial en el balance hídrico de la cuenca del Amazonas, ya que las zonas con alta cobertura forestal experimentan mayores tasas de precipitación y evapotranspiración, mientras que las zonas con deforestación intensa experimentan tasas más bajas (Ribeiro, Mohanty, Rotunno Filho, & et al, 2023).

Los bosques degradados también inducen retroalimentación biofísica sobre el clima, ya que experimentan menos enfriamiento debido a la evapotranspiración. Estos bosques incluyen los bosques quemados, aislados, de borde y otros bosques deteriorados, representan el 24,1% del área total de bosque húmedo tropical. La temperatura de la superficie terrestre de los bosques húmedos tropicales degradados es más alta que la de los bosques intactos cercanos, lo que lleva a un efecto de calentamiento de $0,022 \pm 0,014$ °C sobre los trópicos. El déficit de carbono acumulado de los bosques degradados alcanza $6,1 \pm 2,0$ PgC²¹, equivalente a un efecto de calentamiento biogeoquímico de $0,026 \pm 0,013$ °C. La degradación forestal causada por perturbaciones antropogénicas entre 1990 y 2010 induce un efecto de calentamiento diurno de $0,018 \pm 0,008$ °C y un déficit de carbono de $2,3 \pm 0,8$ PgC (Zhu, Li, Ciais, & et al, 2023). Estos valores son del mismo orden de magnitud que los debidos a la deforestación y enfatizan la importancia de tener en cuenta los efectos biofísicos y biogeoquímicos combinados en los compromisos de mitigación relacionados con la reducción de la degradación forestal y la restauración de los bosques tropicales.

¹⁷ Más del 90% de la cuenca del río Negro está en Brasil. El resto se encuentra principalmente en Venezuela, Colombia, y apenas menos del 1 % en Guyana. Su cuenca hidrográfica abarca 700.000 km². Alberga una gran riqueza de especies. Se han documentado unas setecientas especies de peces en la cuenca del río, incluyendo casi cien endémicas y varias especies todavía no descritas.

¹⁸ El río Solimões es el tramo superior del río Amazonas que se encuentra en la región amazónica de Brasil. Se extiende desde la triple frontera entre Brasil, Colombia y Perú hasta la ciudad de Manao. Su curso drena enteramente por territorio de Brasil.

¹⁹ La cuenca del Tapajós es la quinta mayor cuenca de entre los ríos que fluyen al Amazonas. Con aproximadamente 489.000 km², abarca alrededor del 7% de la cuenca del Amazonas.

²⁰ La cuenca del Xingú es la cuarta mayor cuenca afluente del Amazonas. Con aproximadamente 504.000 km². Su curso drena enteramente por territorio de Brasil. Posee un alto endemismo, los expertos temen por un número de especies que solamente viven en el Río Xingú o en las planicies de inundación.

²¹ El PgC (petagramo de carbono) es una unidad de medida que se utiliza para cuantificar la cantidad de carbono, especialmente en el contexto de las emisiones de gases de efecto invernadero y el cambio climático. Un Pg equivale a 10⁹ toneladas métricas o sea 1000 millones de toneladas métricas.

Adicionalmente, se proyecta un incremento de temperatura promedio de 1.3 °C a 6.5 °C hacia finales del siglo, dependiendo del escenario global de emisiones (Carvalho, Oliveira, Pedersen, & et al, 2020). Este aumento provocará el estrés hídrico y acelerará la mortalidad de árboles, afectando significativamente la capacidad de los bosques amazónicos para actuar como sumideros de carbono (Phillips, Aragão, Lewis, & et al, 2009).

La precipitación promedio podría disminuir un $12\% \pm 11\%$ en toda la región debido a la deforestación y el cambio climático (Spracklen & Garia-Carreras, 2015). Por su parte (Llopart M. , Reboita, Coppola, & et al, 2018) encontraron que la deforestación de la Amazonia induce una respuesta de patrón dipolar en la precipitación sobre la región: una reducción sobre el oeste (alrededor del 7,9%) y un aumento sobre el este (alrededor del 8,3%). De acuerdo con (Llopart M. , Reboita, Coppola, & et al, 2018) bajo el escenario de deforestación los procesos de la superficie terrestre juegan un papel importante e impulsan la precipitación en la Amazonia occidental; por otro lado, en el lado este, la circulación a gran escala impulsa la señal de cambio de precipitación.

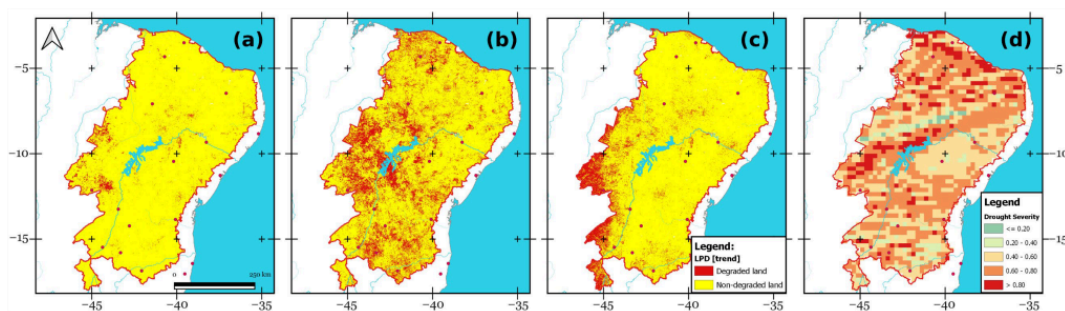
2.1.2 Impactos ocasionados por eventos hidrológicos extremos: sequías e inundaciones.

Utilizando imágenes satelitales MODIS EVI²² y anomalías acumulativas de déficit hídrico, se observan grandes diferencias espaciales en la ocurrencia de eventos climáticos extremos entre 1980 y 2019, con un aumento en la frecuencia de sequías en el centro y norte de la Amazonía y la intensidad de la sequía en el sur de la cuenca del Amazonas. Los resultados indican que el aumento previsto en la frecuencia e intensidad de las sequías puede tener consecuencias negativas para el funcionamiento de la selva amazónica. Sin embargo, los períodos húmedos más frecuentes en combinación con estas sequías podrían contrarrestar su impacto negativo (Van Passel, de Keersmaecker, Bernardino, & et al, 2022).

Aplicando varios índices de sequía, el trabajo de (Paredes-Trejo, Barbosa, Giovannettone, & et al, 2022), realizado para el noreste de Brasil, revela que 757.704 km² (12,67% de la cuenca del Amazonas), son tierras degradadas en las cuales se observa una tendencia combinada a la baja en la productividad de la tierra, la degradación del carbono orgánico del suelo (COS) y la degradación de la cobertura del suelo (Figura 8). El mayor foco de degradación de la tierra se identificó a lo largo del límite suroeste de la cuenca del río Amazonas.

Figura 8. *Distribución espacial de tierras degradadas/no degradadas localizadas en el noreste de la cuenca del Amazonas*

²² Los índices de vegetación MODIS, proporcionan comparaciones espaciales y temporales consistentes del verdor del dosel de la vegetación, una propiedad compuesta del área foliar, la clorofila y la estructura del dosel. El índice de vegetación mejorado (EVI), minimiza las variaciones entre el dosel y el suelo y mejora la sensibilidad en condiciones de vegetación densa.



Nota: Tomado de Paredes-Trejo et al., (2023).

El indicador 15.3.1²³ de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), detecta eficazmente la degradación de la tierra en la cuenca del río Amazonas, con el mayor punto crítico en la región suroeste, y es sensible a la gravedad de la sequía a largo plazo (Paredes-Trejo, Barbosa, Giovannettone, & et al, 2022).

Se proyecta un incremento del área afectada por sequías severas y moderadas en el Amazonas oriental, que podría duplicarse y triplicarse, respectivamente, para el año 2100 (Duffy, Brando, Asner, & et al, 2015).

Respecto a los caudales máximos de los ríos andinos, se proyecta un aumento en los ríos andinos del noroeste variable entre un 9% a 18.3%, lo que incrementará la extensión de inundaciones en estas áreas. En contraste, los caudales mínimos en el este de la cuenca podrían reducirse hasta un 15.9%, afectando la disponibilidad de agua durante la estación seca (Sorribas, Paiva, Melack, & et al, 2016).

2.1.3 Impactos ocasionados por la deforestación.

La deforestación de la Amazonía provoca la pérdida de biodiversidad, acentúa el cambio climático y la propagación de enfermedades infecciosas, lo que repercute en la atención de la salud pública de la población de los países de la cuenca del Amazonas, y a la salud a escala global (Ellwanger J. H., Kulmann-Leal, Kaminski, & et al, 2020).

La deforestación es la principal amenaza al *Bosque ombrófilo tropical de baja altitud*, que predomina sobre la llanura amazónica de Brasil, Colombia, Ecuador, Perú y Venezuela, así como en las Guayanas; el *Bosque siempreverde estacional tropical de baja altitud*, que cubre gran parte de la Amazonia boliviana y un vasto sector al sur del Amazonas en el este de Brasil, y el *Bosque tropical submontano ombrófilo*, que se extiende sobre las montañas del Escudo de Guayana y de las laderas andinas. La deforestación es causada principalmente por la expansión de la frontera agrícola, la tala ilegal y la minería.

La cuenca del Amazonas incluye una parte de cordillera andina conocida como Andes Tropicales su conexión espacial y funcional con la se ha estudiado con mayor interés; si bien aún son muy escasos los trabajos publicados al respecto, se presentan hallazgos que

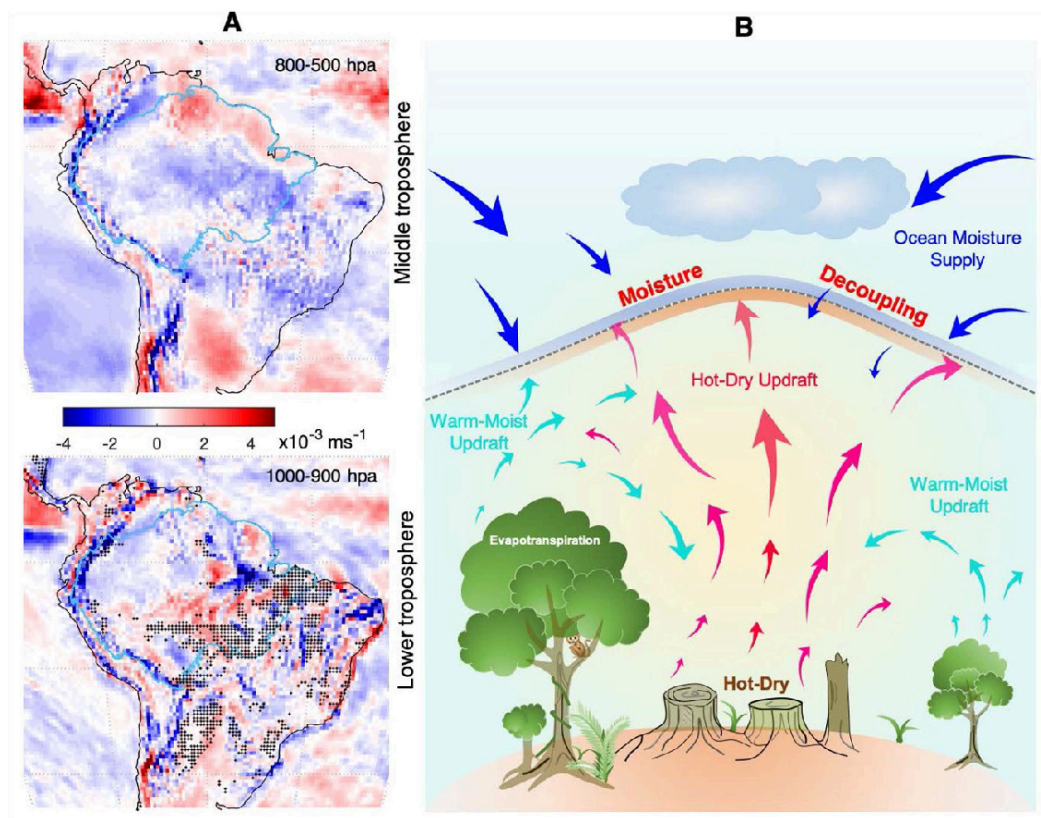
²³ ODS 15 Vida de ecosistemas terrestres. Meta 15.3: De aquí al 2030 luchar contra la desertificación, rehabilitar las tierras y los suelos degradados y aumentar considerablemente la forestación y la reforestación a nivel mundial. Indicador 15.3.1: Proporción de tierras degradadas en comparación con la superficie total. <https://agenda2030lac.org/es/ods/15-vida-de-ecosistemas-terrestres/metadatos/153> (consultado el 08/11/2024).

confirman que es la deforestación en los Andes tropicales la que conduce a una disminución del 50 -100% en la energía potencial convectiva disponible²⁴, lo que resulta en una disminución de lluvias intensas, una disminución de las tasas de precipitación moderadas, y un cambio de los máximos de precipitación a las tierras bajas de la Amazonía (Eghdami & Barros, 2020).

En el trabajo de (Xu, Zhang, Riley, & et al, 2022), se plantea la hipótesis de que la Amazonía alcanzará un *punto de inflexión* irreversible cuando la deforestación ralentice el ciclo hidrológico lo suficiente como para que los ecosistemas de bosques tropicales no puedan sostenerse. La reducción de la evapotranspiración después de 20 años de deforestación secó la atmósfera de manera persistente y causó un *desacoplamiento de la humedad*, es decir, genera un signo opuesto de cambio de humedad entre la troposfera inferior y media. El aumento de la deforestación exacerbó la desecación de la troposfera inferior e hizo que penetrara más profundamente en la troposfera media en las estaciones seca y de transición sobre los bosques y sabanas monzónicas. La deforestación alcanzó una magnitud tal, que indujo corrientes ascendentes aumentadas por el calentamiento, elevó el aire caliente y seco y, por lo tanto, redujo la mezcla descendente de los suministros de agua del Atlántico tropical que normalmente humedecen los bosques amazónicos (Figura 9). **La conclusión más preocupante de ese estudio es que la grave desecación atmosférica en el sur y el este de la Amazonía no puede compensarse con un aumento de los suministros de agua del Océano Atlántico, lo que demuestra una transición irreversible en el ciclo hidrológico de la Amazonía intensificada por la rápida deforestación.**

Figura 9.*Desacoplamiento de humedad*

²⁴ La energía potencial convectiva disponible (CAPE, por sus siglas en inglés) es un concepto meteorológico que mide la cantidad de energía que una parcela de aire ganaría al elevarse a una altura específica en la atmósfera y es crucial para el desarrollo de fenómenos meteorológicos convectivos intensos, como tormentas eléctricas y tornados.



Nota: Las corrientes ascendentes aumentadas provocaron el desacoplamiento de la humedad. (A) El cambio de la corriente ascendente de la estación seca (Δw , $m\ s^{-1}$) durante 2000-2019 en relación con 1980-1999 en la troposfera media (800-500 hpa) y la troposfera baja (1000-900 hpa); (B) la deforestación induce que la atmósfera cálida y seca aumente las corrientes ascendentes hacia la troposfera media, lo que disminuye el transporte de humedad a favor del viento proveniente de océanos tropicales y bosques adyacentes, lo que resulta en un desacoplamiento de la humedad entre estas dos capas atmosféricas. El negro '+' en (A) denota celdas de pérdida de bosque >10%. Tomado de (Xu, Zhang, Riley, & et al, 2022)

La circulación a escala sinóptica²⁵ inducida por la deforestación puede retrasar el inicio de la temporada de lluvias en el sur de la Amazonía entre 30 y 40 días, lo que afecta a los ecosistemas, la agricultura y la generación de energía (Commar, Abrahao, & Costa, 2023). De igual forma, puede conducir a una disminución del 55% al 70% en la precipitación anual, en consecuencia, la restauración forestal puede ser más efectiva para mejorar la precipitación de lo que se suponía anteriormente (Baudena, Tuinenburg, Ferdinand, & et al, 2021).

(Staal, Flores, D Aguiar, & et al, 2020) cuantificaron espacialmente las interacciones entre la sequía y la deforestación en toda la Amazonía durante el siglo XXI. Encontraron una gran variabilidad en la respuesta de la deforestación a la intensidad de la estación seca, con un aumento promedio significativo, pero pequeño, en las tasas de deforestación con una estación seca más intensa: cuando la deforestación tiende a aumentar en un 0,13% anual el

²⁵ La escala sinóptica, también conocida como escala grande o escala ciclónica, es una escala meteorológica que abarca movimientos atmosféricos de aproximadamente 1,000 km o más. Es típica de las depresiones en las latitudes medias, como los ciclones extratropicales.

déficit hídrico, se incrementa en un mm. De igual forma, estos autores reportan que la deforestación, ha causado aproximadamente el 4% de la sequía observada recientemente, siendo la parte sudoccidental de la Amazonía la más afectada. Combinando ambos efectos –sequía más intensa y deforestación- determinan una retroalimentación de sequía-deforestación que se refuerza y que actualmente es pequeña, pero que se fortalece gradualmente con la deforestación acumulada.

2.1.4 Impactos debidos a incendios forestales.

En la sección previa (2.1.3) se ha explicado como los cambios de régimen climático y la pérdida de bosques en la Amazonía aumentan la susceptibilidad a los incendios, y determinan una mayor frecuencia y gravedad de las sequías, ello pone de manifiesto la necesidad de estrategias de conservación forestal y protección contra incendios. Como se ha referido, la pérdida forestal acumulada desde el año 2000 en la cuenca del Amazonas, calentó y secó la atmósfera inferior, lo que redujo la circulación de humedad y resultó en un incremento de la extensión y gravedad de la sequía, lo que aumentó los riesgos a incendios forestales.

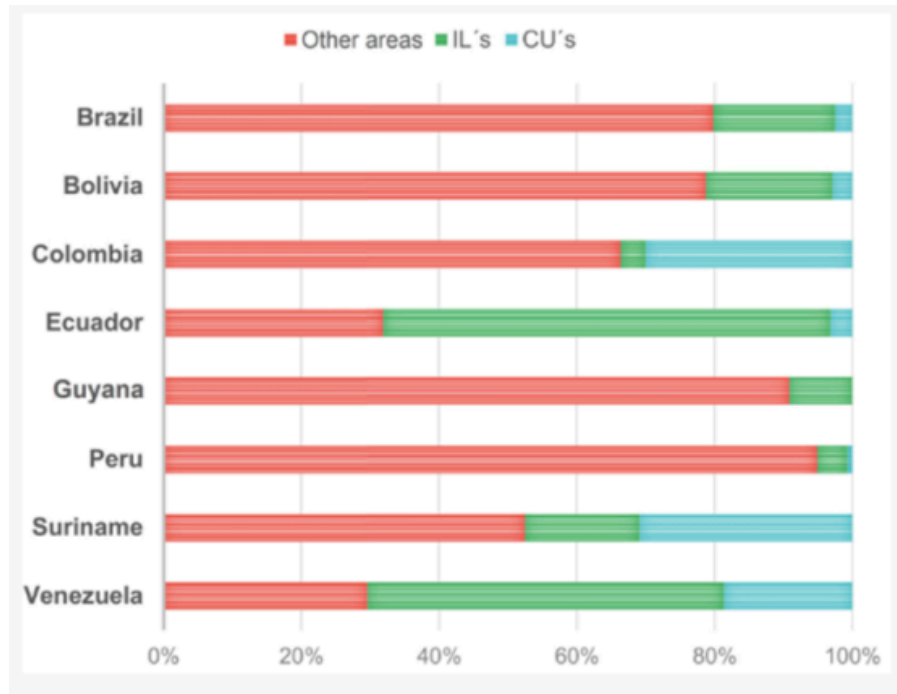
El riesgo de incendio en la cuenca del Amazonas es más significativo en la región sureste, donde las sabanas tropicales experimentan largos períodos estacionalmente secos. También se ha evidenciado que los incendios se han estado expandiendo a través de la temporada de transición húmeda-seca y hacia el norte a la transición de sabana-bosque y a las regiones de bosques tropicales estacionales, en respuesta al aumento de la pérdida de bosques en el llamado "*Arco de Deforestación*"²⁶.

En el trabajo de (Silva Junior, Lima, Teodoro, & et al, 2022), para el periodo entre 2001-2019, se registra que Brasil tuvo la mayor área afectada con 220.087 focos de incendio y 773.360 km² de superficie quemada, representando el 54,7% del total quemado en la cuenca del Amazonas, seguido de Bolivia con 102.499 focos de incendio, 571.250 km² superficie quemada, con un 40,4% del área total quemada. En general, estos incendios no sólo afectan bosques en zonas de frontera agrícola (76,91%), sino también en tierras indígenas (17,16%) y unidades de conservación (5,93%), las cuales son reconocidas como áreas de conservación de la biodiversidad. Durante este período de estudio, el bosque absorbió 1092 Tg de carbono, pero emitió 2908 Tg de carbono, lo que es 2,66 veces mayor que el carbono absorbido.

En la Figura 10 se muestran los porcentajes de áreas afectadas por los incendios, correspondientes a áreas con diferentes niveles de protección en los países de la cuenca. En la Figura 11 se puede observar una representación general de la productividad primaria bruta, el índice de precipitación y la suma de áreas quemadas, en cada país de la cuenca del Amazonas para el periodo de 20 años analizado.

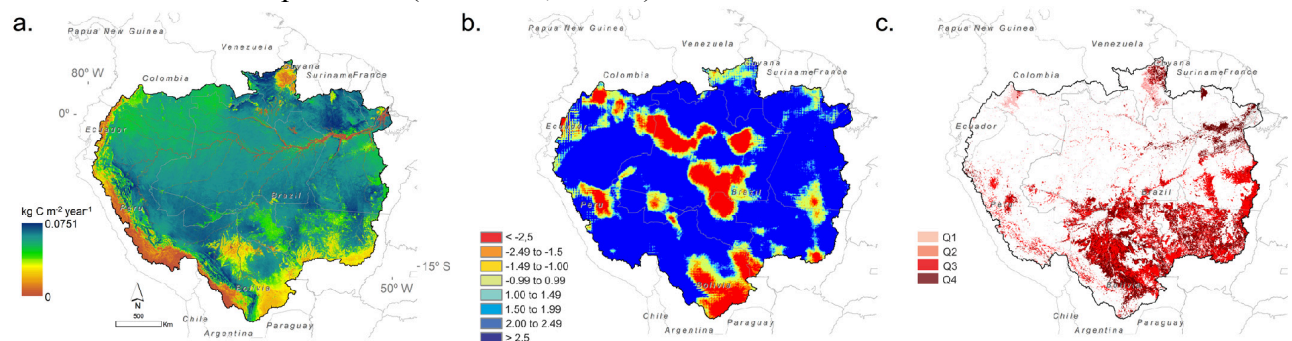
Figura 10. Porcentaje de área quemada en áreas de conservación (tierras indígenas (IL) y unidades de conservación (CU) y otras áreas en cada país de la cuenca del Amazonas

²⁶ El arco de deforestación en la Amazonía es la región donde la frontera agrícola se acerca a la selva y se registran las mayores tasas de deforestación.



Fuente: Silva Junior et al. (2022).

Figura 11. Representación general de la cuenca del Amazonas durante el período 2001-2019, incluyendo (a) la productividad primaria bruta promedio del período de estudio (PIB, kg C m²); (b) la suma de cada año índice de precipitación estandarizado (SPI); y (c) la suma de las áreas quemadas (trimestres, T1-T4)



Fuente: Tomado de Silva Junior et al. (2022).

Los hallazgos del trabajo de (Silva Junior, Lima, Teodoro, & et al, 2022), muestran que la degradación ambiental causada por los incendios está relacionada con la aparición de períodos secos en la cuenca del Amazonas. Sin embargo, aún no está claro cuánta degradación por quema puede resistir el bosque antes de llegar a un punto sin retorno. Lo anterior conlleva a una degradación ambiental a largo plazo, incrementada por los períodos secos, comprometiendo el papel del bosque como sumidero de carbono. Aunque el estudio no evaluó la degradación causada por factores antropogénicos como los cambios de uso y ocupación de la tierra, los incendios están directamente relacionados con las emisiones de carbono. Los autores advierten que los países cuyos territorios forman parte de la cuenca

del Amazonas, necesitan evaluar la relación costo-beneficio de permitir la expansión de la frontera agrícola a expensas de deforestar y quemar sus áreas boscosas. En este aspecto justamente este estudio pretende aportar criterios para el análisis de los tomadores de decisiones acercando el estado del arte de la academia en términos concretos y resumidos.

(De Faria, Marano, Piponiot , & et al, 2021) estiman que la recuperación de la biomasa aérea en toda la Amazonía (con una resolución espacial de 3 km), disminuye en un 4%, 19% y 46% en los bosques afectados por la sequía, los incendios y una combinación de tala + incendio, respectivamente. También estiman un tiempo promedio de recuperación de la biomasa de 27 años para la sequía, 44 años para áreas quemadas y 63 años para áreas taladas + quemadas y valores máximos que alcanzan los 184 años en áreas de alta intensidad de incendios. Adicionalmente, se registran mayores pérdidas de carbono en las áreas afectadas por la tala y los incendios. Estas perturbaciones frecuentes pueden aumentar las pérdidas de carbono de los ecosistemas frágiles.

Como confirman las evidencias científicas presentadas, la crisis de incendios en el Amazonas continúa aumentando el riesgo de muerte regresiva de los bosques a gran escala, amenazando la biodiversidad regional y el clima global. Sin desconocer la importancia de los esfuerzos de los países de la cuenca del Amazonas por controlar la proliferación de los incendios, y de la incertidumbre sobre su efectividad, (Machado, Berenguer, Brando, & et al , 2024) advierten sobre la necesidad de establecer estrategias de largo plazo con intervenciones que aborden las causas subyacentes de los incendios centradas en la gestión del paisaje, la concienciación y la educación pública, así como el compromiso con las comunidades locales y partes interesadas en resolver este problema recurrente. El desarrollo sostenible y los esfuerzos de conservación son cruciales para proteger la cuenca del Amazonas de la sequía extrema y los incendios forestales, preservando la biodiversidad y los servicios ecológicos (Berlinck, Lima, Pereira, & et al, 2021); (Bilbao, Millán , Matany Luque, & et al, 2022).

Los incendios forestales amenazan a parches o extensiones de *sabana arbolada* en el noreste de la cuenca y en la Bolivia amazónica. De hecho, se espera un incremento significativo en la frecuencia e intensidad de incendios forestales, especialmente en la Amazonía oriental, debido a la combinación de altas temperaturas, menor humedad y la fragmentación del bosque. Estas condiciones podrían duplicar la frecuencia de incendios (Cochrane & Barber, 2009).

La *región de Guayana* (sur de Venezuela, las Guayanas, el norte de la Amazonía brasileña, sector oriental de la Amazonía colombiana) con una *gran diversidad de bosques*, constituye una unidad biogeográfica discreta y diferente del resto de la cuenca, también está amenazada por la creciente ocurrencia de grandes incendios.

(Carvalho, Wittmann, Piedade, & et al, 2021), en un estudio que cubre una serie temporal de 35 años (1982/1983–2016/2017) realizado en el Parque Nacional Jaú (Amazonía Central) y sus alrededores, identifican a las actividades humanas como la principal fuente

de quema en bosques aluviales de aguas negras (igapós) de la Amazonía²⁷ particularmente susceptibles al fuego (Figura 12).

Figura 12. Igapó



Nota: Igapó na Amazônia. Foto: Dr. Morley Read / Shutterstock.com. (Oliveira Da Cruz, s.n.e).

Aproximadamente el 79% de los incendios ocurrieron cerca de asentamientos humanos (<10 km de distancia), lo que sugiere que las actividades humanas son las principales fuentes de ignición.

Sin embargo, numerosos autores asocian una elevada proporción de área quemada a los efectos de las sequías asociadas a eventos de El Niño. *Los resultados exhiben un ciclo anual marcado (unimodal) de la presencia de incendios caracterizado con un período de alta incidencia de eventos entre julio-noviembre y un período de baja ocurrencia de incendios en diciembre a junio, con máximos en agosto-septiembre, asociado con el ciclo anual de las precipitaciones en la cuenca del río Amazonas. Se evidencia el efecto de las dos fases del fenómeno ENSO, con mayor incidencia de incendios durante El Niño y disminución durante La Niña.* (Becerra Romero & Poveda , 2006). Por su parte (Borini Alves, 2018) *ha identificado una fuerte influencia de la estacionalidad en los subtotales anuales, donde las cicatrices de fuego de los meses más extremos de sequía representan el 86% del total de área quemada y el 32% del número de incendios. Estos incendios afectan proporcionalmente más a las superficies de mayor densidad de vegetación leñosa, a diferencia de lo que sucede al principio o fuera del período de sequía.* La página web de la NASA: Earth Observatory es contundente al indicar: *En 2023, como los investigadores habían pronosticado con meses de antelación, el pico de la temporada de incendios coincidió con un fenómeno de El Niño en curso y una sequía en la parte norte y oeste de la cuenca que agravó los incendios. Los brotes de incendios fueron particularmente intensos*

²⁷ Los bosques de Igapó, también conocidos como selvas tropicales densas, son la vegetación de la Amazonía brasileña que se encuentra a lo largo de ríos de aguas negras o claras, se inundan periódicamente y transportan bajas cantidades de sedimentos y nutrientes. (Oliveira Da Cruz)

en Amazonas, Pará y Amapá, según las observaciones satelitales. En estas áreas, las condiciones de sequía seguidas de un clima cálido y seco han ampliado los incendios que de otro modo no habrían podido propagarse. (NASA Earth Observatory , 2023). Los estudios indican que las sequías más extremas en la Amazonía fueron resultado de los fuertes eventos de El Niño-Oscilación del Sur (ENSO).

(Freund, Henley, Karoly, & et al, 2019), analizaron en un contexto histórico que abarca los últimos 400 años, la ocurrencia de El Niño y encontraron un aumento simultáneo de los eventos del Pacífico Central y una disminución de los eventos del Pacífico Oriental desde fines del siglo XX que conduce a una proporción de eventos del Pacífico Central y Oriental que es inusual en un contexto de varios siglos. En comparación con los últimos cuatro siglos, el período más reciente de 30 años incluye menos eventos de El Niño en el Pacífico Oriental, pero más intensos.

Los eventos El Niño dan lugar a sequías y estas *aumentan considerablemente la incidencia de incendios en la Amazonía, lo que genera un ciclo de retroalimentación positiva entre incendios y sequías. Los altos déficits de agua, la mortalidad generalizada de los árboles y la caída de residuos generados por las sequías, aumentan la disponibilidad de combustibles, lo que convierte a los bosques que alguna vez fueron húmedos en sistemas más inflamables.* (Costa F. R., Marengo, Albernaz, & et al, 2024). Estos mismos investigadores encontraron que *en regiones donde las etapas de estiaje coinciden con la estación seca, la sequía puede aumentar la mortalidad de los árboles de raíces poco profundas (plántulas enraizadas y árboles jóvenes de igapós). Los igapós son vulnerables a las sequías debido a los suelos mayormente arenosos o limosos, que drenan rápidamente y a los sistemas de raíces generalmente muy poco profundas. El dosel del bosque en el igapó, generalmente es menos estratificado y más bajo, lo que resulta en una menor humedad relativa del aire en el suelo del bosque, lo que los hace vulnerables a los incendios. Las condiciones hidrometeorológicas secas generadas por El Niño, favorecen la propagación de incendios en el sotobosque a lo largo de la superficie del suelo, lo que provoca una mortalidad masiva de árboles.* Estas evidencias y otras similares como las de (Pabón Caicedo & Montealegre Bocanegra, 2017) en Colombia y (Fearnside P. M., 2012) en Brasil sugieren que la perturbación de los bosques húmedos tropicales (igapós)²⁸ por incendios no es un fenómeno reciente.

A pesar de ello conviene hacer notar que (Freund, Henley, Karoly, & et al, 2019) indican que están surgiendo evidencias de que los eventos de El Niño del Pacífico Central se han vuelto más comunes, una tendencia que algunos estudios proyectan que continuará con el cambio climático en curso. (Fearnside P. M., 2012) advirtió sobre la conveniencia de incluir los incendios forestales en los GMC. En la actualidad el modelo Hadley Centre Global Environmental Model versión 3 (HadGEM3) incluye incendios forestales a través de su componente JULES que es un modelo de vegetación y superficie terrestre que simula los procesos ecológicos y biogeoquímicos que ocurren en la Tierra, incluyendo la dinámica de los incendios forestales. En HadGEM3, JULES representa los incendios forestales mediante

²⁸ Bosques amazónicos inundados estacionalmente por aguas negras y transparentes, ricos en biodiversidad y juegan un papel crucial en el ecosistema amazónico.

un conjunto de ecuaciones que describen los procesos de ignición, propagación y efectos del fuego. Estas ecuaciones tienen en cuenta factores como la disponibilidad de combustible, las condiciones meteorológicas (temperatura, humedad, viento) y la topografía del terreno.

2.1.5 Retroalimentación entre los impactos de la deforestación, incendios forestales y el cambio climático en la Biodiversidad de la cuenca del Amazonas.

En la cuenca hidrográfica del Amazonas los ecosistemas están siendo degradados por las actividades industriales a un ritmo muy superior al de los límites de resiliencia. Se perjudican vastas reservas de biodiversidad y servicios ecosistémicos de importancia mundial con profundas implicaciones para el almacenamiento de carbono y el clima (Albert, Carnaval, Flantua, & et al, 2023). Más de las tres cuartas partes de la selva amazónica ha ido perdiendo su capacidad de resiliencia desde principios de la década de 2000, lo que significa que no puede recuperarse tan rápidamente después de una sequía o un incendio. En fragmentos de bosque más cercanos a tierras de cultivo, carreteras o áreas urbanas, el bosque pierde resiliencia más rápidamente.

Los bosques secundarios en todo el bioma han compensado solo el 9,7% de las emisiones de carbono de la forestación antigua, a pesar de ocupar el 28,8% de la tierra deforestada. Sin embargo, estas cifras variaron entre países, desde el 9,0% en Brasil, hasta el 23,8% en Guyana para la compensación de carbono, y el 24,8% en Brasil y el 56,9% en Ecuador para la recuperación de la superficie forestal. Brasil domina la deforestación y las emisiones, pero tiene la recuperación más baja (Smith, Healey, Berenguer, & et al, 2021). Se aprecia una relación directa entre la pérdida de biodiversidad, la deforestación, bosques degradados por el fuego y la extracción de madera, que pueden generar una reducción del 2% al 34% en la evapotranspiración de la estación seca.

Los factores subyacentes de las perturbaciones (por ejemplo, la expansión agrícola o la demanda de madera) generan beneficios materiales para un grupo restringido de actores regionales y mundiales, mientras que las pérdidas no son cuantificadas apropiadamente.

Las proyecciones para 2050 indican que las cuatro principales causas de la degradación del bosque amazónico (incendios forestales, efectos de borde, extracción de madera y sequía extrema) seguirán siendo la amenaza más importante y una fuente de flujos de carbono a la atmósfera. Las proyecciones indican que la degradación seguirá siendo una fuente dominante de emisiones de carbono, independientemente de las tasas de deforestación (Lapola, Pinho, Barlow, & et al, 2023).

La rehabilitación de bosques en toda la cuenca del Amazonas tiene el potencial de enfriamiento de la atmósfera, con más humedad y calor latente (LH)²⁹, especialmente

²⁹ El calor latente (L) es la energía que se absorbe o libera cuando una sustancia cambia de estado. Se le conoce también como calor de cambio de estado. Se mide en J/kg en el sistema internacional. Su valor depende de la presión a la que se produzca el cambio de fase. Está relacionado con la propiedad térmica llamada entalpía. Calor latente de vaporización: la energía que se necesita para que una sustancia pase de estado líquido a gaseoso. (Google IA)

durante mayo-noviembre. Por ejemplo, la temperatura media estacional disminuyó significativamente en aproximadamente $1,2^{\circ}\text{C}$, lo que indica los efectos de enfriamiento de la reforestación. Además, la precipitación estacional aumentó en 5 mm/día en las áreas reforestadas. Por reforestación, el LH medio mensual también aumentó hasta 50 W m^2 en agosto en ciertas zonas, mientras que la humedad disponible a la atmósfera aumentó en un 27%, lo que indica posibles mecanismos causales entre el aumento del LH y la precipitación y enfatiza los mecanismos que se identificaron entre el inicio de la estación húmeda y la cobertura forestal. Por lo tanto, es probable que la recuperación de los bosques en toda la cuenca conduzca, no a revertir el cambio climático regional, pero si contribuya a desacelerar el ritmo de los cambios en el clima (Haghtalab, Moore, & Nejadhashemi, 2022).

La mayoría de los cambios forestales fueron impulsados por la conversión de pastizales y tierras de cultivo, y hay indicios de que el cambio climático es el principal impulsor de la pérdida de ecosistemas acuáticos. Entre 1985 y 2022, el cambio más extenso en la cobertura del suelo fue la conversión de bosques en pastizales. Se estimó que se perdieron 46,6 Mha (11% del bosque en 1985) de bosques en los 37 años analizados, lo que representa una pérdida promedio de 1,254 Mha/año. Los pastizales aumentaron en 44,7 Mha (10,6% más que en 1985), lo que significa que la conversión de bosques a pastizales domina en la Amazonía (95,7%) (Souza, Oliveira, de Souza Filho, & et al, 2023).

La (Monitoring of Andes Amazon Program (MAAP), 2024) reporta que para el 2022 los incendios que mayormente afectaron el territorio de la cuenca corresponden a los asociados a la deforestación, en particular para áreas recientemente deforestadas (73%), los que afectan a las sabanas (16%), los bosques (7%) y a los pastizales (4%). También se registraron 122 incendios asociados a los cultivos de soya. Para el mismo año se contabilizaron 983 incendios mayores para un área quemada de 1,1 millones de ha. Por países de la cuenca del Amazonas, Brasil acumuló el 72% de los incendios, seguido muy de lejos por Bolivia (15%), Perú (12%) y Colombia (1%). El territorio afectado por los incendios y la deforestación alberga 30 áreas protegidas y 44 territorios indígenas.

Aunque el calor latente se define y se mide fundamentalmente en Joules por kilogramo (J/kg) en la física y la termodinámica. Esta unidad representa la cantidad de energía necesaria para cambiar la fase de un kilogramo de una sustancia sin cambiar su temperatura.

Sin embargo, en estudios de la Amazonía y en otros contextos de investigación ambiental y meteorológica, es común encontrar el calor latente expresado en Watts por metro cuadrado (W/m^2). Esto se debe a que, en estos campos, el interés principal no es la cantidad de energía por unidad de masa, sino el flujo de energía por unidad de área y tiempo. ¿Por qué Watts por metro cuadrado (W/m^2)? Flujo de energía en la superficie: En estudios de la Amazonía, se analiza el intercambio de energía entre la superficie terrestre (la selva, el suelo, el agua) y la atmósfera. El calor latente, en este contexto, representa la energía utilizada para la evaporación del agua desde la superficie hacia la atmósfera. Medir este flujo de energía por unidad de área (m^2) es crucial para entender el balance energético de la región. Mediciones directas: Los instrumentos utilizados para medir el flujo de calor latente en la Amazonía, como los anemómetros sónicos y los analizadores de humedad, miden directamente el flujo de energía por unidad de área y tiempo, lo que resulta en unidades de W/m^2 .(Gemini IA)

Una condición de especial atención es que el 49,4% del territorio de la cuenca del Amazonas está bajo algún tipo de protección o manejo, además de que se ha reportado aproximadamente 3000 territorios indígenas asentados no uniformemente en el 35% del territorio de la región. Ambos aspectos deben ser prioritariamente considerados en la formulación de políticas de gestión de la biodiversidad de la cuenca.

2.1.6 Impactos sobre las especies de flora y fauna.

(Souza Jr, Marengo, Ferreira, & al, 2024) estudiaron el efecto en pérdida de espejos de agua debido a la grave sequía atribuida a El Niño en 2023 que afectó ríos, lagos, pequeños arroyos, humedales y embalses en la Amazonía, reduciendo rápidamente el nivel de agua por debajo de los récords históricos debido a la disminución de las precipitaciones y el calor en la región. Basado en imágenes satelitales del año 2023, estimaron la extensión de la pérdida de agua en los 4,2 millones de km² de superficie de agua del bioma amazónico brasileño (~62% del bioma total de la Amazonía). Identificaron la pérdida de 3,3 millones de hectáreas de agua superficial (33.000 km²) en relación con 2022, con una precisión del 92%.

En el trabajo de (Braz-Mota & Val, 2024) en relación con el evento extremo sequía-olas de calor del 2023 para la Amazonía, se advierte que a pesar de que muchas especies de peces tienen una tolerancia térmica relativamente alta, se vieron afectadas por las temperaturas extremas del agua que superaron sus máximos térmicos críticos (CT_{max}) durante este evento, lo que provocó una mortalidad masiva. En la imagen mostrada en la Figura 13 se aprecia la mortandad de peces observada durante este evento climático.

Figura 13. *Mortalidad de peces debido a la falta de oxígeno durante la estación seca. Igarapé dos Reis, Iranduba, Amazonas.*



Fuente: (Costa & Marengo, 2024). Foto: Alberto César Araújo/Amazônia Real.

(Souza Jr, Marengo, Ferreira, & al, 2024) advierten que, aunque El Niño en el Pacífico y el calentamiento de las aguas del Atlántico explican en parte las condiciones climáticas extremas experimentadas en la Amazonia, no explican plenamente la crisis asociada a este evento.

Frente a la histórica sequía extrema en la Amazonía en 2023, las evidencias científicas ponen de manifiesto la necesidad de comprender mejor los efectos de los eventos extremos del clima en la fisiología de la fauna silvestre de la Amazonia, en particular de peces, así como, la importancia de integrar estos conocimientos en investigación sobre el cambio climático y la formulación de políticas para proteger los ecosistemas y prevenir futuras crisis similares.

Muchas de las especies de peces endémicas de la Amazonia, que han evolucionado durante millones de años en nichos ecológicos específicos, pueden ser particularmente vulnerables a los rápidos cambios ambientales. Como se ha evidenciado previamente en este reporte, la deforestación en el Amazonas, principalmente provocada por incendios forestales y la deforestación, ha alterado significativamente los patrones de precipitaciones, reducido la evapotranspiración y dificultado la condensación del agua.

Si bien la Amazonia es naturalmente resistente a los incendios, las actividades humanas y las anomalías climáticas han aumentado su susceptibilidad a este tensor, afectando directamente al ecosistema a través de la escorrentía directa (agua que fluye sobre el suelo) y consecuentemente al caudal de los ríos. (Oberdorff T., Campero, Carajal-Vallejos, & et al , 2014) advirtieron que *los principales impulsores de la degradación de los ecosistemas de agua dulce en la región amazónica son la rápida expansión de la infraestructura y las actividades económicas. Estas perturbaciones provocan efectos negativos significativos en las comunidades de peces y podrían verse amplificadas por los impactos del cambio climático.*

La investigación de (Oberdorff T., Campero, Carajal-Vallejos, & et al , 2014) permitió la predicción de que *no se espera que la pérdida de hábitat debido al cambio climático tenga ningún efecto en las tasas de extinción de especies.* Advertían que, *sin embargo, el estrés térmico y la limitación de oxígeno podrían causar la extinción local de algunas especies y producir cambios progresivos en la estructura y composición de las comunidades de peces actuales.* Su prevención fue corroborada por (Majarrés Hernández , 2021) que *estudio la contribución de las variables ambientales (bioclimáticas) espacialmente y en función de la extensión considerada, siendo la temperatura, la altitud y la precipitación, las variables más importantes. Las predicciones mostraron que casi la mitad de las especies de peces de agua dulce actuales se perderán en las próximas décadas, con una pronunciada disminución en las áreas tropicales y mayores tasas de extinción en aquellas especies con un tamaño de cuerpo y un tamaño de rango geográfico más pequeño.* La distribución limitada y las adaptaciones especializadas de la gran mayoría de la ictiofauna³⁰

³⁰ La ictiofauna se refiere a los conjuntos de peces en un cuerpo de agua o región zoogeográfica.

representativa de los ríos y humedales de la Amazonia, pueden hacer que sean menos adaptables a las condiciones cambiantes (Val & Wood, 2022a).

El reporte del Panel de Ciencia por la Amazonía (SPA) (Panel de Ciencia por la Amazonia, 2021) advierte que muchas especies de peces en la Amazonía son migratorias y su capacidad para migrar está amenazada por el cambio climático. Los bagres Goliat (*Brachyplatystoma rousseauxii*, *B. platynemum*, *B. juruense* y *B. vaillantii*) realizan las migraciones más largas documentadas de peces de agua dulce en la Tierra. Desde hábitats de desove de cabecera en /o cerca del piedemonte andino de Bolivia, Colombia, Ecuador y Perú hasta hábitats de cría en el estuario del Amazonas en el océano Atlántico. Sus viajes migratorios pueden expandirse a 11.600 km cuando los juveniles más viejos de *B. rousseauxii* regresan a sus lugares de nacimiento (Barthem, Goulding, Leite, & et al, 2017). Los bajos niveles de agua durante eventos de sequía extrema pueden producir la fragmentación temporal del río, el bloqueo de las migraciones de peces y las extinciones locales) (Carvalho Freitas, Rivas, Pereira, & et al, 2012)

Se necesitan más estudios que evalúen la magnitud de las perturbaciones del cambio climático en las migraciones de peces. La pesca de los grandes bagres migratorios del Amazonas desempeña un papel importante como medio de subsistencia, alimentación, empleo e ingresos para la población local, y contribuye al desarrollo económico de los países de la región por su aporte a la obtención de divisas.

Por otra parte, en el mismo trabajo de (Carvalho Freitas, Rivas, Pereira, & et al, 2012) se advierte que los impactos en el bienestar social inducidos por los efectos del cambio climático y las represas, en las pesquerías de la Amazonia, son difíciles de calcular. Los autores refieren que esto se debe a que los impactos directos sobre la pesca pueden cambiar el comportamiento económico, lo que luego podría conducir a una serie de impactos indirectos que acentuarían los impactos del cambio climático. Lo anterior puede darse entre comunidades urbanas y rurales, dentro del sector pesquero o dentro de las comunidades locales cuya pesca es de subsistencia. Los impactos de estos cambios en la fauna ictícola y la pesca eran, en ese momento, impredecibles tanto a nivel de especies como de ecosistemas.

La cascada de respuestas sociales que se deriva de ambos tensores (cambio climático y represas) sobre peces y pesquerías en la Amazonia, reducen la calidad de vida de las comunidades locales y comprometen la biodiversidad. Una línea de efectos posibles (entre muchos otros), derivada del trabajo de (Carvalho Freitas, Rivas, Pereira, & et al, 2012), podría ejemplificarse así: *Se estimula una migración adicional desde áreas rurales a áreas urbanas en busca de alternativas de subsistencia, que induce a las personas que no migraron a pescar más intensivamente (la misma especie u otras aún abundantes), para compensar la disminución de la pesca local; esto presiona aún más a las poblaciones de peces ya reducidas.*

El cambio climático provocará una disminución de la idoneidad ambiental del pez paiche o arapaima (*Arapaima spp*). en un 16,6% durante la etapa de aguas altas y en un 19,4% durante la etapa de aguas bajas, lo que provocará brechas de protección en las llanuras aluviales de la Amazonía. La brecha es mayor en un 0,7% durante la etapa de estiaje.

Alrededor del 70% de los ambientes adecuados de *Arapaima spp.* permanecen actualmente sin protección; sus poblaciones están disminuyendo en su área de distribución nativa debido a la sobrepesca y la pérdida de hábitat. También han sido introducidas en otras regiones tropicales, donde a veces se las considera especies invasoras. El género *Arapaima* agrupa a grandes peces de agua dulce que viven en la cuenca del río Amazonas y son una parte importante de la economía local. Es probable que la falta de protección aumente en un 5% con los efectos futuros del cambio climático. Tanto las construcciones de represas existentes como las proyectadas pueden obstaculizar los flujos de población de la especie, entre las partes central, boliviana y peruana de la cuenca (Dubos, Lenormand, Castello, & et al, 2022).

Lo anterior podría aumentar la caza comercial sobre otras especies silvestres para satisfacer las necesidades de proteínas de las comunidades locales, provocando más impactos negativos en el ecosistema. Por ejemplo, al aumentar la participación en otras actividades extractivas (agricultura, minería, explotación maderera y de productos forestales no maderables), aumentaría la deforestación, interfiriendo con la capacidad de los bosques prístinos de servir como reserva genética para repoblar áreas degradadas. Las nuevas actividades económicas podrían provocar una migración inversa urbano-rural, lo que llevaría a un ciclo creciente de degradación.

Los mamíferos terrestres, especialmente los del sur y este de la Amazonía, son muy vulnerables a los cambios de vegetación provocados por el clima, como la sabanización, que repercute negativamente en el uso de su hábitat. Los impactos en otros grupos de la fauna de la cuenca del Amazonas aún están poco estudiados, sin embargo, se espera una reducción del 50% de las áreas adecuadas para mamíferos que sólo viven en áreas boscosas, mientras que las especies de sabana pueden aumentar su distribución (Sales, Galetti, & Pires, 2020).

En el trabajo de (Rocha & Sollmann, 2023) quince especies amazónicas y generalistas de mamíferos mostraron fuertes respuestas negativas al hábitat o a la cobertura de la sabana. El estudio fue realizado en cuatro áreas protegidas de acceso restringido, localizadas al sureste de la Amazonia brasilera en la zona de transición entre la sabana central de Brasil (Cerrado) y el bosque amazónico. Se enfatizó el hecho de que la amenaza de la sabanización se magnifica aún más, donde el cambio climático actúa directamente en sinergia con otras presiones antropogénicas que favorecen la expansión de hábitats degradados similares a las sábanas. Las sábanas derivadas resultantes están dominadas por bambú y pastos exóticos, a menudo bajo influencias antropogénicas directas, como el pastoreo de ganado, y es poco probable que proporcionen los mismos recursos que se encuentran en áreas de sabana natural. El estudio incluyó a la mayoría de los animales herbívoros grandes [danta (*Tapirus terrestris*), venado rojo (*Mazama americana*) y marrón (*Odocoileus virginianus*), pecarí de labios blancos (*Tayassu pecari*) y pecarí de collar (*Dicotyles tajacu*)], tanto carnívoros grandes (jaguar (*Panthera onca*), puma (*Puma concolor*) como varias especies más pequeñas (por ejemplo, tayra (*Eira barbara*), armadillo (*Dasypus spp.*), agutí negro (*Dasyprocta fuliginosa*). En general, los mamíferos de gran tamaño son más susceptibles a los efectos negativos del cambio climático.

Los grandes herbívoros y carnívoros realizan procesos tróficos clave relevantes para el mantenimiento de la estructura y función del ecosistema terrestre (por ejemplo, dispersión de semillas, depredación de semillas y control de la población de presas) y, por lo tanto, son indicadores de la integridad del hábitat y de la preocupación por la conservación. Una reducción severa en la distribución de estas especies en la región de estudio debido a la sabanización podría poner en peligro la integridad del bosque restante y el ecosistema ecotonal en su conjunto, incluso dentro de áreas protegidas. Esto es especialmente preocupante cuando se combina con las reducciones esperadas en otros órdenes de mamíferos que desempeñan funciones ecológicas cruciales y que han demostrado ser vulnerables al cambio climático, como los primates y los quirópteros.

Los resultados sugieren que los cambios en la vegetación inducidos por los efectos combinados del cambio climático y la deforestación pueden reducir la capacidad de las áreas protegidas en el sur de la Amazonia brasileña para salvaguardar las poblaciones de mamíferos terrestres y deben considerarse al evaluar los posibles efectos del cambio climático en estas especies (Rocha & Sollmann, 2023)

Se prevé que los cánidos salvajes como *Atelocynus microtis* (perro de orejas cortas), *Cerdocyon thous* (zorro cangrejero) y *Speothos venaticus* (perro de monte o venadero) perderán hasta el 91% de sus hábitats adecuados debido al cambio climático. Estas especies se enfrentan a trampas ecológicas, donde pueden establecerse en hábitats de menor calidad, lo que pone en peligro aún más su supervivencia (Oliveira, Viana-Junior, Trindade, & et al, 2023)

En el trabajo de (Leão, Ribeiro, Moraes, & et al, 2023) se proyecta una reducción de la distribución potencial de algunas especies de carnívoros bajo escenarios futuros del clima, donde se espera que cinco especies serán afectadas negativamente por el cambio climático en el escenario RCP4.5 y ocho en el escenario RCP8.5. El resto de las especies se mantienen estables en términos de área total. Todas las especies del estudio mostraron una pérdida de aptitud climática. Algunas especies perdieron casi toda la idoneidad climática en el escenario RCP8.5. Se destacó que los carnívoros más pequeños, se verían particularmente afectados y se proyecta que algunas especies experimentarán reducciones en áreas climáticas adecuadas de hasta aproximadamente el 46%. El perro de orejas cortas (*Atelocynus microtis*), un cánido endémico y amenazado de la Amazonía, será significativamente afectado en ambos escenarios, con una posible pérdida de aproximadamente el 49% de su distribución, especialmente en el arco de deforestación (Leão, Ribeiro, Moraes, & et al, 2023).

En general, los hallazgos indican que el cambio climático reducirá la distribución de los carnívoros en la Amazonia, con algunas especies afectadas negativamente y otras permaneciendo estables; también indican que las áreas protegidas pueden no ser eficientes para proteger la riqueza de especies de la fauna amazónica.

2.1.7 Impactos sobre la resiliencia de los ecosistemas y el equilibrio del carbono.

(Armenteras, 2024) señala *los bosques de la Amazonía han desarrollado a lo largo de millones de años un conjunto de estrategias de adaptación complejas para recuperarse de perturbaciones naturales como las inundaciones, las enfermedades y los incendios ocasionales. Estas estrategias incluyen la gran diversidad genética, la rápida regeneración de plantas, y la intrincada red de interacciones ecológicas que facilitan la resiliencia y la recuperación del ecosistema.* Sin embargo, se plantea si la capacidad de resiliencia de los bosques amazónicos será capaz de asimilar la magnitud de la degradación ambiental, impulsada por una deforestación rampante y un cambio climático acelerado.

(Longo, Saatchi, Keller, & et al, 2020) encontraron que durante la estación seca y bajo condiciones típicas, los bosques amazónicos severamente degradados (pérdida de biomasa $\geq 66\%$) experimentaron estrés hídrico con disminuciones en evapotranspiración (hasta 34%) y producción primaria bruta (hasta 35%) y aumentos de flujo de calor sensible (hasta 43%) y temperaturas medias diarias del suelo (hasta 6,5 °C) en relación con los bosques intactos. Sin embargo, el impacto relativo de la degradación de los bosques en los ciclos de la energía, el agua y el carbono es menor que el causado por sequías extremas de varios años, debido al estrés severo experimentado por los bosques intactos.

Los resultados destacan que los ciclos del agua y la energía en la Amazonía están impulsados no solo por el clima y la deforestación, sino también por previas perturbaciones y por cambios en la estructura del bosque debido a la degradación. Esto sugiere una influencia mucho más amplia de los cambios en el uso de la tierra, en los ecosistemas tropicales (Longo, Saatchi, Keller, & et al, 2020).

Los resultados del trabajo de (Docherty, Gloor, Sponchiado, & et al, 2023) sugieren que es poco probable que las reducciones a largo plazo en la precipitación, según lo proyectado en gran parte de la Amazonía por los modelos climáticos, alteren en gran medida la respuesta de los bosques tropicales al aumento de las temperaturas medias, pero pueden aumentar el riesgo de daño térmico de las hojas durante las olas de calor. Los hallazgos indican que a pesar de un aumento de 0,6°C a 2°C en la temperatura del aire del dosel después de una sequía prolongada, no se observan cambios en la sensibilidad térmica general de la fotosíntesis neta o la respiración. Sin embargo, la tolerancia al daño por calor extremo se redujo de $50,0 \pm 0,3$ °C a $48,5 \pm 0,3$ °C en condiciones de sequía.

La recuperación de los bosques en la cuenca del Amazonas puede enfriar la atmósfera y ralentizar el cambio climático, lo que podría revertirlo a escala regional o, al menos, ralentizar el ritmo de los cambios atribuibles a este (Haghtalab, Moore, & Nejadhashemi, Would Forest Regrowth Compensate for Climate Change in the Amazon Basin?, 2020). Los modelos hidrológicos sobre los cambios en la dinámica de inundación de la Amazonía desde 1980 muestran que la extensión máxima de inundación de la llanura aluvial central de la Amazonía ha aumentado en un 26%, o $\sim 25\,000$ km². El aumento estimado del 26% en la extensión máxima de inundación durante 1980-2020 es considerablemente mayor que las proyecciones de finales de siglo para la Amazonía peruana (+18%) (Fleischmann, Papa, Halminton, & al, 2023)

El comportamiento de los ecosistemas ante la extensión de las inundaciones requiere de estudios que comprueben las hipótesis sobre los efectos de la amplitud del área inundada y

los intercambios de agua, sedimentos, nutrientes, contaminantes y organismos entre el río y su llanura aluvial, que pudieran derivar en múltiples consecuencias para los ecosistemas de las llanuras aluviales y las personas que dependen de ellos.

Igualmente, es necesario conocer el comportamiento de los ecosistemas ante escenarios secuenciales de periodos de inundación y sequía extrema y el efecto de acumulación de agua por inundaciones previas a las sequías. Efectivamente, la interacción de los extremos húmedo-seco y la poca profundidad de la capa freática en los bosques amazónicos puede amortiguar los efectos negativos de las sequías, mejorando la resiliencia de los bosques al cambio climático (Esteban, Castilho, Melgaço, & al, 2021)

Las recientes sequías severas, las inundaciones extremas y las crecientes diferencias entre los caudales estacionales altos y bajos en el río Amazonas pueden representar un aumento durante el siglo XXI, en la amplitud del ciclo hidrológico en la cuenca del Amazonas. Estos cambios en las precipitaciones y los caudales pueden deberse a forzantes naturales como la variabilidad de los océanos y de la atmósfera, así como por forzantes inducidos, como la deforestación dentro de la cuenca de drenaje del río Amazonas o el cambio climático.

El aumento de las temperaturas atmosféricas en respuesta a las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero (GEI), también puede tener efectos negativos sobre la resiliencia de la Amazonia (y contribuir con el calentamiento de las temperaturas de la superficie del mar (SST) del Atlántico norte tropical). Además, el rápido cambio de clima está provocando cambios ecológicos que demandan tiempos de respuesta que los ecosistemas no pueden afrontar. En particular, la sustitución de especies de árboles sensibles a la sequía por otras resistentes está sucediendo más lentamente que cambios en las condiciones hidrometeorológicas, lo que podría reducir la resiliencia forestal (Gloor, M., Brien, Gabraith, & et al, 2013); (Bennett, Rodrigues de Sousa, Monteagudo-Mendoza, & et al, 2023)

Las reconstrucciones de los extremos de precipitación de la estación húmeda en los anillos de los árboles, corroboradas con relatos históricos del clima y los niveles de la red hidrográfica de la cuenca del Amazonas y en particular en el noreste de Brasil, indican que los recientes extremos del nivel de los ríos en la cuenca pueden haber sido igualados o posiblemente superados durante el siglo XIX (Granato - Souza & Stahle, 2023). Lo que determina incertidumbre respecto a la causa ya que estos cambios en las precipitaciones y los caudales fluviales pueden haber surgido de la variabilidad natural océano-atmosférica, la deforestación dentro de la cuenca de drenaje del río Amazonas o el cambio climático antropogénico.

La “*sequía olvidada*” de 1865 fue la precipitación total más baja de la temporada húmeda reconstruida con anillos de árboles en la Amazonia oriental desde 1790 hasta 2016 y la inundación completa de la “*Primera Calle*” en Santarém, Brasil, en 1859 y el desbordamiento del *Puente Bittencourt* en Manaus, Brasil, en 1892 son extremos basados en las estimaciones en anillos de árboles, aunados a observaciones históricas indican que las anomalías recientes de caudal alto y bajo en el río Amazonas pueden no haber excedido la variabilidad natural de la precipitación y el caudal durante el siglo XIX (Granato - Souza & Stahle, 2023)

Los mismos autores realizaron análisis climáticos mediante la utilización de cronologías obtenidas de anillos del tronco de *Cedrela odorata* reconstruyeron las precipitaciones de la estación húmeda en el este del Amazonas (febrero-noviembre; (Stahle, Barbosa, Granato-Souza, & et al, 2019); febrero-julio; (Granato-Souza, Stahle, Torbenson, & et al, 2020). Las reconstrucciones de precipitación exhiben fuerte variabilidad multidecadal muy poco aparente en los datos disponibles y en las relativamente breves observaciones instrumentales que se tienen del este de la cuenca.

Extremos secos y húmedos en las reconstrucciones de precipitación para esta zona este de la cuenca del Amazonas también ocurren con precipitaciones y extremos de crecimiento de árboles en las latitudes medias de América del Norte y del Sur, esto es parte de una interacción panamericana del clima y el crecimiento forestal que está en gran medida modulado por El Niño-Oscilación del Sur (Stahle, Torbenson, Howard, & et al, 2020).

El aumento del nivel del mar (Sea Level Rise, SLR por sus siglas en inglés) y el cambio climático son fuerzas importantes que impulsan la dinámica de los humedales costeros. En cuanto a sus características físicas, el SLR representa una barrera hidráulica con potencial para inundar zonas del plano costero que actualmente no están inundadas y que se encuentran principalmente dentro de la llanura aluvial adyacente a los cauces de los ríos.

Otros efectos del cambio climático sobre los ecosistemas costeros han sido reseñados por (Zitoun, Marcinek, Hatje, & et al, 2024) quienes señalan que los oligoelementos, tanto de fuentes naturales como antropogénicas, pueden contaminar las regiones costeras y, en altas concentraciones, pueden volverse tóxicos para la biota marina. Es probable que el cambio climático afecte las fuentes, los sumideros y el ciclo de los oligoelementos en los sistemas costeros: por ejemplo, se prevé que la escorrentía fluvial aumente a medida que se intensifiquen las precipitaciones y se espera que las inundaciones extremas más frecuentes activen oligoelementos que antes estaban enterrados profundamente.

La cuenca del Amazonas alberga importantes ecosistemas costeros que normalmente no son considerados dentro de los estudios de la cuenca. Entre estos ecosistemas, los manglares se extienden por las costas del Atlántico de Venezuela, Guyana, Surinam, la Guayana Francesa y Brasil. La costa de manglares macromareales³¹ del Amazonas contiene el cinturón de manglares más extenso y continuo del mundo, ocupando un área de ~6500 km² y representando el 4,2% de los manglares a escala global. Eventos climáticos extremos como El Niño y La Niña (componentes oceánicos del ENSO) han tenido poca incidencia sobre la degradación/regeneración de los manglares. Por el contrario, el aumento relativo del nivel del mar – uno de los impactos del calentamiento global- durante las últimas décadas provocó una recolonización de los bosques, expandiendo las áreas de manglar de las llanuras mareales más bajas a las más altas (Cardenas, Cohen, Ruiz, & et al, 2022).

Los bosques de manglares más altos y densos del Amazonas se encuentran en la península de Bragança (Brasil). Durante el periodo 1984-2017, los manglares invadieron 2,7 km² de marismas internas, en respuesta al aumento del nivel del mar y a la disminución de las

³¹ La amplitud de las mareas en un lugar determinado es la diferencia entre la altura de la pleamar y la bajamar y varía mucho en todo el mundo. Una macro marea es una marea que tiene un rango de más de 4 metros.

precipitaciones en la región. Esta dinámica dependiente de la topografía sugiere que una mayor frecuencia de inundaciones por mareas disminuyó la salinidad del agua intersticial y provocó que los manglares se expandieran hacia terrenos topográficamente más altos. (Cohen, Souza, Rossetti, & et al, 2018) proponen que el clima y el aumento del nivel del mar son responsables de impulsar la muerte de los manglares en el área de estudio y su migración hacia las llanuras de marea topográficamente más altas. Las implicaciones de un desplazamiento de las especies de mangle hacia tierra adentro impulsada por el aumento del nivel del mar repercuten en la composición de la propia comunidad de mangles, y también en la de comunidades de plantas terrestres que no podrán adaptarse a las nuevas condiciones de salinidad del sustrato³².

2.1.8 Impactos de alteración del equilibrio de carbono y la preservación de la biodiversidad.

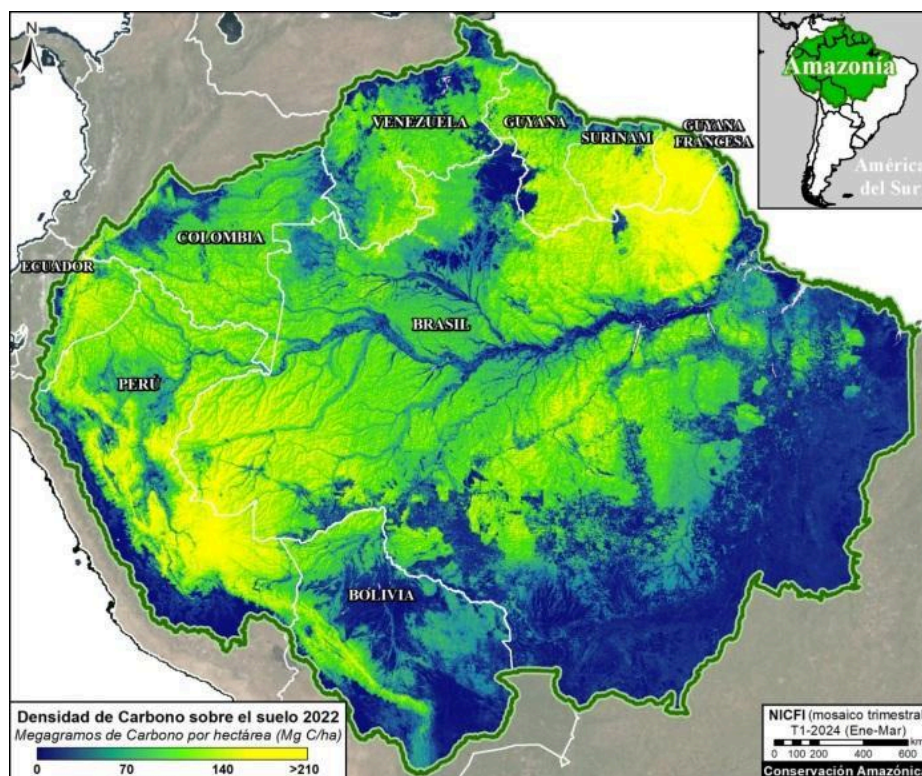
La cuenca del Amazonas almacena alrededor de 229 a 280 Pg C (petagramos de carbono) en biomasa viva y materia orgánica muerta en los suelos, de los cuales aproximadamente 108 (IC 95 %: 101 a 115) Pg C se encuentran en la superficie en árboles vivos. Como resultado, el bosque amazónico desempeña un papel clave en el ciclo global del carbono e incluso pequeñas perturbaciones pueden tener un impacto en el clima global, así como en el ciclo hidrológico de América del Sur. Se ha estimado que la contribución de los sumideros de carbono de los bosques primarios (bosques no afectados por las perturbaciones contemporáneas inducidas por el hombre) en la cuenca del Amazonas, está experimentando una disminución persistente, impulsada por un aumento en la mortalidad de los árboles, asociado con el cambio ambiental. Por lo tanto, el antiguo bosque amazónico puede seguir perdiendo su papel de mitigación del cambio climático al absorber menos carbono de la atmósfera en el futuro (Malhi , Wood, Baker, & et al, 2006) ; (Hubau, Lewis, Phillips, & et al, 2020); (Leite-Filho, Soares-Filho, Davis, & et al, 2021).

El Programa de Monitoreo de la Amazonia Andina³³ (Monitoring of Andes Amazon Program - MAAP, por sus siglas en inglés, (2024) estima que la Amazonía contenía 56.800 millones de toneladas métricas de carbono sobre el suelo en el 2022 (Figura 14). Aplicando una conversión estándar de la relación raíz/tallo (26%), este estimado aumenta a 71.500 millones de toneladas métricas de carbono sobre y bajo el suelo. Los niveles máximos de carbono se concentran principalmente en el suroeste de la Amazonía (sur de Perú y oeste de Brasil) y el noreste de la Amazonía (noreste de Brasil, Guayana Francesa y Surinam).

Figura 14. *Carbono forestal en todo el bioma amazónico*

³² IC: índice de confianza.

³³ Monitoring of Andes Amazon Program. URL: <https://www.maaprogram.org/es/>



Fuente: Extraído de:
<https://www.maaproject.org/es/maap-215-una-mirada-sin-precedentes-al-carbono-en-la-amazonia-parte-1/>

El Programa de Monitoreo de la Amazonia Andina (2024) reporta para los países de la cuenca del Amazonas, la cantidad de carbono sobre el suelo: 1) Brasil (57%; 32.100 millones de toneladas métricas), 2) Perú (15%; 8.300 millones de toneladas métricas), 3) Colombia (7%; 4.000 millones de toneladas métricas), 4) Venezuela (6%; 3.300 millones de toneladas métricas) y 5) Bolivia (6%; 3.200 millones de toneladas métricas). A estos países les siguen Guyana (3%; 2.000 millones de toneladas métricas), Surinam (3%; 1.600 millones de toneladas métricas), Ecuador (2%; 1.200 millones de toneladas métricas) y Guayana Francesa (2%; 1.100 millones de toneladas métricas). En conjunto, se ha documentado una ganancia total de 64,7 millones de toneladas métricas de carbono sobre el suelo en toda la Amazonía durante los diez años comprendidos entre el 2013 y 2022. Lo anterior indica que la Amazonía sigue funcionando como un sumidero de carbono crítico.

Los países con mayor aumento de carbono sobre el suelo para el periodo 2013-2022 son: 1) Brasil, 2) Colombia, 3) Surinam, 4) Guyana y 5) Guayana Francesa. Brasil se muestra como sumidero de carbono (ganancia de 102,8 millones de toneladas métricas), a pesar de que otros estudios recientes lo muestran como fuente de carbono. Hay importantes ganancias de carbono en la superficie de varios países clave con *Alta Cobertura Forestal y Baja Deforestación* (HFLD, por sus siglas en inglés): Colombia, Surinam, Guyana y la Guayana Francesa. Los países con mayor pérdida son: 1) Bolivia, 2) Venezuela, 3) Perú y 4) Ecuador.

La Amazonía es una fuente menor de carbono debido a las emisiones de los incendios, ya que la absorción de carbono de los bosques compensa aproximadamente la mitad de estas emisiones, pero no hay una tendencia clara en la absorción de carbono entre 2010 y 2018 (Basso, Wilson, Chipperfield, & et al, 2023). Limitar la perturbación forestal puede ayudar a mantener las reservas de carbono y aumentar la resiliencia en los bosques amazónicos, reduciendo la mortalidad de las plantas y las emisiones de carbono causadas por las sequías e incendios extremos asociados al evento El Niño (Berenguer, Lennox, Ferreira, & et al, 2021). Sin embargo, no está claro cómo podrían alterarse las reservas de carbono de los bosques tropicales en respuesta a los cambios en el clima y la composición atmosférica. Por ello, conocer la posible pérdida futura de carbono de los bosques tropicales es importante para evaluar la eficacia de los programas de mitigación que reduzcan las emisiones derivadas de la deforestación y la degradación (Huntingford, Zelazowski, Galbraith, & et al , 2012).

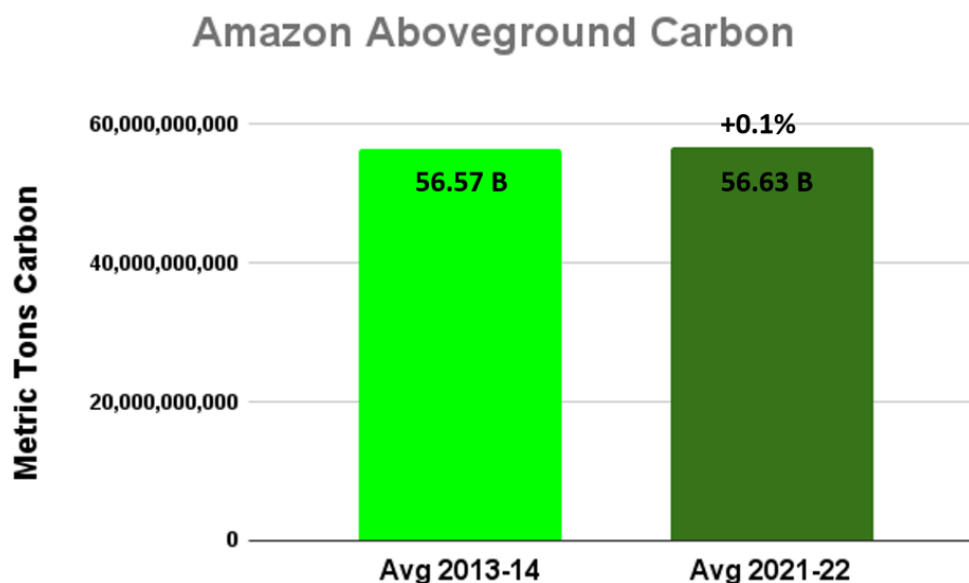
(Papastefanou , Zang, , Angelov, & et al, 2022) evaluaron la severidad y extensión espacial de los años de sequía extrema 2005, 2010 y 2015/16 en la región amazónica y sus impactos en el ciclo regional del carbono; como indicador de sequía, se utilizó el *Déficit Hídrico Acumulativo Máximo* (MCWD, por sus siglas en inglés). En 2010, la superficie afectada era aproximadamente un 16 % mayor, oscilando entre 3,0 y 4,4 (media = 3,6) $\times 10^6$ Km² (51 %–74 %, media = 61 %). En 2016, la superficie media afectada por estrés por sequía fue entre 2005 y 2010 (media=3.2 $\times 10^6$ Km²; 55 % de la cuenca del Amazonas), pero entre los conjuntos de datos la diferencia fue mayor, oscilando entre 2,4 y 4.1 $\times 10^6$ Km² (40 %–69 %). La detección de la gravedad y del alcance espacial de las sequías extremas en la selva amazónica varía mucho en función del indicador de sequía, el conjunto de datos de precipitación y el conjunto de datos de evapotranspiración utilizados, siendo el impacto más significativo la elección del conjunto de datos de precipitación.

La Amazonia pierde carbono a la atmósfera debido a la deforestación, la tala selectiva, los incendios provocados por el hombre o las perturbaciones naturales, mientras que gana carbono a través de la regeneración de la vegetación y de los bosques antiguos que secuestran carbono de la atmósfera.

En general, los datos sugieren que la Amazonia aún funciona como un sumidero de carbono, pero su contribución debería ser mucho mayor porcentualmente. La tasa actual de deforestación ha anulado significativamente su capacidad de absorción, incluso algunos estudios indican que ha dejado de funcionar como sumidero y se ha transformado en emisor. Lo que se traduce en un riesgo elevado de alcanzar el límite de captura del carbono emitido. La National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA, por sus siglas en inglés), (National Oceanic and Atmospheric Administration, 2021) remite a las investigaciones de (Gatti L. , Basso, Miller, & al, 2021) para señalar que *los nuevos resultados de un proyecto de investigación de nueve años en la selva amazónica oriental encuentran que la deforestación significativa en el este y sureste de Brasil se ha asociado con una disminución a largo plazo de las precipitaciones y un aumento de la temperatura durante la estación seca, convirtiendo lo que alguna vez fue un bosque que absorbía dióxido de carbono en una fuente de emisiones de dióxido de carbono que calientan el planeta.*

En la Figura 15 se muestra el valor promedio de carbono sobre el suelo para el periodo 2013-2015 (en billones de Ton M de C), con una ganancia porcentual de 0,1% que representa 64.7 millones de Ton M adicionales de carbono sobre el suelo durante el período 2013-2022 (Amazon Conservation , 2024) (Monitoring of Andes Amazon Program (MAAP), 2024)³⁴

Figura 15. *El bioma amazónico como un sumidero de carbono durante el periodo 2013-2022*



Nota: (Monitoring of Andes Amazon Program (MAAP), 2024).

Destaca el informe de MAAP (2024), que la ganancia es bastante pequeña en relación con el carbono total sobre el suelo contenido en toda la Amazonía, acentuando las preocupaciones de que se esté alcanzando un estado límite de absorción y se convierta en una fuente de carbono debido a la creciente deforestación, degradación e incendios. Por ello, la importancia, tanto de los bosques primarios y secundarios para contrarrestar la deforestación, como del potencial crítico de los bosques primarios – no perturbados- para continuar acumulando carbono.

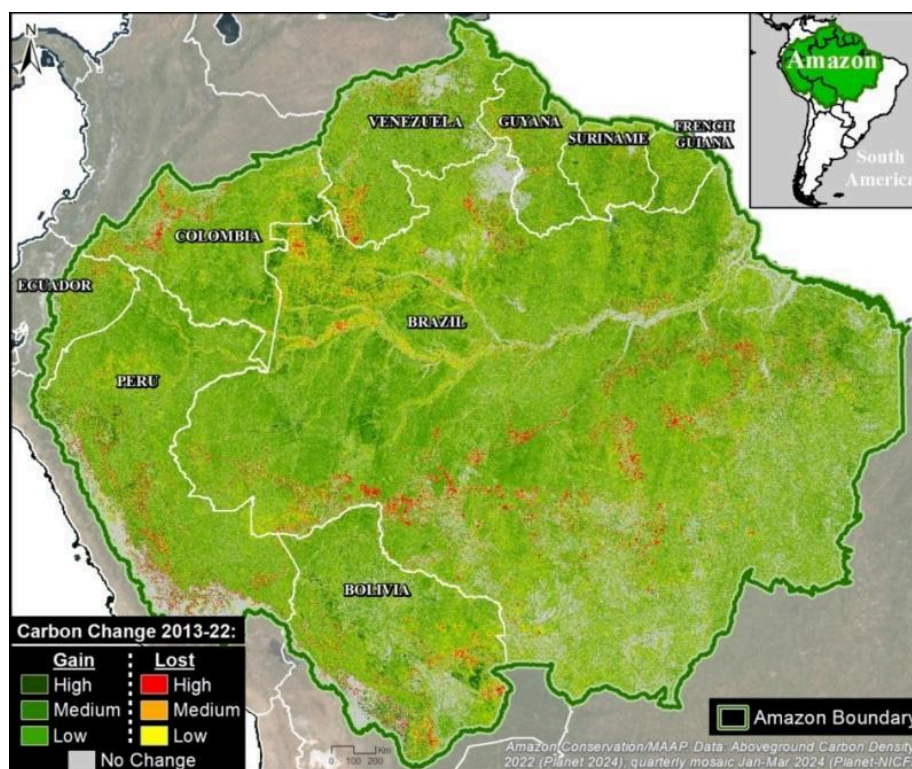
En la Figura 16 se muestra un mapa de la cuenca indicando las áreas con ganancia de carbono en áreas intactas (áreas con gran potencial para incorporarse en la iniciativa de *Bosques de Alta Integridad* (HIFOR)³⁵, un nuevo instrumento financiero enfocado exclusivamente en mantener bosques tropicales intactos. Las áreas intactas con ganancia de carbono entre 2013 y 2022 pueden indicar áreas “bien conservadas”, que pueden superponerse con áreas de alta integridad ecológica.

³⁴

<https://www.amazonconservation.org/new-maap-report-covers-key-cases-of-carbon-loss-gain-in-the-amazon/>

³⁵ Una unidad HIFOR representa una hectárea de bosque tropical de alta integridad dentro de un paisaje de alta integridad que ha estado “bien conservado” durante más de una década.

Figura 16. Áreas de mayor ganancia y pérdida de carbono en la cuenca del Amazonas, durante el período 2013-2022



Nota: (Monitoring of Andes Amazon Program (MAAP) , 2024) Amazon Conservation/MAAP.Planet (2024).

En el estudio de (Rosan, Sitch, Mercado, & et al, 2022), se sugiere que durante el período 2010-2020, la Amazonia se mantuvo como un pequeño sumidero de carbono, en contraste con una simulación como una pequeña fuente de carbono para el período 2010-2018. Las estimaciones no difieren significativamente entre sí cuando se tienen en cuenta sus grandes incertidumbres individuales, lo que pone de relieve las lagunas de conocimiento que aún persisten y la necesidad urgente de reducir las consecuentes incertidumbres. Ambas metodologías coincidieron en que la Amazonia brasilera ha sido una fuente neta de carbono durante los extremos climáticos recientes y que la Amazonia sureste fue una fuente neta de carbono terrestre durante todo el período de estudio (2010-2020). En general, los resultados indican un aumento de las perturbaciones inducidas por el hombre (deforestación y degradación forestal por incendios forestales) y una reducción del sumidero de bosques primarios durante la sequía.

Los hallazgos presentados indican que proteger a los ecosistemas que están bien conservados beneficia directamente a la biodiversidad de la cuenca, lo que, a la vez, aumenta la resiliencia del ecosistema amazónico. Una mayor resiliencia repercute en una mejor capacidad adaptativa contra los efectos de los extremos de la propia variabilidad climática y de los efectos del cambio climático –incluyendo también sus eventos extremos– y aún mejor, contra los factores no climáticos como la expansión de la frontera agrícola, la minería, la contaminación de suelos y aguas y el conjunto de actividades ilícitas que

amenazan a zonas importantes de la cuenca en la gran mayoría de los países que comparten este vasto y estratégico territorio.

2.2 IMPACTOS SOBRE EL SISTEMA HÍDRICO

2.2.1 Impactos sobre la precipitación.

El cambio climático está alterando significativamente los patrones de precipitación en la cuenca del Amazonas, con variaciones tanto en la cantidad como en la distribución estacional de las lluvias.

Los principales impactos identificados incluyen:

2.2.1.1 Reducción general de las precipitaciones.

En escenarios de mayor deforestación y emisiones continuas (RCP8.5), las precipitaciones anuales podrían disminuir hasta un $12 \pm 11\%$ en promedio para el año 2100 (Spracklen & Garia-Carreras, 2015). En el oeste del Amazonas, la precipitación muestra reducciones de hasta un 7.9%, mientras que en el este podría aumentar en un 8.3%, creando un patrón dipolar (Llopart M. , Reboita, Coppola, & et al, 2018).

2.2.1.2 Aumento de los extremos de precipitación.

Se proyecta un incremento del área afectada por sequías severas y moderadas en el Amazonas oriental, que podría duplicarse y triplicarse, respectivamente, para el año 2100 (Duffy, Brando, Asner, & et al, 2015). (Wang, Li, Zhu, & et al, 2018) usando observaciones satelitales in situ, apreciaron que las precipitaciones amazónicas tropicales han aumentado significativamente en ~180 a 600 mm (en diferentes conjuntos de datos) en la estación húmeda durante el periodo satelital de 1979 a 2015. Posteriormente simularon el impacto de las temperaturas superficiales del mar tropical (TSM) en los cambios de precipitación. Los resultados mostraron que el calentamiento multidecenal del Atlántico tropical ha contribuido con más de la mitad de este cambio de precipitación en las últimas tres décadas, mientras que el enfriamiento del Pacífico oriental jugó un papel secundario. De este modo se pudo demostrar que la variabilidad de la temperatura superficial del mar aumenta drásticamente la convergencia del transporte de humedad en la región amazónica. Los cambios en las precipitaciones en la región amazónica afectan en gran medida al ciclo hidrológico local y al ecosistema, y tienen importantes efectos en el sistema climático global.

Una consecuencia de los eventos extremos como las sequías de 2005 y 2010 es la reducción significativa de la capacidad de los bosques amazónicos para absorber carbono, resultando en emisiones netas de 1.2 a 1.6 petagramos de carbono (Doughty, Metcalfe, Girardin, & et al, 2015).

2.2.1.3 Alteración de los patrones estacionales de escurrimiento.

(Guimbertau, Ronchail, Espinoza, & et al, 2013) investigaron las variaciones hidrológicas extremas anuales (es decir, caudales bajos/altos) asociadas con cambios en la precipitación

(y evapotranspiración) en las subcuencas del río Amazonas. Se utilizaron escenarios asociados a ocho modelos climáticos globales del AR4 basados en tres escenarios de emisiones para construir proyecciones hidrológicas futuras en la región, para dos períodos del siglo XXI. Para 2050, no se encontraron cambios en el caudal alto en el cauce principal del río Amazonas; pero, la simulación mostró una disminución sistemática del caudal durante el período de recesión, lo que lleva a una disminución del 10% del caudal bajo. En la parte superior occidental de la cuenca, que sufre un aumento anual persistente de las precipitaciones, el caudal alto muestra un aumento relativo del 7% para mediados del siglo XXI y la señal se potencia para finales del siglo (12%). Por el contrario, las disminuciones simuladas de las precipitaciones durante las estaciones secas en las partes sur, este y norte de la cuenca conducen a una disminución significativa del caudal, especialmente en el río Xingú, donde alcanza -50%, asociado a una reducción del 9% en el coeficiente de escorrentía. También se encuentra una disminución del 18% del caudal alto en este río. En el norte, la disminución del caudal bajo se hace mayor hacia el este: una disminución significativa del 55% en el este del río Branco se asocia a una reducción del 13% en el coeficiente de escorrentía. Estas proyecciones plantean cuestiones importantes para las poblaciones que viven cerca de los ríos cuya actividad está regulada por el actual ciclo anual de las aguas.

(Sorribas, Paiva, Melack, & et al, 2016) conscientes de que el cambio climático y sus efectos en el régimen hidrológico de la cuenca amazónica pueden afectar los procesos biogeoquímicos, el transporte, la vulnerabilidad a las inundaciones, la pesca y la generación de energía hidroeléctrica, investigaron las variaciones del régimen de caudales bajo diferentes escenarios de cambio climático. Los resultados indican que el aumento de la descarga media y máxima de los ríos grandes que drenan los Andes en el noroeste contribuye al aumento de la descarga media y máxima y la extensión de la inundación en las llanuras de inundación peruanas y el río Solimões (media-máxima anual: +9 % - +18,3 %) en la Amazonía occidental. De los escenarios y simulaciones se obtuvieron disminuciones en las descargas de los ríos (principalmente en la estación seca) en las cuencas orientales, y una menor extensión de las inundaciones en aguas bajas (mínimo anual) en la Amazonia central (-15,9 %) y la baja Amazonia (-4,4 %).

2.2.1.4 Impactos diferenciados sobre las cuencas y subcuencas situadas al este y al oeste y al norte y sur de la cuenca amazónica.

(Haghtalab, Moore, Heerspink, & et al, 2020) se propusieron comprender cómo están cambiando los patrones y la intensidad de las precipitaciones en la cuenca amazónica. Como resultado de su investigación observaron que, en las regiones oriental y meridional, donde la deforestación está muy extendida, existe una importante tendencia a la sequía. Además, también se observaron alteraciones locales en los patrones de precipitación. Por ejemplo, en la región de Tocantins se ha producido un aumento significativo de la cantidad de días secos durante las estaciones húmedas y secas. La Figura 17 facilita comprender la localización de los impactos geográficamente diferenciados

Figura 17. Cuenca y Subcuencas del río Amazonas

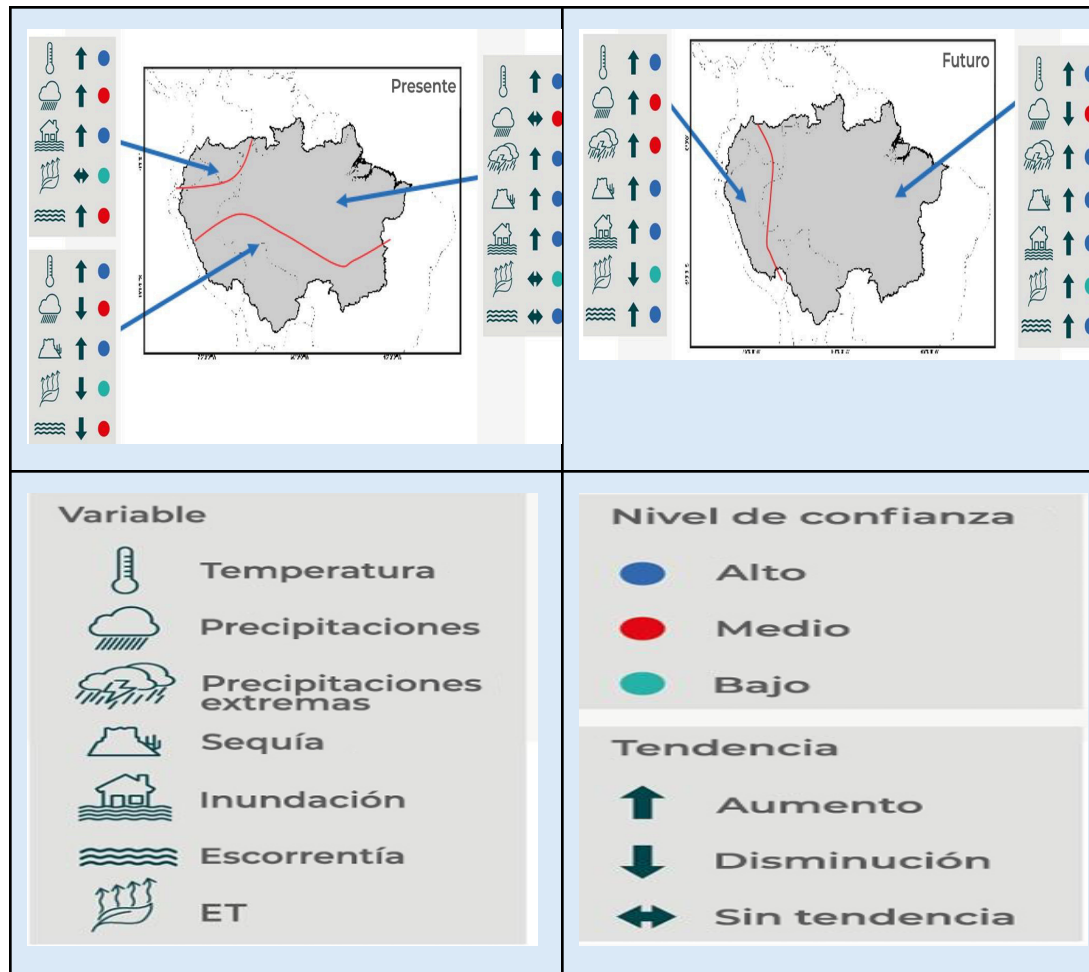


Nota: La ubicación de las principales subcuencas de la cuenca del río Amazonas facilita la comprensión de las referencias de los investigadores a los puntos cardinales. Imagen obtenida de La Alianza. Aguas Amazónicas. [https://aguasamazonicas.org/?attachment_id=5109]

Las temperaturas de la superficie del Atlántico tropical están asociadas con un aumento en las precipitaciones en el norte y centro del Amazonas, mientras que el Pacífico tropical afecta negativamente las lluvias en el este (Yoon & Zeng., 2010).

La Figura 18 permite apreciar los cambios en el clima, geográficamente localizados tal como los sistematizaron (Marengo, Espinosa, Fu, & et al, 2021) a partir de la revisión de diversos estudios y modelos de simulación de cambios en el clima y la hidrología amazónica.

Figura 18. Resumen de los cambios climáticos observados y proyectados en la Amazonía.



Fuente: (Marengo, Espinosa, Fu, & et al, 2021).

Figura 18. Representación de efectos del cambio climático en los patrones de precipitación en la cuenca del Amazonas. Se muestra cómo se han intensificado los extremos hídricos, afectando la estacionalidad de las lluvias y diferenciando los impactos en las diversas subcuencas y regiones geográficas. Estas transformaciones tienen implicaciones críticas para los ecosistemas y comunidades dependientes del régimen hídrico.

2.2.2 Impactos sobre el régimen de evapotranspiración y temperatura.

La evapotranspiración (ETP) en la cuenca del Amazonas es un componente crítico del balance hídrico y climático, ya que regula el intercambio de agua entre la superficie y la atmósfera, influye en los patrones de precipitación y conecta los ciclos de carbono, agua y energía. El conocimiento de su régimen actual y los cambios posible a futuro constituyen un elemento clave para los modelos hidrológicos. Los impactos del cambio climático en este proceso clave incluyen:

2.2.2.1 Cambios en los patrones espaciales y temporales.

- *Variabilidad estacional*: La ETP presenta máximos durante la estación seca debido a mayores niveles de radiación solar, alcanzando valores de hasta 10-15 cm/mes en subcuencas como Madeira y Tapajós (Sun, Baker, Gloor, & et al , 2019).
- *Tendencias a largo plazo*: En el periodo 2002-2015, se identificó una disminución estadísticamente significativa de 1.46 mm/año en la ETP media de la cuenca (Swann & Koven, 2017).

2.2.2.2 Impactos de la fragmentación del bosque y las sequías.

- *Fragmentación forestal*: En paisajes fragmentados, la ETP disminuye hasta un 32% durante eventos de sequía extrema como el de 2010, con reducciones más significativas en áreas cercanas a bordes de bosque (Numata, Khand, Kjaersgaard, & et al , 2021).
- *Resiliencia durante sequías*: La capacidad de raíces profundas permite que los bosques bien establecidos mantengan la ETP durante la estación seca, mitigando parcialmente el estrés hídrico (Harper, Baker, Denning, & et al , 2014).

2.2.2.3 Interacción con la deforestación.

- *Reducción de la ETP en ecosistemas agrícolas*: Las tasas de ETP en tierras agrícolas (pastizales y soja) son un 39% más bajas en comparación con ecosistemas naturales (bosques tropicales y cerrado), lo que afecta el reciclaje de humedad y el equilibrio hídrico (Dias, Macedo, Costa, & et al , 2015).

Respecto al comportamiento a futuro se ha observado que su desempeño entre modelos climáticos y observación de datos observados y registrados presenta:

2.2.2.4 Inconsistencias entre modelos.

(Baker, Garcia-Carreras, Gloor, & et al , 2021) realizaron estudios con fines comparativos entre estimaciones de ETP mediante modelos de balance hídrico, mediciones sobre el terreno usando torres de flujo³⁶ y datos satelitales encontrado que

³⁶ Las torres de flujo son equipos que permiten estimar el balance de carbono a partir de la medición de la tasa fotosintética mediante un Analizador de Gases Infrarrojo (IRGA) e instrumentos meteorológicos instalados en una torre metálica, los demás instrumentos incluyen un anemómetro, radiómetro, pluviómetro, sensor de

los modelos climáticos y de reanálisis (CMIP5/CMIP6) tienden a sobreestimar la ETP en la Amazonia en comparación con los cálculos basados en balance hídrico, con diferencias de hasta un 20%

2.2.2.5 Datos satelitales.

(Paca, Espinoza-Dávalos, Hessels, & et al, 2019) obtuvieron la distribución espacial de la ET, utilizando técnicas de teledetección, en toda la cuenca del río Amazonas. Los resultados de seis productos globales de ET basados en técnicas de teledetección (GLEAM, SEBS, ALEXI, CMRSET, MOD16 y SSEBop) se fusionaron para obtener una predicción de conjunto de las tasas de ET para el entorno complejo e inaccesible de la Amazonia con una resolución espacial de 250 m. La correlación entre la ET medida y la detectada mediante sensores remotos es buena ($R^2 > 0,97$ para períodos consecutivos de 2 a 12 meses). Los valores mensuales de ET tienen más incertidumbre. El coeficiente de determinación (R^2) varía entre 0,48 y 0,87 (el R^2 promedio es 0,53). Los productos de teledetección, como GLEAM, muestran patrones estacionales de ETP consistentes con mediciones en torres de flujo, aunque tienden a subestimar los valores máximos en estaciones húmedas.

En conclusión, las evidencias aportadas por la Revisión Sistemática de Literatura indican que el cambio climático y las actividades humanas están afectando significativamente la evapotranspiración en la cuenca del Amazonas. Las tendencias incluyen una mayor variabilidad estacional, disminuciones a largo plazo en las tasas de ETP y una resiliencia diferencial dependiendo del uso del suelo y la fragmentación del bosque.

La temperatura en la cuenca del Amazonas está aumentando, intensificando los desafíos ecológicos y socioeconómicos de la región. A continuación, se describen los principales impactos identificados:

2.2.2.6 Incrementos proyectados de temperatura y sus efectos.

Las tendencias anuales para el período 1982-2015 sugieren aumentos significativos de temperatura de 0,2 a 0,3 °C/década, generalmente distribuidos en la Amazonia. Las proyecciones indican aumentos promedio para la Amazonia de 4 a 6,5 °C (SSP5-8,5), 2,2 a 3,5 °C (SSP2-4,5) y 1,3 a 2,2 °C (SSP1-2,6). El sudeste de la Amazonia es la zona más vulnerable, con temperaturas en aumento, precipitaciones en descenso y una fuerte deforestación, (Carvalho, Oliveira, Pedersen, & et al, A changing Amazon rainforest: Historical trends and future projections under post-Paris climate scenarios.).

(Sampaio, Borma, Cardoso, & et al, 2018) evaluaron las perspectivas futuras para la Amazonía en un escenario de calentamiento de 4 °C o más, como resultado del cambio climático y los cambios relacionados en el ciclo hidrológico. Con base en modelos hidrológicos, se espera generalmente una reducción en las descargas de los ríos asociada a la disminución de las precipitaciones y el aumento de la temperatura provocados por el

humedad relativa y de temperatura del aire, lo que permite la medición de las tasas de evapotranspiración y otras variables. Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia

cambio climático proyectado, pero con una magnitud de los cambios que difiere entre los modelos. Los escenarios futuros de cambio climático implican cambios importantes en la distribución de los biomas en la Amazonia, con una posible expansión de la sabana y la caatinga³⁷ en grandes áreas actualmente ocupadas por bosques tropicales.

2.2.2.7 Relación con el cambio en el uso del suelo.

La deforestación amplifica el calentamiento regional, aumentando las temperaturas locales hasta en 2 °C en áreas con alta pérdida de cobertura forestal (Llopart M. , Reboita, Coppola, & et al, 2018). El reemplazo de bosques por pastizales reduce la capacidad de regulación térmica y acelera el ciclo de retroalimentación positiva del cambio climático (Wu, Schurgers, Ahlström, & et al, 2017).

2.2.2.8 Aumento del estrés por calor.

El índice de estrés por calor podría exceder el límite de adaptación humana para el año 2100 en escenarios de emisiones elevadas, afectando a más de 11 millones de personas en la Amazonia brasileña (Oliveira, Bottino, Nobre, & et al, Deforestation and climate change are projected to increase heat stress risk in the Brazilian Amazon., 2021). Las altas temperaturas combinadas con menores precipitaciones incrementan la vulnerabilidad humana y ecosistémica.

2.2.2.9 Alteraciones en los procesos ecológicos.

El aumento de la temperatura reduce la capacidad de captura de carbono de los bosques, disminuyendo la productividad primaria neta (NPP) en un 30% en áreas gravemente afectadas por el calentamiento.

La respuesta neta de la temporada húmeda evita que los déficits de humedad del suelo de la temporada seca se recarguen durante la temporada madura de monzón sudamericano (SAM), lo que conduce a una reducción perenne de la humedad del suelo y una reducción asociada del 30% en la productividad primaria neta (PPN) anual de la cuenca del Amazonas. Se produce una reducción adicional del 23% de la PPN en respuesta a una temperatura del aire 3,5 °C más cálida asociada con un calentamiento global de la temperatura superficial del mar (TSM) media. (Harris et al., 2008).

(Phillips, Aragão, Lewis, & et al, 2009) utilizaron registros de múltiples parcelas de monitoreo a largo plazo en toda la Amazonia para evaluar las respuestas de los bosques a la intensa sequía de 2005, un posible análogo de eventos futuros. Los bosques afectados perdieron biomasa, revirtiendo su condición de sumidero de carbono. Los mayores impactos se observaron donde la estación seca fue inusualmente intensa. En relación con las condiciones anteriores a 2005, los bosques sometidos a un aumento de 100 milímetros en el déficit hídrico perdieron 5,3 toneladas de biomasa de carbono sobre el suelo por hectárea. Por lo tanto, se infiere que los bosques amazónicos son vulnerables al aumento

³⁷ Durante muchos la *Caatinga* se ha caracterizado como un bioma con formaciones vegetales xerófilas, con baja diversidad biológica y estructural. Las investigaciones más recientes están demostrando que el bioma tiene una gran diversidad y núcleos de vegetación con bosques mesófilos y tropófilos bien preservados, que incluyen un número significativo de especies y endemismo. (Lima V. R., 2012)

del estrés hídrico. La mortalidad de árboles aumenta exponencialmente durante períodos de calor extremo y sequía, incrementando la pérdida de biodiversidad (Phillips et al., 2009).

En resumen, el cambio climático está provocando aumentos significativos de temperatura en la cuenca del Amazonas, con impactos graves en la salud humana, los ecosistemas y la capacidad de mitigación climática de la región. La interacción entre la deforestación y el calentamiento potencia estos efectos.

2.2.3 Impactos sobre el régimen de infiltración, aguas freáticas y aguas subterráneas.

El cambio climático afecta significativamente el ciclo hidrológico de la cuenca del Amazonas, influyendo en procesos clave como la infiltración, las aguas subterráneas y superficiales, y las dinámicas de almacenamiento hídrico. A continuación, se detallan los principales impactos, identificados en la RSL realizada:

2.2.3.1 Infiltración y aguas subterráneas.

- *Reducción en la Infiltración:* Al tratar sobre los impactos a la biodiversidad se consideraron los cambios en régimen de anegamiento de las planicies de inundación y en los procesos de infiltración y percolación profunda, que rigen los contenidos de humedad de suelo y el flujo retardado garantía del caudal de estiaje y cómo sus modificaciones afectan a los ecosistemas terrestres y acuáticos. En esta sección se tratan las alteraciones en el régimen de distribución del agua de lluvia debido a los cambios de uso de la tierra.

(Chaves, Neill, Germer, & et al, 2008) ante la proposición de que la tala de bosques y su conversión en pastizales para ganado en la región de las tierras bajas de la Amazonia puede incrementar la proporción de agua escurrida y disminuir la proporción de agua infiltrada debido a la compactación del suelo, investigaron la cuantía del flujo superficial rápido en respuesta al cambio de uso de la tierra. Para ello identificaron las pequeñas cuencas cuya agregación contribuye al flujo fluvial y midieron el rendimiento hídrico de las precipitaciones en cada una de ellas. Durante toda la temporada de lluvias, en el bosque el escurrimiento superficial, el agua subterránea y el agua superficial del suelo aportaron el 57%, el 24% y el 19%, respectivamente, del caudal del río. En la cuenca hidrográfica de los pastizales, el escurrimiento superficial dominó la constitución del caudal del río tanto a principios (67%) como a finales de la temporada de lluvias (57%), con una contribución media del 60% del escurrimiento superficial, el 35% del agua subterránea y el 5% del agua del suelo. Es importante hacer notar el mayor escurrimiento superficial en el área de pastizal y la mayor retención de agua en el suelo y por tanto mayor contribución al caudal fluvial por los escurrimientos laterales de agua edáfica en el área de bosque. Estos resultados permitieron sugerir a (Chaves, Neill, Germer, & et al, 2008) que: existe un gran potencial de alteración de los balances hidrológicos de cuencas hidrográficas a medida que aumenta la proporción de tierras deforestadas en la Amazonia, y que a medida que se desvía más lluvia en trayectorias de flujo rápido hacia arroyos en pastizales establecidos, aumenta el potencial de entregar agua con mayores concentraciones de solutos generadas por la erosión alterando la

calidad del agua superficial. En consecuencia, se puede reconocer que la conversión de bosques a tierras agrícolas en la Amazonia reduce la capacidad de infiltración aumentando la escorrentía superficial rápida y disminuyendo la recarga de acuíferos.

- *Almacenamiento subterráneo*: La variabilidad espaciotemporal del almacenamiento de agua subterránea en la cuenca del río Amazonas muestra una fuerte variabilidad interanual, influyendo considerablemente en eventos hidrológicos, como la sequía extrema que ocurrió en 2005. El almacenamiento de agua subterránea en la cuenca del río Amazonas representa entre el 20% y el 35% de las variaciones estacionales del volumen, con una fuerte variabilidad interanual debido a la variabilidad hidrológica y a eventos climáticos como sequías extremas. Los cambios en el uso del suelo y las alteraciones climáticas han causado variaciones en el almacenamiento de aguas subterráneas de hasta 450 mm en los acuíferos centrales de la Amazonia, especialmente en el Alter do Chão (Frappart, Papa, Güntner, & et al, 2019).

(Bagheri, Pokhrel, Moore, & al, 2024) determinaron que la relación entre la ET máx. y el caudal de los ríos es el indicador clave para prevenir la transformación de bosques en sabanas. Asimismo, encontraron que los procesos eco hidrológicos que dependen del agua subsuperficial son más sensibles al cambio climático y factores antrópicos que de las aguas subterráneas profundas. Los cambios en el almacenamiento de agua subterránea (subsuperficiales) en la cuenca del río Amazonas (ARB) juegan un papel importante en el comportamiento hidrológico de la región, con una influencia significativa en la variabilidad climática y los ecosistemas de la selva tropical.

(Satizábal-Alarcón, Suhogusoff, & Ferrari, 2024) estimaron la variabilidad espaciotemporal de las anomalías de almacenamiento de agua terrestre y subterránea en la cuenca amazónica entre 2002 y 2021 e identificaron patrones espaciales asociados a la fuerte influencia en los cambios de almacenamiento de algunos ríos y nevados. La validación de la serie temporal de anomalías de aguas subterráneas con los niveles de agua en los pozos de monitoreo obtuvo coeficientes de correlación máximos de 0,85 con niveles de confianza de 0,01. Estos resultados son prometedores para la información satelital en la gestión del agua, especialmente en el monitoreo regional de acuíferos libres.

2.2.4 Impactos sobre el régimen de escorrentía y aguas superficiales.

2.2.4.1 Disminución del Caudal.

Se proyecta una reducción del 27% en los caudales del río Purus hacia finales del siglo debido a una disminución del 11% en las precipitaciones y un aumento de 4.4 °C en la temperatura (Dalagnol, Borma, Mateus, & et al, Assessment of climate change impacts on water resources of the Purus Basin in the southwestern Amazon, 2017).

2.2.4.2 Incremento en el riesgo de inundaciones.

(Sorribas, Paiva, Melack, & et al, 2016) determinaron un aumento de la descarga media y máxima de los ríos grandes que drenan los Andes en el noroeste que a su vez contribuye

al aumento de la descarga media y máxima y la extensión de la inundación en las llanuras de inundación peruanas y el río Solimões (media-máxima anual: +9 % - +18,3 %) en la Amazonía occidental. De igual modo prevén disminuciones en las descargas de los ríos (principalmente en la estación seca) en las cuencas orientales, y una menor extensión de las inundaciones en aguas bajas (mínimo anual) en la Amazonia central (-15,9 %) y la baja Amazonia (-4,4 %). En el Amazonas occidental, el caudal máximo podría incrementarse hasta un 18.3%, aumentando el riesgo de inundaciones extremas.

2.2.4.3 Almacenamiento hídrico.

- *Variaciones en el almacenamiento total:* (Chaudhari, Pokhrel, Moran, & et al, 2019) mostraron que las reservas hídricas terrestres (TWS, por sus siglas en inglés)³⁸ evidencian una tendencia al aumento en el Amazonas central, pero con una disminución significativa en las subcuencas del sur y sureste debido a la deforestación. Las tendencias a largo plazo en TWS sugieren que la Amazonía en general se está volviendo más húmeda (1,13 mm /año), pero sus subcuencas sur y sureste están experimentando cambios negativos significativos en TWS, causados principalmente por cambios intensificados en el uso del suelo y cobertura vegetal.

El almacenamiento subsuperficial regula la transformación de sequías meteorológicas en sequías hidrológicas al modular la liberación de TWS con respecto a su almacenamiento anterior a la condición de sequía.

Las simulaciones brindan información crucial sobre la importancia del almacenamiento subterráneo para aliviar el déficit hídrico superficial en toda la Amazonia y abren caminos para mejorar la predicción y mitigación de sequías extremas en condiciones climáticas cambiantes y alteraciones hidrológicas crecientes debido a actividades humanas.

- *Contribución del almacenamiento subterráneo:* Los acuíferos representan entre 20% y 35% de las variaciones estacionales del almacenamiento hídrico terrestre, siendo críticos durante las estaciones secas (Frappart, Papa, Güntner, & et al, 2019).

2.2.4.4 Retroalimentación con el cambio en el uso del suelo.

La conversión de bosques para uso agrícola en el sur de la Amazonia brasileña ha impactado significativamente la escorrentía superficial y los aportes de aguas subterráneas, afectando las estrategias de recursos hídricos. La deforestación ha reducido las contribuciones de las aguas subsuperficiales al caudal en un 5.29%, mientras que el flujo superficial ha aumentado un 30.8% en áreas del sur amazónico (Lopes, Zolin, Mingoti, & et al, 2021)

³⁸ Las reservas hídricas terrestres comprenden la totalidad del agua presente en cuenca, bien sea en ríos, lagos, glaciares, aguas subsuperficiales y aguas subterráneas.

2.2.4.5 Los niveles de los ríos.

El cambio climático, combinado con una alteración en el uso del suelo, está perturbando profundamente el ciclo hidrológico de la cuenca del Amazonas. La reducción en la infiltración, a consecuencia de la compactación de los suelos y subsecuente aumento de escorrentía superficial rápida por el cambio en la cobertura del suelo está generando alteraciones en el almacenamiento subterráneo (subsuperficial y profundo), consecuentemente aumentan las inundaciones durante el período de lluvias y ocurren caudales menores y asociados a ellos niveles bajos en la época seca.

Los niveles de los ríos son cruciales porque ellos son la principal fuente de transporte en la región amazónica. Debido a la densa vegetación y la falta de infraestructura vial, los ríos se convierten en las *carreteras* naturales que conectan las comunidades y soportan el intercambio económico. La navegación fluvial permite el acceso a zonas remotas, facilitando el comercio, el transporte de productos agrícolas, madereros y minerales (comercio en general), y es el vínculo a servicios básicos como salud, educación y agua potable. Sin posibilidad de navegación por los ríos, muchas comunidades amazónicas quedarían aisladas y carentes de servicios básicos por lo que es un elemento clave en términos de costos de inacción.

2.2.5 Impactos sobre la relación suelo – agua – planta.

El cambio climático afecta de manera integral la relación entre el suelo, el agua y las plantas en la cuenca del Amazonas, con implicaciones directas en el ciclo hidrológico, la dinámica de nutrientes y la resiliencia de los ecosistemas.

2.2.5.1 Disponibilidad de agua.

La absorción de agua por las raíces profundas en los bosques tropicales amazónicos ha sido un importante descubrimiento durante los últimos 15 años. Sin embargo, los efectos de las sequías prolongadas, que pueden aumentar con el cambio climático, sobre la utilización de la humedad del suelo profundo introducen una incertidumbre sobre el futuro del bosque amazónico debido a que la reducción de precipitaciones y el aumento de las temperaturas generan déficits hídricos en los suelos, afectando la capacidad de las plantas para acceder al agua. En experimentos de exclusión de lluvias, la retención de humedad disminuyó hasta un 25% en suelos arcillosos profundos (Markewitz, Devine, Davidson, & et al, 2010).

2.2.5.2 Capacidad de retención de nutrientes en el suelo.

(Quesada, Phillips, Schwarz, & et al, 2012) investigaron la estructura y la dinámica del bosque amazónico fuertemente vinculadas a las condiciones edáficas y climáticas, donde el fósforo y el potasio del suelo desempeñan papeles claves en el crecimiento y la dinámica del bosque. Los suelos pobres en nutrientes en áreas del Amazonas oriental muestran menor capacidad para sostener comunidades vegetales en comparación con los suelos ricos en fósforo del Amazonas occidental. El fósforo posee poca capacidad de movilización en el suelo, pero el potasio necesario para las plantas es el que está en la solución de suelo conocido como potasio intercambiable, los flujos del agua subsuperficial podrían afectar la disponibilidad de potasio necesario para el desarrollo del bosque.

2.2.5.3 Transporte de agua en el sistema suelo-planta.

- *Raíces profundas y captación de agua:* En condiciones de sequía prolongada, las raíces profundas pueden contribuir con hasta un 20% del requerimiento hídrico desde capas de suelo entre 250-550 cm (Markewitz, Devine, Davidson, & et al, 2010).
- *Cierre estomático y potencial hídrico.* (Fisher, Wiiliams, Vale, & et al, 2006) demostraron que los bosques amazónicos exhiben un control isohídrico de las hojas, evitando que su potencial hídrico caiga por debajo de un nivel umbral crítico cuando el agua es escasa³⁹. Las plantas en suelos pobres ajustan su conductancia estomática en respuesta a la baja disponibilidad hídrica, protegiendo su potencial hídrico en hojas y limitando la pérdida de agua.

2.2.5.4 Dinamismo de Carbono y nutrientes en el suelo.

- *Emisiones de carbono:* (Sotta, Veldkamp, Schwendenmann, & et al, 2009) indican que la sensibilidad a la sequía en los ecosistemas de la selva amazónica varía enormemente, influenciada principalmente por la textura del suelo y la profundidad de la zona de raíces. En experimentos de exclusión de lluvia realizados por esos investigadores se determinó que el flujo de dióxido de carbono del suelo disminuyó de 4.3 a 3.2 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^2/\text{s}$, reflejando una menor actividad microbiana y respiración de raíces.
- *Impactos en la química del suelo:* (Pereira, Silva, Camara, & et al, 2020) estudiaron los cambios en la química del suelo bajo condiciones de inundación. La investigación se realizó en los bosques de las tierras altas amazónicas. Se demostró que las inundaciones provocan una acidificación del suelo y una pérdida de carbono a corto plazo. Mediante esta investigación realizada para conocer los impactos ambientales en los embalses con fines hidroeléctricos se obtuvo información sobre los cambios que pueden ocurrir en suelos inundados por efecto de las anomalías hidrológicas provocadas por el cambio climático, comprobándose que las inundaciones acidifican los suelos y reducen las reservas de nitrógeno disponible en un 30% a largo plazo.

2.2.5.5 Resiliencia de la vegetación ante el cambio climático.

- *Adaptaciones en la composición florística:* La composición florística de las selvas amazónicas está altamente influenciada por la profundidad del nivel freático. Todas las formas de vida mostraron las tasas de recambio más altas en la zona con suelos saturados de agua estacionalmente, que pueden extenderse hasta 350 m desde los márgenes de los arroyos. Las especies en áreas de inundación estacional muestran tasas de recambio florístico de hasta un 82%. (Schiatti, Emílio, Rennó, & et al, 2014).
- *Reducción de la productividad primaria neta (NPP):* Las selvas tropicales de la Amazonia oriental experimentan grandes disminuciones en la transpiración durante las estaciones secas debido al limitado transporte de agua del suelo a las raíces, impulsado por el bajo potencial hídrico del suelo y la alta resistencia hidráulica. Modelos

³⁹ Las plantas isohídricas son aquellas que cierran sus estomas cuando aprecian una caída en el potencial hídrico del suelo, o un aumento en la demanda atmosférica.

proyectan reducciones del 13-14% en la NPP anual en escenarios de sequía extrema debido a disminuciones estimadas en la transpiración del 30 al 40 %. (Fisher, Williams, Costa, & et al, 2007).

Con base en lo indicado, es posible concluir que el cambio climático y las alteraciones en el uso del suelo están transformando la relación entre el suelo, el agua y las plantas en la cuenca del Amazonas. Estas dinámicas refuerzan la necesidad de estrategias adaptativas que consideren las interacciones entre nutrientes, agua y vegetación para mantener la resiliencia de los ecosistemas amazónicos.

2.2.6 Impactos sobre la ocurrencia de eventos hidrológicos extremos: sequías e inundaciones.

Los impactos por afectaciones hidrológicas pueden darse a través de las sequías, inundaciones, lluvias de secano.

2.2.6.1 Sequías.

Las sequías en la Cuenca del Amazonas tienen impactos significativos en los sistemas ecológicos, hidrológicos y socioeconómicos de la región. A continuación, se presentan los principales efectos documentados:

- *Reducción de la biomasa y pérdida de carbono:* Las sequías de 2005 y 2010 causaron pérdidas de biomasa de hasta 1.6 petagramos de carbono (PgC), revirtiendo la función de la Amazonia como sumidero de carbono (Phillips, Aragão, Lewis, & et al, 2009). Durante la sequía de 2010, la fotosíntesis a nivel de toda la cuenca disminuyó en 0.38 PgC, destacando un debilitamiento en la captura de carbono (Doughty, Metcalfe, Girardin, & et al, 2015).
- *Aumento de la mortalidad de árboles:* (Feldpausch, Phillips, Brien, & et al, 2016) estudiaron la respuesta de la selva amazónica a las sequías repetidas encontrando que las tasas de mortalidad de árboles aumentaron un 1.45 MgC/ha/año en comparación con períodos sin sequía, reflejando el impacto directo de la falta de agua. La sequía de 2010 en la Amazonia provocó una pérdida neta de biomasa, impulsada por un aumento de la mortalidad y una disminución de la productividad de la biomasa, pero los bosques intactos permanecieron neutrales en carbono en comparación con 2005.
- *Disminución en la Productividad Primaria Neta (NPP):* La NPP disminuyó en un promedio del 13% durante períodos de sequía extrema, afectando tanto la regeneración forestal como el crecimiento arbóreo (Machado-Silva, Peres, Gouveia, & et al, 2021).
- *Incremento de la inflamabilidad del bosque:* Las sequías en la Amazonia aumentan la inflamabilidad de los bosques y las emisiones de carbono al reducir su almacenamiento. La sequía de 2001 redujo la humedad del suelo a menos del 25% de la capacidad máxima disponible, aumentando la inflamabilidad del bosque en 31% de la región (Nepstad, Lefebvre, Da Silva, & et al, 2004).

- *Impactos en los recursos hídricos:* Durante la sequía excepcional de 2005, las reservas de agua superficial disminuyeron en aproximadamente 130 km³, lo que representa un déficit del 70% en comparación con los niveles normales (Frappart, Papa, Da Silva, & et al, 2012).
- *Alteración de la biodiversidad:* Se prevé que el cambio climático global provoque la pérdida del 7 al 12 % de las especies de peces de los ríos y lagos amazónicos para el 2070 para 2070. Por ello (Freitas, Siqueira-Souza, Humston, & et al, 2013) evaluaron la sensibilidad a la sequía de las comunidades de peces amazónicos y encontraron que se provocaron cambios en las comunidades de peces amazónicos: aumentaron los planctívoros, disminuyeron los carnívoros y aumentaron los herbívoros y detritívoros, pero la diversidad general se recuperó en los años siguientes.

Las sequías en la cuenca del Amazonas incrementan la degradación ecológica, disminuyen la capacidad de almacenamiento de carbono y alteran significativamente los ciclos hídricos y la biodiversidad. Estos efectos resaltan la vulnerabilidad de la región frente al cambio climático y la urgencia de implementar estrategias de manejo sostenible y mitigación.

2.2.6.2 Inundaciones.

Las inundaciones, con cambios incrementales en sus características de magnitud y recurrencia debido al cambio climático, afectan significativamente a los ecosistemas, las dinámicas hidrológicas y las actividades humanas en la cuenca del Amazonas. A continuación, se describen los principales impactos documentados:

- *Aumento en la frecuencia e intensidad de inundaciones:* (Barichivich, Gloor, Peylin, & et al, 2018) abordan el aumento reciente de inundaciones extremas en la Amazonía, vinculado a la intensificación de la circulación de Walker, un fenómeno atmosférico que implica un movimiento de aire de este a oeste en los trópicos. Su estudio destaca que, aunque se ha prestado mucha atención a las sequías, el cambio más significativo en las últimas décadas ha sido un aumento notable en las inundaciones severas. La duración de este aumento anómalo en las inundaciones dependerá de la evolución de la diferencia de temperatura entre los océanos tropicales. Las inundaciones severas aumentaron en un 25% entre el 2000-2018. (Langerwisch, Rost, Gerten, & et al, 2012) estudiaron la duración y extensión de la inundación en la cuenca amazónica y encontraron un aumento del área inundada en aproximadamente un tercio de la cuenca. Además, la duración de la inundación se incrementa dramáticamente, en promedio, tres meses en el oeste y alrededor de un mes en el este de la Amazonía. El aumento en la duración de las inundaciones anuales son un factor clave para la función y diversidad de los bosques de llanura aluvial, como la Várzea y el Igapó, que cubren un área extensa de más de 97,000 km²
- *Cambios en los regímenes hidrológicos:* Proyecciones para el siglo XXI indican un incremento del 9-18% en el caudal máximo anual (época de lluvia) en la Amazonia occidental, mientras que en el este se espera una disminución de 15.9% en el caudal

mínimo anual (época seca) (Sorribas, Paiva, Melack, & et al, 2016). (Zulkafli, Buytaert, Manz, & et al, 2016) sugieren que el cambio climático está provocando un aumento en la severidad y duración de las inundaciones en la Amazonía occidental, lo que impacta negativamente en la ecología de los bosques de llanura aluvial, la productividad agrícola y la seguridad de las comunidades locales. El pulso anual de inundaciones⁴⁰ en el Amazonas occidental podría intensificarse en un 12% bajo el escenario RCP8.5 para eventos con un período de retorno de 100 años.

- *Impactos en ecosistemas acuáticos y terrestres:* Las inundaciones alteran significativamente los ecosistemas de Várzea e Igapó, que dependen de los ciclos hídricos. Cambios en el régimen de inundaciones afectan la productividad y diversidad, reduciendo la biomasa acuática en un 10-15% (Langerwisch, Rost, Gerten, & et al, 2012). El aumento en la altura y duración de las inundaciones en zonas de várzea puede incrementar la mortalidad de árboles. Las inundaciones extremas, como las observadas en la cuenca del río Madeira en 2014, han demostrado causar una alta mortalidad de árboles en bosques de várzea y bosques de transición, con tasas de mortalidad que pueden alcanzar entre el 88% y el 100%. Estos eventos también resultan en una disminución significativa de la biomasa aérea y la riqueza de especies (Oliveira, Medeiros, Moser, & et al, 2021).

2.2.6.3 Lluvias de secano⁴¹.

La alteración de las lluvias de secano en la cuenca del Amazonas, causada por el cambio climático y el cambio en el uso del suelo, tiene efectos significativos sobre los ecosistemas agrícolas, los ciclos hidrológicos y las comunidades humanas. A continuación, se describen los principales impactos:

- *Disminución de la lluvia en regiones áridas:* Las regiones del sur y este del Amazonas, particularmente vulnerables a la deforestación, han mostrado un aumento en los días secos durante las estaciones húmedas y secas, incrementándose en 1 día por año entre 1982 y 2018 (Haghtalab, Moore, Heerspink, & et al, 2020). El sur de la Amazonia experimentó un acortamiento de la temporada de lluvias, con el fin anticipado de la misma debido al cambio climático y la deforestación (Arvor, Funatsu, Michot, & et al, 2017).
- *Impactos en la transpiración y reciclaje de humedad:* La transpiración de los árboles en la Amazonia mejora las precipitaciones viento abajo, amortiguando los efectos de la sequía y revelando un mecanismo por el cual la deforestación puede comprometer la resiliencia del sistema forestal amazónico frente a futuros extremos climáticos. Aproximadamente un 33% de las lluvias del Amazonas provienen del reciclaje de humedad generado por la transpiración de los bosques. La alteración de

⁴⁰ El pulso de inundación es el ciclo natural de aumento y disminución del nivel del agua en ríos y llanuras de inundación. Es un proceso fundamental para la vida, ya que conecta el río con su entorno y mantiene la salud del ecosistema.

⁴¹ Las *lluvias de secano* se refieren a las precipitaciones que sostienen la *agricultura de secano*. Esta es un tipo de agricultura que depende exclusivamente del agua de lluvia para el crecimiento de los cultivos, sin utilizar sistemas de riego. Se practica en regiones donde las precipitaciones son suficientes, aunque a menudo irregulares, para sostener la producción agrícola.

este ciclo por deforestación podría reducir drásticamente las lluvias aguas abajo, afectando la estabilidad de los ecosistemas (Staal, Tuinenburg, Bosmans, & et al, 2018).

- *Variabilidad espacial y temporal de las lluvias:* Las precipitaciones en áreas deforestadas de la Amazonia pueden disminuir en un promedio del $12 \pm 11\%$, mientras que las áreas boscosas han mostrado un aumento en la intensidad de eventos extremos de lluvia (Spracklen & Garia-Carreras, 2015). Los análisis de los patrones de precipitaciones diurnas mostraron que las precipitaciones son más bajas en los grandes ríos durante la tarde, cuando la mayor parte de las precipitaciones son convectivas, pero por la noche y a primera hora de la mañana ocurre lo contrario, con un aumento de las precipitaciones en los ríos, aunque este patrón es menos marcado. También se determinó que pueden ocurrir reducciones locales de la precipitación media anual y del número de días húmedos (lluvia menor que 2 mm) del orden de 5%, y 6,5% respectivamente. (Paiva, Buarque, Clarke, & et al, 2011).
- *Consecuencias socioeconómicas:* La reducción de lluvias de secano afecta directamente la productividad agrícola, especialmente en sistemas de agricultura dependientes de la lluvia. (Leite-Filho, Soares-Filho, Davis, & et al, 2021). La expansión agrícola y la variabilidad climática en la cuenca del Amazonas están dando lugar a regímenes dominados por perturbaciones, modificando potencialmente los ciclos energéticos e hídricos en las regiones sur y este (Dav12).

De acuerdo con los impactos descritos en esta sección, la alteración de las lluvias de secano en la cuenca del Amazonas no solo afecta el equilibrio hídrico, sino también las actividades humanas y la biodiversidad en los ecotonos de paisaje natural y agrícola. Las medidas de mitigación deben centrarse en conservar el bosque como mecanismo clave para estabilizar los patrones de lluvia.

2.2.7 Impactos sobre procesos geodinámicos: erosión y sedimentación.

La erosión y sedimentación en la cuenca del Amazonas, incrementadas por el cambio climático y las actividades humanas, tienen efectos significativos en los ecosistemas fluviales, la calidad del agua y la productividad del suelo. A continuación, se resumen los principales impactos:

2.2.7.1 Aumento en la erosión por cambios en el uso del suelo.

La deforestación ha incrementado la erosión del suelo en hasta un 312%, con pérdidas anuales de 180 millones de toneladas de suelo en áreas como la cuenca del río Xingu (Lense, Avanzi, Parreiras, & et al, 2020). En el Tapajós, el cambio de uso del suelo hacia la minería de oro ha generado un aumento del 73.3% en la concentración de sedimentos durante la temporada alta de lluvias (Abe, Lobo, Novo, & et al, 2019). La Figura 19 muestra la cuenca del río Tapajós, la confluencia del río Crepori y un campamento de minería ilegal en las riberas de ese mismo río.

Figura 19. Cuenca del río Tapajós



Nota: La cuenca del Tapajós es la quinta mayor cuenca de entre los ríos que fluyen al Amazonas. Con aproximadamente 489.000 km², abarca alrededor del 7% de la cuenca del Amazonas. [<https://aguasamazonicas.org/cuencas/cuencas-principales/tapajos>]. 2) Subcuenca río Crepori en 2020, después de que la minería ilegal creara varias cicatrices en el bosque, aumentó el vertido de lodo en el río Tapajós. [<https://www.raisg.org/es/radar/aguas-de-caribe-amazonico-ficam-turvas-em-meio-a-alta-no-garimpo-no-para/>]. 3) Zona de minería ilegal en la región del río Crepori, afluente del río Tapajós, en el municipio de Jacareacanga, en el estado de Pará, cerca de la tierra indígena Munduruku. (Foto: Pedro Ladeira/Folhapress) [<https://folhapress.folha.com.br/foto/20604545>].

Los autores también compararon la formación de costras⁴² provocada por la erosión laminar y la provocada por la erosión del suelo de gran altitud demostrado que, durante las

⁴² Diminutas comunidades que pueden incluir cianobacterias, algas, musgos, líquenes y otros, asociados íntimamente con las partículas minerales de la superficie del suelo, creando una capa delgada, cohesiva y horizontal. (Toledo y Florentino, 2009). Pérez, F. (1997) describió las costras microbióticas páramo de Piedras Blancas, en Venezuela, señalando que las costras formaban parches discontinuos con plantas, musgos y líquenes. Consistían en una capa orgánica delgada (5–35 mm) con tres bandas paralelas, la exterior con brotes y tallos de plantas vivas y granos minerales; la intermedia con material vegetal y un mayor contenido de granos minerales y la basal con poca materia orgánica mezclada con partículas minerales gruesas.

temporadas de crecidas y estiaje, respectivamente, solo alrededor del 14% y el 6% de la formación de costras total en el río Crepori se debió a la erosión laminar del suelo, y la proporción restante se debió a la erosión del suelo de gran altitud (los sedimentos transportados por el río). Sin embargo, no fue posible encontrar referencias específicas sobre el impacto de sedimentos transportados por las avenidas en el encostramiento de suelos amazónicos. De un modo general se puede suponer que las costras, especialmente modifican la estructura del suelo, afectando la germinación de semillas y el establecimiento de plántulas. Esto puede reducir la diversidad de especies vegetales; además, pueden alterar la disponibilidad de agua y nutrientes en el suelo, lo que puede afectar la composición de las comunidades de plantas y microorganismos. Esos cambios en la vegetación y la estructura del suelo pueden afectar a la fauna que depende de estos hábitats para alimentarse, reproducirse y refugiarse, pueden alterar la movilidad de los animales terrestres, especialmente los invertebrados que viven en el suelo. Es necesario realizar más investigaciones para comprender mejor el impacto de las costras en la biodiversidad de las llanuras aluviales amazónicas, y para desarrollar estrategias de conservación adecuadas.

2.2.7.2 Alteración de la dinámica de sedimentos.

La cuenca del río Ucayali recibe más del 99% de su carga de sedimentos de la erosión de la cordillera oriental de los Andes y las estribaciones subandinas, que con rápidas tasas de denudación y celdas de precipitación extremas que contribuyen a una rápida sedimentación (Santini, Martínez, Espinoza-Villar, & et al, 2015). La Alianza – Aguas del Amazonas describe el transporte de sedimentos del río Amazonas indicando que *anualmente es del orden de 1.200 millones de toneladas de sedimentos, a la altura de Óbidos (Brasil). En promedio, aproximadamente el 75% de los sedimentos transportados más allá de esta zona alcanza el Atlántico. El otro 25% es depositado a lo largo de los 800 kilómetros del curso bajo del río, antes de llegar al Atlántico. Una vez ahí, las corrientes marinas transportan aproximadamente el 30% de los sedimentos a lo largo de las costas de la Guayana Francesa, Surinam, Guyana y hasta los alrededores del delta del río Orinoco. Las concentraciones totales de sedimentos en el río Amazonas decrecen de oeste a este, dada la gran cantidad de volúmenes de agua baja en sedimentos, especialmente provenientes de los ríos Negro, Tapajós y río Xingú, que drenan en el lado oriental de la cuenca amazónica en Brasil. Cerca del 90% de la carga de sedimentos del río Amazonas proviene de las cuencas de los ríos Madeira, Ucayali y Marañón.* A su vez (Diodato, Filizola, Borrelli, & et al , 2020) simularon un largo periodo de carga de sedimentos del Amazonas en Óbidos demostrando variaciones interdecadales, vinculadas a eventos extremos de precipitación, que contribuyen significativamente a la erosión y transporte de sedimentos. La Figura 20 muestra la contribución de los afluentes y la movilización de los sedimentos transportados por el río Amazonas.

Figura 20. Contribución de los afluentes y movilización de los sedimentos transportados por el río Amazonas



Nota: La Alianza – Aguas Amazónicas.
[<https://aguasamazonicas.org/aguas/flujo-e-inundaciones/sedimentos#:~:text=Cerca%20del%2090%25%20de%20la,las%20vastasy%20llanuras%20de%20inundaci%C3%B3n.>].

2.2.7.3 Impactos en ecosistemas y calidad del agua.

(Béliveau, Lucotte, Davindson, & et al, 2017) encontraron que los sistemas agroforestales jóvenes muestran tasas de erosión del suelo similares a las de los bosques maduros y los implementados recientemente son eficientes para reducir el Hg del suelo y la movilidad de los cationes. La reducción de la erosión en los sistemas agroforestales jóvenes se atribuye principalmente a las plantas de cobertura del suelo. Igualmente encontraron que la erosión en áreas mineras, agrícolas y de pastoreo ha contribuido al aumento de la carga de mercurio y sedimentos en los ríos, con consecuencias negativas para los ecosistemas acuáticos y humanos. En la cuenca baja, se han reportado aumentos en la sedimentación, lo que afecta la productividad pesquera y altera los hábitats fluviales críticos para la biodiversidad (Armijos, Crave, Vauchel, & et al, 2013).

2.2.7.4 Consecuencias de escenarios futuros de cambio climático.

(Santos, Montenegro, Silva, & et al , 2021) encontraron que la erosión y sedimentación puede incrementarse en la región debido al cambio climático, especialmente bajo la RCP 8.5, con implicaciones para la sostenibilidad de los recursos hídricos y los ecosistemas. A pesar de las intervenciones antrópicas que podrían incrementar la carga de sedimentos, la reducción de caudales debido a los efectos del cambio climático podría reducir la capacidad

de transporte del río Amazonas. El flujo de sedimentos hacia el norte contribuye al mantenimiento y desarrollo de playas en la costa de Surinam. Un fenómeno particular es la erosión costera podría originarse debido al aumento del nivel del mar ser incrementado por la disminución de los sedimentos aportados por el Amazonas lo que afectaría ecosistemas y comunidades locales de ese país. (Naffaa, Beek, Dunn, & et al, 2020).

En resumen, los procesos de erosión y sedimentación en la cuenca del Amazonas están estrechamente vinculados a actividades humanas y cambios climáticos. Estas dinámicas afectan la estabilidad de los ecosistemas fluviales, la calidad del agua y los servicios ecosistémicos.

2.2.8 Impactos sobre cuerpos de agua y biodiversidad: caudal ecológico, eutroficación, calentamiento.

El cambio climático afecta significativamente el caudal ecológico en la cuenca del Amazonas, alterando los regímenes hidrológicos esenciales para la biodiversidad, los ciclos biogeoquímicos y los servicios ecosistémicos. A continuación, se describen los principales impactos:

- Alteración del régimen hidrológico. En escenarios futuros, el caudal medio anual de grandes ríos que drenan los Andes, como el Solimões, podría aumentar hasta un 18.3%, mientras que los caudales mínimos disminuirían en un 15.9% en las cuencas orientales, afectando los ecosistemas en períodos secos (Sorribas, Paiva, Melack, & et al, 2016). En el río Tapajós, los caudales estacionales se reducirían hasta un 20%, acentuando la variabilidad interanual, con impactos en la regulación hídrica y la generación hidroeléctrica (Farinosi, Arias, Lee, & et al, 2019).
- Efectos en los ecosistemas acuáticos. Los cambios en el caudal afectan la migración y reproducción de especies clave como el bagre gigante (*Brachyplatystoma spp*). El cambio climático puede aumentar las tasas de migración reproductiva del bagre Goliat en algunas cuencas amazónicas, mientras que las disminuye en otras la investigación de (Feng, Raoufi, Beighley, & et al, 2020) determino que podría esperarse una reducción del 3-7% en las tasas de migración promedio debido a la disminución en la profundidad de los ríos. con variaciones espaciales e implicaciones para la conservación de los ecosistemas y la gestión de la pesca local (Feng, Raoufi, Beighley, & et al, 2020).
- El aumento de los pulsos de inundación en la Amazonia occidental (hasta un 12% bajo el escenario RCP 8.5) impactará la ecología de los bosques de várzea y las especies dependientes de estos hábitats (Zulkafli, Buytaert, Manz, & et al, 2016).
- Impacto en el mantenimiento del caudal ecológico. En las subcuencas orientales como el río Xingú, se proyecta una disminución del 50% en los caudales bajos, lo que compromete el mantenimiento del flujo mínimo necesario para los ecosistemas (Guimbertau, Ronchail, Espinoza, & et al, 2013). El río Madeira, al igual que muchos otros ríos en la cuenca amazónica, ha estado enfrentando desafíos relacionados con el cambio climático, que se manifiestan a través de caudales cada vez más bajos en períodos críticos. Las proyecciones basadas en simulaciones del

clima y posteriormente hidrológicas indican los caudales mínimos van a disminuir drásticamente en el sur río Madeira y en la cuenca del río Ucayali y el norte en el río Negro (Espinoza, Ronchail, Guimbertau, & et al , 2014) . La investigación de (Lima Filho, 2017) determinó que los peces amazónicos pertenecientes a la cuenca del río Madeira tienen vínculos estrechos con sus microhábitats, que proporcionan toda la base para la alta diversidad de especies observada en la cuenca, así como su estabilidad temporal, por lo que los cambios que alteren los microhábitats fluviales generarán alteraciones en la composición y diversidad de la ictiofauna.

- Consecuencias socioeconómicas. La variabilidad en el caudal impacta la generación hidroeléctrica, con una disminución proyectada de hasta un 7.4% en la capacidad de generación durante la estación seca en la cuenca del Tapajós (Arias, Farinosi, Lee, & et al, 2020). Las comunidades locales enfrentan desafíos en la navegación fluvial y la pesca, fundamentales para su sustento, debido a cambios en los patrones estacionales de flujo (Castello & Macedo, 2016).

El cambio climático está alterando los caudales ecológicos de los ríos amazónicos, comprometiendo los ecosistemas fluviales, los servicios ecosistémicos y las actividades humanas dependientes del agua.

2.3 IMPACTOS SOBRE LA ACTIVIDAD ECONÓMICA Y LOS ASENTAMIENTOS HUMANOS

2.3.1 Impactos sobre el abastecimiento de agua y la seguridad hídrica

La seguridad hídrica en la cuenca del Amazonas está cada vez más comprometida debido a los efectos combinados del cambio climático y las actividades humanas. Estos impactos afectan la disponibilidad, calidad y accesibilidad del agua, con implicaciones significativas para los ecosistemas y las comunidades humanas. A continuación, se describen los principales impactos documentados:

2.3.1.1 Disminución de los recursos hídricos.

Se proyecta una disminución del 27% en los caudales del río Purus para finales del siglo XXI debido a una reducción del 11.1% en las precipitaciones y un aumento de 4.4 °C en la temperatura promedio (Dalagnol, Borma, Mateus, & et al, 2017). En escenarios de cambio climático, se estima una disminución del 15.9% en la extensión de inundaciones de bajo caudal en el Amazonas central, afectando la disponibilidad de agua durante la temporada seca (Sorribas, Paiva, Melack, & et al, 2016).

2.3.1.2 Impactos en la calidad del agua.

Las actividades humanas, como la expansión agrícola y la deforestación, aumentan la carga de sedimentos y contaminantes en los cuerpos de agua, deteriorando la calidad del agua. En el río Tapajós, los impactos de la minería y la agricultura intensiva han incrementado los niveles de contaminación en un 73% durante las estaciones lluviosas (Abe, Lobo, Novo, & et al, 2019).

2.3.1.3 Riesgos para los ecosistemas acuáticos.

El aumento en la duración y frecuencia de las sequías afecta los ecosistemas dependientes del agua, reduciendo la conectividad hídrica. Esto compromete la migración y reproducción de especies clave, como los peces de importancia económica y ecológica (Castello & Macedo, 2016). Las alteraciones en el régimen hidrológico aumentan la vulnerabilidad de los bosques de várzea, que dependen de ciclos hídricos específicos para mantener su biodiversidad (Langerwisch, Rost, Gerten, & et al, 2012).

2.3.1.4 Desafíos socioeconómicos.

La reducción en la disponibilidad de agua afecta la generación hidroeléctrica, con una disminución proyectada de hasta un 7.4% en la capacidad de generación durante la estación seca en el sistema del río Tapajós (Arias, Farinosi, Lee, & et al, 2020). Los desafíos en la cuenca del Amazonas incluyen la construcción de represas, cambios extensos en el uso de la tierra, la conservación de la biodiversidad, la dependencia de las comunidades indígenas y tradicionales de los recursos fluviales y la sensibilidad sistémica al cambio climático global. Las comunidades ribereñas enfrentan riesgos crecientes en términos de acceso al agua potable y la seguridad alimentaria debido a cambios en los patrones de precipitación y la calidad del agua (Veilleux & Anderson, 2016).

2.3.1.5 Proyecciones futuras de seguridad hídrica.

Bajo escenarios de altas emisiones (RCP8.5), se espera una reducción en la precipitación acumulada y una menor recarga de acuíferos, lo que podría intensificar los períodos de sequía y reducir la capacidad de almacenamiento de agua de los ecosistemas amazónicos (De Brito Gomes, Correia, Capistrano, & et al, 2020).

En resumen, el cambio climático y las actividades humanas están alterando profundamente la seguridad hídrica en la cuenca del Amazonas, comprometiendo la disponibilidad, calidad y accesibilidad del agua.

2.3.2 Impactos sobre la producción hidroenergética y el suministro de energía

El cambio climático está transformando significativamente el sector hidroenergético de la cuenca del Amazonas, afectando la disponibilidad de agua para generación eléctrica, las infraestructuras existentes y los ecosistemas relacionados. A continuación, se presentan los principales impactos identificados:

2.3.2.1 Reducción en la generación hidroeléctrica.

El cambio climático y la deforestación podrían disminuir el potencial hidroeléctrico en la cuenca amazónica de Brasil, empeorando el desajuste entre la oferta estacional de electricidad y la demanda máxima. Debido a la reducción del caudal por causa del cambio climático y suponiendo que no ocurriese deforestación, en la cuenca del río Tapajós se podría reducir la generación hidroeléctrica durante la temporada seca en un 7.4%, mientras que si ocurriese deforestación la variabilidad interanual de caudal de estiaje podría alcanzar disminuciones entre 50% a 69% (Arias, Farinosi, Lee, & et al, 2020). La hidroeléctrica

Belo Monte, una de las mayores del mundo, podría experimentar una reducción del 21.3% en la generación anual para 2080 debido a menores caudales y la variabilidad interanual (Lucas, Silva, De Assis Salviano De Souza, & et al, 2022).

2.3.2.2 Alteración de los caudales fluviales.

El río Madeira, el mayor afluente del Amazonas, es un área de interés para la generación hidroeléctrica debido a su potencial energético. Sin embargo, se han generado preocupaciones sobre los impactos ambientales, especialmente en relación con los caudales mínimos y la variabilidad del flujo. La cuenca alta del río Madeira experimenta variabilidad interanual en el caudal y las precipitaciones, la variabilidad del caudal alto depende de los afluentes andinos y está vinculada a la temperatura superficial del mar del Pacífico ecuatorial, mientras que la temperatura superficial del mar del Atlántico norte tropical modula la variabilidad de las precipitaciones y el caudal en las tierras bajas. (Molina-Carpio, Espinoza, Vauchel, & et al, 2017). Se espera que el cambio climático y la conversión de tierras afecten el régimen hidrológico del río Madeira. Los escenarios futuros indican una disminución en el régimen de caudales bajos, especialmente si se considera la conversión de bosques a pastizales (Júnior, Tomasella, & Rodriguez, 2015). En el río Tocantins, el cambio climático combinado con el crecimiento secundario en áreas deforestadas podría disminuir la capacidad de generación hidroeléctrica en un 30%-65% anualmente (Von Randow, Rodriguez, Tomasella, & et al, 2018)

2.3.2.3 Ecosistemas acuáticos y conectividad.

(Finer & Jenkins, 2012) estudiaron el impacto ambiental global y en particular sobre la biodiversidad ictícola de conjunto de ríos afluentes del Amazonas que serían objeto de desarrollo de presas hidroeléctricas. En esta evaluación se consideraron tanto las presas construidas como las planificadas. Se destaca que muchas de ellas se ubican en la Amazonia andina. Los autores hacen notar la planificación del desarrollo hidroeléctrico para la fecha del estudio para la energía hidroeléctrica carecía de una adecuada evaluación regional y a escala de cuenca de los posibles impactos ecológicos.

En consecuencia, un primer aporte de su estudio es la detección de falta de planificación integrada dados los efectos transfronterizos en el comportamiento del régimen hidrológico en la la llanura aluvial amazónica. Por ello acometieron la identificación de efectos y evaluación de impactos, en términos de conectividad fluvial y pérdida de bosques, de la proliferación planificada de represas hidroeléctricas en todos los afluentes andinos del río Amazonas. Además, agregaron las carreteras y sistemas de líneas de transmisión dentro del conjunto de infraestructuras a desarrollar y operar. De acuerdo con su información había planes para 151 nuevas represas de más de 2 MW en los en el periodo 2012 – 2032 años, más de un 300% de aumento. Estas represas incluirían cinco de los seis principales afluentes andinos del Amazonas. Los resultados de la evaluación del impacto ecológico determinaron que el 47% de las posibles nuevas represas serian de alto impacto y solo el 19% de bajo impacto. El 60% de las represas provocarían una ruptura importante en la conectividad entre las cabeceras andinas protegidas y las tierras bajas de la Amazonia, lo que afectaría significativamente el comportamiento de los ecosistemas acuáticos. Más del 80% impulsarían la deforestación debido a nuevas carreteras, líneas de transmisión o

inundaciones. Como resultado de su análisis destacan la necesidad crítica de una mayor evaluación estratégica de las represas a escala regional y de cuenca. Es necesario mantener la conectividad entre los afluentes andinos y los cursos de las llanuras amazónicas. Con esta evidencia de las consecuencias sobre los ecosistemas acuáticos amazónicos plantean la reconsideración de la energía hidroeléctrica como fuente de energía de bajo impacto. Otros investigadores (Timpe & Kaplan, 2017) ahondaron en esa línea de trabajo y estudiaron el tipo y la magnitud de los cambios hidrológicos provocados por las represas existentes en la Amazonia brasileña. En ella, se planea construir más de 200 represas hasta 2060 y las preguntas sobre los impactos ambientales de la producción de energía hidroeléctrica actual y futura en esa cuenca hidrográfica requieren investigación y determinación. En consecuencia, se abocaron a identificar las alteraciones del régimen hidrológico causado por las represas existentes en la Amazonia. Su investigación determinó que el tipo y la magnitud de la alteración hidrológica varía ampliamente según la represa, pero los cambios más importantes se suceden en las características críticas del pulso de inundaciones. Los impactos fueron mayores para las represas de gran embalse y baja elevación. Sin embargo, las represas pequeñas de generación en horas de demanda máxima tuvieron impactos enormes debido a un régimen de descarga muy diferente al flujo natural. El efecto *acumulativo* de múltiples represas fue significativo, pero solo para algunos aspectos del régimen de flujo

2.3.2.4 Desafíos socioeconómicos.

Para 2011 de acuerdo con (Soito & Freitas, 2011) las centrales hidroeléctricas de Brasil contribuían con el 76,9% de toda la energía eléctrica generada en el país. El desarrollo del país demandaba más energía. La disponibilidad de energía hidroeléctrica para satisfacer esa demanda estaba basada en la cuenca amazónica al norte del país. Sin embargo, ya para esa fecha se manifestaba una creciente resistencia socioambiental, a las futuras centrales. Lo que encontró una respuesta en la propuesta de centrales de pasada especialmente en el centro y noroeste. Los autores consideran que la respuesta técnica aun pudiendo estar bien encaminada es insuficiente pues para que pueda ser sostenible requiere una gestión integrada, acuerdos regulatorios e integración con los países vecinos.

Es por ello por lo que evaluaron el uso del potencial hidroeléctrico en Brasil y la expansión de las centrales hidroeléctricas en la Amazonia, en la región norte del país, destacando las vulnerabilidades, los impactos y las posibilidades de adaptación de la energía hidroeléctrica frente a las crecientes demandas socioambientales y al cambio climático global en curso.

Encontraron que la nueva frontera hidroeléctrica en la Amazonía requiere analizarse bajo la concepción de la gestión integrada de los embalses y los usos múltiples del agua, nuevos arreglos institucionales y regulatorios, las oportunidades tecnológicas y económicas del sector y la integración con los países vecinos para poder subsidiar el uso sostenible del potencial hidroeléctrico.

Las centrales de pasada reducen la generación hidroeléctrica durante periodos secos lo que puede incrementar los costos de generación en hasta un 20%, debido a la necesidad de compensar con fuentes energéticas más costosas.

(Mendes, Beluco, & Canales, 2017) incrementaron las dudas sobre la viabilidad de abastecimiento hidroeléctrico a Brasil al señalar que, las incertidumbres del cambio climático impactan significativamente las previsiones de generación de energía para la expansión hidroeléctrica brasileña en la Amazonia, comprometiendo potencialmente la viabilidad económica financiera y potencialmente impactando los planes de expansión del sistema energético brasileño. Esta es una situación de urgencia pues de concretarse afectará la seguridad energética de comunidades urbanas y rurales.

2.3.2.5 Afectación a la generación de energía hidroeléctrica

El cambio climático resalta la necesidad de diversificar la matriz energética, priorizando fuentes como la solar y eólica para complementar la hidroenergía, especialmente en escenarios de sequías prolongadas (Lucas , Silva, De Assis Salviano De Souza, & et al, 2022). Se propone la integración energética regional para compensar las pérdidas locales mediante redes de transmisión mejoradas y planes de contingencia (Soito & Freitas, 2011).

En resumen, el cambio climático está impactando significativamente el suministro energético en la cuenca del Amazonas, principalmente a través de la reducción de la capacidad hidroeléctrica y el aumento de la variabilidad del suministro. Este escenario muestra la necesidad de estrategias sostenibles que combinen la planificación energética integrada con la diversificación de la matriz energética.

2.3.3 Impactos sobre la agricultura y ganadería

El cambio climático afecta significativamente las actividades agrícolas y ganaderas en la cuenca del Amazonas, generando efectos sobre la productividad, la calidad del suelo y la sostenibilidad ambiental. A continuación, se detallan los principales impactos:

2.3.3.1 Disminución en la productividad agrícola.

Proyecciones indican que el rendimiento de cultivos clave como la soya podría disminuir hasta un 44% hacia 2050 en escenarios extremos de cambio climático, afectando significativamente la economía agrícola regional (Lapola, Schaldach, & Alcamo, 2011). Usando información registrada a fin de comparar con las predicciones (Hampf A. , Stella, Berg-Mohnicke, & et al , 2020) realizaron simulaciones de crecimiento de cultivos en la Amazonía bajo condiciones de cambio climático, sus resultados para periodos 2015 – 2019 y 2035 - 2040 indican que comparando ambos lapsos los rendimientos de la soja se mantendrán casi sin cambios mientras que la productividad del maíz y el algodón disminuirá en un 28% y un 17%. Esta disminución en la productividad de los cultivos en el periodo a futuro analizado se puede atribuir a una disminución de las precipitaciones y temperaturas más altas. Igualmente, evaluaron los resultados de medidas de

adaptación basadas en los avances en la genética y el manejo de los cultivos, aplicándolas al periodo 2035 - 2040 y obtuvieron que probablemente compensarán los efectos negativos del cambio climático al aumentar los rendimientos de la soja en un 40% y los rendimientos del maíz y el algodón en un 68% y un 59%. Sin embargo, las estimaciones de BYM⁴³ indican un bajo potencial de explotación agrícola de las áreas de selva tropical actuales. Esto contrasta con los servicios ecosistémicos únicos (por ejemplo, biodiversidad, almacenamiento de carbono) que brinda la selva amazónica y requiere mecanismos de control más efectivos para prevenir una mayor deforestación. Las proyecciones para 2049 sugieren que el cambio climático podría reducir el Producto Interno Bruto (PIB) en un 1.18% en la región amazónica debido a una caída en la producción agrícola y empleo en este sector (Tanure, Miyajima, Magalhães, & et al, 2020).

2.3.3.2 Expansión agrícola y cambios en el uso de suelo.

El cambio climático impulsa la conversión de bosques en tierras agrícolas, con un aumento proyectado de 181,000 km² de deforestación adicional debido a la necesidad de nuevas tierras para compensar la pérdida de productividad (Lapola, Schaldach, & Alcamo, 2011). La expansión agrícola genera aumentos en el uso de agua y fertilizantes, incrementando el riesgo de contaminación hídrica. El índice de huella hídrica relacionado con la producción de soja podría aumentar hasta un 304% en la región del río Tapajós para 2050. Sin embargo, medidas de adaptación como la regulación del consumo de agua para estimular el uso eficiente del agua, la reducción del uso de agua en los cultivos y el control óptimo de la aplicación de fertilizantes podrían ser factores clave para lograr la sostenibilidad dentro de una cuenca hidrográfica. (Ayala L. , Van Eupen, Zhang, & et al, 2020).

2.3.3.3 Impactos en la ganadería.

Los resultados de incrementar la productividad de la ganadería muestran que pueden efectivamente reducir la habilitación de tierras y así evitar la deforestación, especialmente en los biomas de la Amazonia y el Cerrado (sabana). Esa política también puede impulsar el crecimiento económico, extendiéndolo a otras regiones de Brasil, como el Centro-Oeste y el Norte, y aumentando los ingresos y el consumo en esos lugares. Sin embargo, como política climática, centrada en la reducción de emisiones de GEI, los resultados pueden ser contraproducentes. El monto neto emitido puede aumentar, como resultado del estímulo positivo sobre la economía y relación entre las emisiones de GEI que están directamente relacionadas con el crecimiento económico. (Da Silva, Rubiario, & Filho, 2017).

2.3.3.4 Erosión y degradación del suelo.

La conversión de bosques en tierras agrícolas intensifica los procesos de erosión, reduciendo la capacidad del suelo para sostener cultivos. En algunas áreas, la

⁴³ Biophysical Yield Maxima (BYM) Es una técnica de pronóstico que predice el rendimiento de los cultivos en función de la gestión de los cultivos y las mejoras en el cultivo. Tiene en cuenta los posibles efectos del cambio climático.

productividad podría disminuir hasta un 50% debido a la degradación del suelo (Davidson, Araújo, Artaxo, & et al, 2012).

2.3.3.5 Impactos socioeconómicos en la agricultura

(Tanure, Miyajima, Magalhães, & et al, 2020) evaluaron los impactos económicos del cambio climático en la región de la Amazonía Legal, Figura 21, especialmente en la producción agrícola, uso de la tierra, PIB y creación de empleo.

Figura 21. *Amazonía Legal*



Nota: La Amazonía Legal suma 772 municipios en 9 estados: Rondonia (52), Acre (22), Amazonas (62), Roraima (15), Pará (144), Amapá (16), Tocantins (139), Mato Grosso (141) y Maranhão (181). Alberga todo el bioma amazónico y porciones del Cerrado y Pantanal. Tiene 5.015.067,75 km²: un área que corresponde al 58,9% del territorio brasileño y donde viven cerca de 25 millones de personas – el 12% de la población nacional y el 77% de los pueblos indígenas. La región fue delimitada para la actuación de la Superintendencia de Desarrollo de la Amazonía (SUDAM), en conformidad con la Constitución Federal de Brasil y la Ley Complementaria 124/2007. [Plenamata: <https://plenamata.eco/es/verbete/amazonia-legal/>]

Se evaluaron los cambios en la producción agrícola y el uso de la tierra en la región debido a los escenarios de cambio climático propuestos por el IPCC (Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático). Los resultados indican una caída en los indicadores económicos

en la Amazonía Legal que conduce a una pérdida del PIB real del orden de 1,18% en 2049 debido a la disminución de la producción y el empleo en el sector agrícola. La deforestación aumentará debido a la sustitución gradual de áreas de pastoreo por campos de cultivo. Tales cambios no son homogéneos en el espacio, afectando más a los estados de Mato Grosso, Tocantins y Pará, cuya economía depende de la agricultura. A su vez (Beltrán-Tolosa, Navarro-Racines, Pradhan, & et al, 2020) estudiaron el efecto del cambio climático en la región de las estribaciones andino-amazónicas⁴⁴, que en fecha tan cercana como 2020 brindaba servicios ecosistémicos locales y globales como alimentos, agua, regulación del clima mundial, purificación del agua y absorción de carbono. Sin embargo, el cambio climático y la expansión de la agricultura convencional pueden dar lugar a la degradación de sus servicios ambientales debido a las técnicas agrícolas que contribuyen a la deforestación, la degradación del suelo y la pérdida de biodiversidad, que podrían verse agravadas aún más por las sequías inducidas por el cambio climático, reduciendo así la producción de cultivos básicos y, en consecuencia, la seguridad alimentaria. La yuca (*Manihot esculenta*), el maíz (*Zea mays*) y el plátano (*Musa paradisiaca*) que son los principales cultivos básicos de la región tienen un papel clave en la seguridad alimentaria y los ingresos de los agricultores locales, pero están muy expuestos a los riesgos climáticos. Se evaluó el nivel de exposición al cambio climático (medido como aptitud climática) de estos cultivos en las estribaciones andino-amazónicas los resultados mostraron que, mientras que la yuca no perderá aptitud climática, el maíz perderá más de la mitad de su área adecuada actual y el plátano ganará y perderá área, lo que afectaría la seguridad alimentaria local.

El cambio climático afecta de manera transversal la agricultura y la ganadería en la cuenca del Amazonas, con implicaciones significativas para la productividad, la sostenibilidad ambiental y la economía regional. La implementación de estrategias de adaptación, como la diversificación de cultivos y la intensificación sostenible, es crucial para mitigar estos impactos.

2.3.4 Impactos sobre la navegabilidad fluvial

El cambio climático está transformando de manera significativa el transporte fluvial en la cuenca del Amazonas, afectando la navegabilidad, la infraestructura portuaria y la conectividad entre comunidades. Estos impactos están directamente relacionados con cambios en el régimen hidrológico, la variabilidad de caudales y la sedimentación. A continuación, se presentan los principales efectos documentados:

2.3.4.1 Alteraciones en los regímenes hidrológicos.

En el Amazonas central, las proyecciones indican una disminución del 15.9% en la extensión de las inundaciones durante las épocas de bajo caudal, lo que reduce la navegabilidad de los ríos en la estación seca. (Sorribas, Paiva, Melack, & et al, 2016). Las cuencas del este de la Amazonia, como el río Tapajós, (Figura 22), enfrentan disminuciones de hasta 20% en los flujos estacionales, lo que aumenta los costos

⁴⁴ Conformada por bosques húmedos andinos y bosques amazónicos en el suroeste de Colombia, la provincia de Napo en Ecuador y la provincia de Ucayali y la cuenca de Napo en Perú

operativos del transporte fluvial y la dependencia de rutas alternativas (Farinosi, Arias, Lee, & et al, 2019).

Figura 22. Cuenca del río Tapajós



Nota: <https://aguasamazonicas.org/cuencas/cuencas-principales>

2.3.4.2 Impacto de las sequías extremas.

Los eventos de sequía, como los de 2005 y 2010, redujeron los caudales principales de la cuenca, limitando la navegabilidad en más del 50% del sistema fluvial durante varios meses (Davidson, Araújo, Artaxo, & et al, The Amazon basin in transition, 2012). Las sequías prolongadas incrementan los costos del transporte fluvial debido a la necesidad de dragado constante para mantener rutas navegables (Castello & Macedo, 2016). La pérdida de la posibilidad de transporte fluvial incrementa significativa el costo de transporte de al hacer uso de transporte aéreo y combinación con terrestre cuando es posible. Además, ocurren pérdidas de mercancías (agricultura) que no puede ser extraída de la zona, tal como puede apreciarse en el cuadro comparativo entre uno y otro medio de transporte.

Cuadro 1. Comparación entre transporte fluvial y aéreo

Fluvial		Aéreo
Ventaja	Generalmente es más económico para transporte de grandes volúmenes de carga.	Es mucho más rápido, lo que es crucial para transporte de bienes perecederos o emergencias médicas. Permite el acceso a áreas muy remotas sin infraestructura fluvial.
Desventaja	El tiempo de viaje es considerablemente mayor Depende de las condiciones del (nivel de agua, corrientes, entre otros). La infraestructura vial puede ser limitada.	Es considerablemente más costoso, especialmente para grandes volúmenes de carga. La capacidad de carga es limitada. Depende de las condiciones climáticas.
Costos	Los costos varían según la distancia, el tipo de embarcación, el volumen de carga y la temporada (estiaje o crecida).	Los costos son elevados debido al combustible, el mantenimiento de aeronaves y la infraestructura aeroportuaria.

(Schaeffer, Barrantes, Klautau, & et al, 2023) consideran que, en el caso de la Amazonía, el transporte acuático y la aviación son opciones que podrían brindar conectividad con un menor impacto ambiental, tomando en consideración la adaptación a eventos climáticos extremos (por ejemplo, sequías, inundaciones, olas de calor e incendios forestales) y recomiendan priorizar las opciones de transporte multimodal con bajas emisiones de carbono, como el transporte fluvial y la aviación eléctrica a pequeña escala. (Esteves, Capistrán, Arcuschin, & et al, 2024) informan que, en 2017 se transportaron 9.8 millones de pasajeros y 3.4 millones de toneladas de carga por año solo en los ríos de la Amazonia brasileña. Actualmente este sistema de transporte enfrenta retos como las sequías acentuadas por el cambio climático, la infraestructura insuficiente en las terminales fluviales, la gestión inadecuada de residuos, embarcaciones envejecidas propensas a fugas de combustible y movidas por combustibles fósiles, todo ello con profundas implicaciones para la economía local, la seguridad alimentaria, la educación y la salud de las comunidades ribereñas que dependen de los ríos para el acceso, la comunicación y el transporte.

2.3.4.3 Sedimentación y navegación.

El aumento de la sedimentación en ríos como el Madeira afecta la estabilidad del transporte fluvial. Las tasas de sedimentación han aumentado en un 35% debido a la deforestación y cambios en el uso del suelo (Júnior, Tomasella, & Rodriguez, 2015). La sedimentación limita el acceso a puertos naturales, especialmente durante la temporada seca, afectando las exportaciones agrícolas y la conectividad entre comunidades ribereñas.

2.3.4.4 Infraestructura y planificación.

Las fluctuaciones en el nivel del agua exigen inversiones adicionales en infraestructura portuaria, con incrementos proyectados del 15-25% en los costos de mantenimiento de los sistemas fluviales (Arias, Farinosi, Lee, & et al, 2020). La planificación hidroenergética en ríos como el Tapajós debe incorporar el transporte fluvial como componente clave para evitar conflictos por el uso de recursos hídricos (Farinosi, Arias, Lee, & et al, 2019).

Con base en los impactos identificados se puede concluir que el cambio climático plantea desafíos significativos para el transporte fluvial en la cuenca del Amazonas. Los cambios en el régimen hidrológico, combinados con eventos climáticos extremos y sedimentación, limitan la capacidad de la región para mantener rutas navegables y atender demandas socioeconómicas.

2.3.5 Impactos sobre comunidades aborígenes

Los pueblos indígenas de la cuenca del Amazonas⁴⁵ enfrentan múltiples impactos derivados del cambio climático, a los cuales se suman por factores no climáticos como la deforestación, la degradación de los ecosistemas y la marginación social (Bauer, De Jong, & Ingram, 2022) destacan cómo las comunidades indígenas de la Amazonía, como los Tacana en Bolivia, perciben y enfrentan los impactos del cambio climático, utilizando su conocimiento ecológico tradicional para adaptarse a eventos climáticos extremos como inundaciones; (Funatsu, Dubreuil, Racapé, & et al, 2019) describen como las comunidades amazónicas han percibido cambios en los patrones de precipitación y el ciclo climático anual; (Bodmer, Mayor, Antúnez, & et al, 2020) describen como los Cocama en la Amazonía peruana han adaptado sus prácticas de caza y pesca en respuesta a las disminuciones de poblaciones de especies de carne silvestre debido a inundaciones extremas, mostrando una adaptación comunitaria al cambio climático. A continuación, se describen los principales impactos identificados:

2.3.5.1 Pérdida de seguridad alimentaria y nutricional.

El cambio climático ha alterado los sistemas alimentarios tradicionales. En las comunidades Shawi del Perú, las inundaciones más frecuentes y las temperaturas extremas han reducido la disponibilidad de alimentos del bosque, lo que agrava las vulnerabilidades nutricionales preexistentes (Arotoma-Rojas,, Berrang-Ford, Zavaleta-Cortijo, & et al, 2022). La disminución en las poblaciones de especies de carne silvestre, como el pecarí y el venado, debido a inundaciones extremas, ha obligado a comunidades como los Cocama a depender más de la pesca, afectando la sostenibilidad de sus medios de vida (Bodmer, Mayor, Antúnez, & et al, 2020).

⁴⁵ Se estima que aproximadamente un millón de personas pertenecen a unos 400 grupos étnicos o tribus. [<https://www.bancomundial.org/es/news/feature/2019/08/08/the-amazons-indigenous-languages-hold-the-key-to-its-conservation-an-interview-with-martin-von-hildebrand#:~:text=Hoy%20en%20d%C3%ADa%2C%20hay%20aproximadamente,etnias%20que%20hablan%20300%20idiomas>]

2.3.5.2 Alteraciones en el Uso de la Tierra y desplazamientos.

Las comunidades indígenas están viendo reducida su capacidad de utilizar tierras tradicionales debido a la degradación ambiental y la expansión agrícola. En el norte de la Amazonia ecuatoriana, los patrones de uso de la tierra han cambiado significativamente, con un aumento en la ganadería y la intensificación agrícola en detrimento de la conservación forestal (Gray & Bilsborrow, 2020).

2.3.5.3 Impactos en la salud y los recursos hídricos.

Los cambios de clima, combinados con la deforestación, han provocado un aumento en la turbidez y temperatura de los ríos, afectando la calidad del agua para consumo humano. En comunidades Shawi, el 86% de los hogares reportaron impactos significativos en su salud debido a estas alteraciones (Torres-Slimming, Wright, Lancha, & et al, 2020).

2.3.5.4 Pérdida de conocimientos tradicionales.

La creciente frecuencia de fenómenos extremos está desafiando la fiabilidad de los indicadores climáticos tradicionales utilizados por los pueblos indígenas, como los Tacana en Bolivia, lo que reduce su capacidad de anticiparse a eventos críticos y adaptarse (Bauer, De Jong, & Ingram, 2022).

2.3.5.5 Vulnerabilidad económica y exclusión.

Las poblaciones indígenas amazónicas tienen una alta prevalencia reportada de deficiencias nutricionales. Los impactos climáticos están evidenciando las desigualdades socioeconómicas. En el Perú, las políticas gubernamentales que vinculan servicios públicos con el crecimiento poblacional de las comunidades indígenas han llevado a una sobreexplotación de recursos en ellas, contribuyendo a una mayor vulnerabilidad social (Zavaleta, Berrang-Ford, Ford, & et al).

El cambio climático tiene efectos múltiples y transversales en las comunidades indígenas de la cuenca del Amazonas, amenazando su seguridad alimentaria, salud, conocimientos tradicionales y medios de vida. Las estrategias de adaptación deben ser inclusivas, considerando los saberes tradicionales y las perspectivas locales como elementos clave en la planificación de políticas sostenibles.

2.3.6 Impactos sobre la salud humana.

El cambio climático afecta la salud de las poblaciones en la cuenca del Amazonas a través de alteraciones en el ambiente físico y biológico, afectando a la vez, enfermedades transmisibles, la calidad del agua y la seguridad alimentaria. A continuación, se detallan los principales impactos:

2.3.6.1 Incremento en enfermedades transmitidas por vectores.

El aumento de temperaturas y la intensificación de lluvias generan condiciones favorables para vectores como los mosquitos, incrementando la incidencia de enfermedades como el dengue, malaria y fiebre amarilla. Se proyecta un aumento del 8-15% en la transmisión de malaria en regiones bajas hacia 2050 (Ellwanger J. , Kulmann-Leal, Kaminski, & et al, 2020). El Cuadro 2 contiene los problemas asociados con la deforestación en la cuenca del Amazonas.

Cuadro 2. Problemas asociados con la deforestación del Amazonas y sus impactos en enfermedades infecciosas

Problema o fenómeno	Efecto o enfermedad	Referencias
Deforestación y desorden civil que promueven el surgimiento de casos de <i>Paracoccidioidomicosis</i>.	La infección ocurre al inhalar esporas de <i>Paracoccidioides spp.</i> presentes en el suelo. Los brotes de Paracoccidioidomicosis se han reportado en áreas con deforestación masiva. El desorden civil asociado al cambio climático también está vinculado a su aparición. La remoción de suelo por deforestación incrementa la exposición a esporas, lo que favorece nuevos brotes. El cambio climático puede predisponer a diferentes regiones de América Latina a brotes adicionales.	Barrozo et al. (2010), Marques-da-Silva et al. (2012), do Valle et al. (2017)
Actividades mineras que generan contaminación ambiental y deforestación.	Alta prevalencia de malaria y síndrome pulmonar por hantavirus entre mineros de oro en la región amazónica. La transmisión de malaria está especialmente vinculada a la minería ilegal.	(Bauch, Birkenbach, Pattanayak, & et al, 2015), Sánchez et al. (2017), Terças-Trettel et al. (2019)
Emergencia y reemergencia de enfermedades arbovirales que se propagan desde la selva amazónica hacia áreas metropolitanas.	Las enfermedades virales transmitidas por artrópodos pueden tener su transmisión facilitada hacia asentamientos humanos debido a la pérdida de hábitats naturales y la reubicación de mosquitos primatófilos. Esto puede provocar brotes urbanos.	Rezende et al. (2018), Favoretto et al. (2019)
Incremento en la propagación y el impacto de enfermedades transmitidas por agua.	La falta de cobertura vegetal, la urbanización reciente y alteraciones en el ciclo hidrológico contribuyen a la expansión de enfermedades transmitidas por agua. Las condiciones sanitarias deficientes y eventos extremos, como inundaciones, pueden generar epidemias de enfermedades virales, bacterianas y protozoarias.	Martins et al. (2015), Vieira et al. (2016), Vieira et al. (2017)
Presencia de áreas deforestadas, ganadería, carreteras o minería.	Incremento en brotes de rabia y ataques de murciélagos en animales y humanos.	Schneider et al. (2001), Carvalho-Costa et al. (2012), Fernandes et al. (2013), de Andrade et al. (2016)

Problema o fenómeno	Efecto o enfermedad	Referencias
Cambios en propiedades fisicoquímicas del agua y suelo inducidos por la deforestación.	La deforestación afecta ambientes acuáticos y del suelo, seleccionando hongos adaptados a nichos ecológicos novedosos. Esto podría fomentar el surgimiento de hongos patógenos como <i>Candida auris</i> y <i>Cryptococcus gattii</i> .	Hagen et al. (2013), Lockhart et al. (2017), Casadevall et al. (2019)
Presencia de minería de oro.	Aumento en la incidencia de leishmaniasis cutánea.	Rotureau et al. (2006)
Fluctuaciones en precios de <i>commodities</i>, migraciones e impactos ecológicos.	Las fluctuaciones en precios de <i>commodities</i> inducen migraciones hacia y desde la región amazónica, asociadas con impactos ecológicos que promueven la diseminación de enfermedades infecciosas. Por ejemplo, el aumento en el precio del oro en los años 70 promovió migraciones que resultaron en reintroducción de malaria en múltiples municipios.	Becker (2004), Varga (2007)
Presencia de áreas deforestadas.	Incremento en la abundancia y distribución del vector de la enfermedad de Chagas <i>Rhodnius pallescens</i> .	Gottdenker et al. (2011)
Contacto humano con áreas forestales debido a la deforestación.	Incremento en casos de leishmaniasis.	Desjeux (2004), Alvar et al. (2006), Palatnik-de-Sousa & Day (2011)
Deforestación y flujos migratorios.	Incremento en casos de enfermedad de Chagas aguda. Altas tasas de deforestación y densidad de la enfermedad están relacionadas con adaptaciones a entornos urbanos. La infección oral está aumentando, estableciendo un ciclo epidemiológico distinto.	Sousa Júnior et al. (2017), Santos et al. (2018)

Nota: (Ellwanger J. , Kulmann-Leal, Kaminski, & et al, 2020). Las referencias citadas no fueron objeto de consulta en este estudio.

2.3.6.2 Inseguridad hídrica y enfermedades relacionadas con el agua.

El cambio en los patrones de precipitación afecta la disponibilidad y calidad del agua (Dubreuil, Funatsu, Michot, & et al, 2017). Las inundaciones más frecuentes y prolongadas provocan una mayor contaminación de fuentes hídricas con residuos sólidos y químicos, exacerbando problemas de salud pública (Sorribas, Paiva, Melack, & et al, 2016). A su vez (Costa & Marengo, 2023) destacan que con las sequías la mortalidad de peces contamina el agua usada para consumo humano.

2.3.6.3 Estrés térmico y enfermedades respiratorias.

El aumento de la temperatura media en el Amazonas, combinado con la deforestación, incrementa el riesgo de estrés térmico. Bajo un escenario de altas emisiones (RCP8.5), más de 11 millones de personas en el Amazonas estarían en riesgo de estrés térmico extremo hacia 2100 (Oliveira, Bottino, Nobre, & et al, Deforestation and climate change are

projected to increase heat stress risk in the Brazilian Amazon., 2021). La exposición a contaminantes derivados de incendios forestales aumenta la prevalencia de enfermedades respiratorias como asma y bronquitis, especialmente entre los niños **Fuente especificada no válida.**

2.3.6.4 Impactos en la seguridad alimentaria y nutrición.

Las alteraciones climáticas han reducido la disponibilidad de recursos tradicionales de subsistencia, como el pescado y la caza, contribuyendo a la desnutrición en comunidades rurales (Bodmer, Mayor, Antúnez, & et al, 2020). La pérdida de biodiversidad y el cambio en el uso de la tierra han reducido la variedad de alimentos disponibles, afectando la calidad nutricional y el bienestar de las poblaciones locales (Brandão, Barata, & Nobre, 2022).

2.3.6.5 Vulnerabilidad psicosocial.

El desplazamiento forzado debido a inundaciones y sequías recurrentes genera estrés psicológico y social entre las comunidades vulnerables, especialmente en las zonas rurales (Valois & Cartaxo, 2022). La falta de acceso a servicios médicos en áreas remotas puede agravar los problemas de salud mental, ya que las comunidades enfrentan una carga de enfermedades no tratadas y el estrés asociado con las pérdidas económicas y ambientales (Castro, Baeza, Codeço, & et al, 2019), (Bauch, Birkenbach, Pattanayak, & et al, 2015).

El cambio climático incrementa las vulnerabilidades de salud en las poblaciones de la cuenca del Amazonas, especialmente en comunidades indígenas y rurales. Las políticas públicas deben priorizar la mitigación de riesgos climáticos y el fortalecimiento de los sistemas de salud locales para enfrentar estos desafíos.

2.4 IMPACTOS SOBRE LOS PARAMOS ANDINOS.

Los páramos son ecosistemas de alta montaña cruciales para la regulación hídrica, especialmente en los países andinos, donde abastecen de agua a grandes ciudades y mantienen el flujo de los ríos amazónicos. Sin embargo, estos ecosistemas son altamente vulnerables al cambio climático, lo que genera consecuencias importantes para la biodiversidad, el suministro de agua y la estabilidad socioeconómica de la región. Para identificar los impactos se realizó una revisión sistemática de literatura I obteniéndose la identificación de los siguientes impactos:

2.4.1 Reducción de la cobertura de páramo.

Se proyecta una disminución del 75% de la cobertura de pastizales de páramo debido a la expansión de la frontera agrícola y forestal causada por el aumento de temperatura (Ivanova, 2022). Estos ecosistemas son clave para mantener una descarga gradual del recurso hídrico, mucho más que los glaciares tropicales. Alteración de los servicios ecosistémicos.

2.4.2 Alteración de los servicios ecosistémicos.

Servicios como el alimento para humanos las respuestas son en su mayoría sustancialmente negativas. Los servicios como la provisión de agua potable podrían reducirse hasta un 40% bajo escenarios futuros de cambio climático, afectando a comunidades locales dependientes del páramo (Díazgranados, Tovar, Etherington, & et al, 2021).

2.4.3 Aumento de la evapotranspiración.

Se estima que un aumento en la temperatura explicaría el 62% del incremento de la evapotranspiración, reduciendo la disponibilidad hídrica en la región (Ivanova, 2022).

2.4.4 Vulnerabilidad de especies clave.

El complejo *Espeletia*, un indicador ecológico del páramo podría perder hasta un 39% de su rango de distribución debido a la falta de capacidad adaptativa frente a los cambios climáticos (Valencia, Mesa, León, & et al, 2020).

2.4.5 Disminución de la regulación hídrica.

La capacidad de los páramos para actuar como reguladores hídricos (esponjas naturales/buffers) podría disminuir, impactando directamente la estacionalidad/variabilidad de los caudales de los ríos tributarios del Amazonas; aumento de la escorrentía directa (inundaciones) y disminución de caudales de estiaje (época seca). Las proyecciones sugieren una reducción del 20% en el almacenamiento de agua en suelos de páramo (Correa, Ochoa-Tocachi, Birkel, & et al, 2020).

En la Cuadro 3 se presenta un resumen de los impactos del cambio climático en los páramos con afectación a la cuenca del Amazonas.

Cuadro 3. *Resumen de impactos del cambio climático en los Páramos de la cuenca del Amazonas*

Impacto climático	Descripción	Fuente
Reducción de cobertura de páramo	Pérdida del 75% de la cobertura vegetal debido a la expansión agrícola impulsada por el aumento térmico.	(Ivanova, 2022)
Alteración de servicios ecosistémicos	Reducción del 40% en la provisión de servicios, especialmente agua potable.	(Díazgranados et al., 2021)
Aumento de evapotranspiración	Incremento del 62% en la evapotranspiración, reduciendo la disponibilidad de agua.	(Ivanova, 2022)
Vulnerabilidad de especies clave	Pérdida del 39% del rango de distribución de especies como <i>Espeletia</i> debido a limitada adaptabilidad.	(Valencia et al., 2020)
Disminución de regulación hídrica	Reducción del 20% en la capacidad de almacenamiento hídrico de suelos.	(Correa et al., 2020)

Estos estudios sugieren que los glaciares andinos han experimentado un retroceso significativo en las últimas décadas, con una reducción del 42% en la cobertura de los glaciares tropicales andinos, lo que afecta la disponibilidad de agua y plantea desafíos para la adaptación al cambio climático. Destacan algunas de las amenazas significativas debido

al cambio climático, especialmente en lo que respecta a la alteración de la variabilidad estacional de caudales, evapotranspiración, y sus efectos en la reducción de la cobertura vegetal, vulnerabilidad de especies clave y la alteración de los servicios hídricos ecosistémicos. La pérdida de estos ecosistemas (páramos) tendría repercusiones directas en la disponibilidad de agua para las regiones andinas y por ende en la cuenca baja del Amazonas. Abordar estos desafíos requiere un monitoreo continuo, una colaboración trasfronteriza y la implementación de estrategias de conservación adaptativa.

En la Cuadro 4 se presentan ejemplos para algunos países amazónicos, de impactos identificados para ambientes de páramo a consecuencia del cambio climático:

Cuadro 4. *Resumen afectación hídrica en los páramos de la cuenca del Amazonas*

Situación País	N o	Impactos identificados	Fuente
Colombia. Los páramos abastecen de agua a más del 70% de la población colombiana, especialmente en grandes ciudades como Bogotá y Medellín. Las proyecciones indican una reducción significativa de la disponibilidad de agua en los próximos años	1	Retroceso de glaciares: El 90% de los glaciares en Colombia ha disminuido drásticamente en el último siglo, afectando la capacidad de almacenamiento hídrico de los páramos.	(Vuille, Mark, Christian & Buytaert, & et al, 2018)
	2	Evapotranspiración: Se espera un aumento del 20% en la evapotranspiración, lo que podría reducir el flujo de agua superficial en un 25-30% para 2050	(Buytaert, Wouter & Céleri, Rolando & De Bièvre, & et al, 2006)
	3	Escasez de agua potable: Se anticipa una disminución del 30% en la provisión de agua para las ciudades abastecidas por los páramos.	(IDEAM, 2020)
	4	Conflictos por el agua: Las regiones que dependen de estos ecosistemas enfrentarán mayores desafíos en la gestión hídrica, especialmente en temporadas secas prolongadas.	(Ivanova, 2022)
	5	Regulación hídrica. Se estima que la capacidad de regulación hídrica disminuirá en un 25% para 2050, lo que podría afectar la recarga de acuíferos.	(Maldonado, del Pino, & Ochoa, 2018)
Ecuador. Los páramos abastecen de agua a alrededor del 60% de la población ecuatoriana, incluyendo grandes ciudades como Quito y Cuenca. La hidrología de estos ecosistemas está siendo alterada significativamente por el cambio climático	1	Retroceso glaciar: el derretimiento de glaciares en la región andina, especialmente en el volcán Antisana, ha avanzado a una tasa de 30% en los últimos 50 años, afectando el flujo hídrico de los páramos. Esto podría reducir la disponibilidad de agua en un 35% en las regiones de alta montaña.	(Maldonado, del Pino, & Ochoa, 2018)
	2	Evapotranspiración: Se estima un aumento del 15-20% en la evapotranspiración debido al incremento de 1.5°C a 2°C en la temperatura media anual. Esto podría reducir el caudal de los ríos en un 25%.	(Buytaert, Sevink, & Cuesta , 2014)
	3	Escasez de agua: La reducción en la capacidad de retención de agua podría afectar la provisión hídrica para más de 5 millones de personas en la región andina ecuatoriana.	(Valencia, Mesa, León, & et al, 2020)
	4	Provisión de agua: Se estima que la capacidad de los páramos para regular el ciclo hídrico podría reducirse en un 20% para 2050, lo que afectaría a sistemas de abastecimiento como los de Quito.	(Buytaert , Cuesta-Camacho, , F., & et al, 2011)
	5	Recarga de acuíferos: La recarga podría disminuir en un 25%, lo que impactará directamente a los sectores agrícola e industrial.	

Situación País	N o	Impactos identificados	Fuente
	6	Aumento de sequías. Se proyecta un aumento del 20% en la frecuencia de sequías en los páramos ecuatorianos, lo que afectará directamente los ciclos de recarga hídrica y la seguridad alimentaria de las comunidades locales.	
Perú. Los páramos andinos de Perú desempeñan un papel esencial en la regulación hídrica de la cuenca amazónica, actuando como reservas de agua dulce para las zonas bajas. Sin embargo, estos ecosistemas frágiles están cada vez más amenazados por el cambio climático	1	Retroceso glaciar: El 71% de los glaciares tropicales se encuentran en Perú. Se ha perdido el 50% de la superficie glacial en los últimos 50 años, lo que afecta directamente los páramos.	Fuente especificada no válida.
	2	Reducción de la cobertura de Páramo. Pérdida del 30% de cobertura debido al aumento de temperatura y expansión agrícola.	(Peyre, 2022)
	3	Alteración de los servicios hidrológicos. Reducción del 20% en la capacidad de retención de agua, afectando la regulación hídrica.	(Buytaert, Wouter & Céleri, Rolando & De Bièvre, & et al, 2006)
	4	Suministro de agua: Se espera que la reducción en la captación de agua impacte a más de 10 millones de personas en la costa peruana	(Vuille, Mark, Christian & Buytaert, & et al, 2018)
Bolivia	1	Afectación a la agricultura: El cambio climático impacta la producción agrícola en Bolivia y Perú, afectando los recursos hídricos, la rentabilidad de los cultivos, las limitaciones ambientales, las transformaciones sociales y políticas y el conocimiento tradicional.	Fuente especificada no válida.
	2	Sistema agroalimentario: El cambio climático afecta la agricultura en los Andes bolivianos, influyendo en el momento de la siembra, el manejo del suelo y las variedades de cultivos, y al mismo tiempo impactando en las técnicas de procesamiento doméstico para preservar y desintoxicar los alimentos nativos.	Fuente especificada no válida.
	3	Retroceso de glaciares. El cambio climático y el retroceso de los glaciares en los Andes bolivianos amenazan la seguridad hídrica, y los glaciares de roca podrían contribuir al abastecimiento de agua de las montañas.	Fuente especificada no válida.
	4	Desarrollo Turístico Sitios turísticos multifuncionales, como Chacaltaya, pueden adaptarse al cambio climático y seguir siendo atractivos para los visitantes, a pesar de la desaparición de un glaciar y una antigua pista de esquí.	Fuente especificada no válida.
Venezuela. Los páramos andinos venezolanos, son ecosistemas fundamentales para la regulación hídrica y la biodiversidad de la región. Sin embargo, el cambio climático amenaza la estabilidad de estos frágiles ambientes.	1	Disminución de páramos: Se proyecta que los páramos venezolanos pierdan hasta el 30% de su extensión para 2080, afectando los ecosistemas únicos de la región.	
	2	Alteración de la regulación hídrica. Reducción del 20%-40% en la capacidad de almacenamiento de agua en suelos de páramo.	
	3	Incremento de la evapotranspiración. Altas tasas de evapotranspiración en humedales reducen la disponibilidad hídrica durante la estación seca.	

Fuente: Elaboración propia

Las evidencias aportadas por la presente revisión sistemática de literatura indican que el cambio climático está ejerciendo una presión significativa sobre los páramos de la cuenca del Amazonas, afectando gravemente el ciclo hidrológico y la biodiversidad.

2.5 INFORMACIÓN ESPECÍFICA. ANÁLISIS DE ESTUDIOS.

1. *Proyecciones del cambio climático sobre el caudal y la inundación en la cuenca del Amazonas:*

Este estudio utiliza el modelo hidrológico regional MGB-IPH para analizar cómo el cambio climático podría afectar el caudal y la extensión de las inundaciones en la cuenca, destacando las incertidumbres y variaciones en diferentes escenarios climáticos (Sorribas, Paiva, Melack, & et al, 2016).

2. *El cambio climático en la cuenca del Amazonas: Puntos de inflexión y cambios en extremos climáticos:*

El trabajo examina los mecanismos físicos relacionados con las variaciones hidrometeorológicas en la Amazonía, esenciales para predecir futuros cambios en las precipitaciones y la variabilidad fluvial (Marengo , Nobre , Sampaio, & et al, 2011)
Evaluación de los costos históricos de la inacción frente al cambio climático:

Este artículo considera escenarios alternativos en los que la mitigación climática comienza antes, estimando los costos totales hasta la fecha de la acción retrasada (Sanderson & O'Neill, 2020)

3. *Emisiones anuales de carbono por deforestación en la Cuenca del Amazonas entre 2000 y 2010:*

Este estudio cuantifica las emisiones de carbono resultantes de la deforestación en la Amazonía, proporcionando datos cruciales para establecer niveles de referencia en iniciativas de reducción de emisiones (Xiao-Peng Song, Chengquan, Sassan , & et al, 2015)

4. *Efectos de la deforestación en la cuenca del Amazonas sobre la circulación atmosférica regional y el transporte de humedad:*

Este estudio analiza cómo la deforestación podría alterar la circulación atmosférica y el transporte de vapor de agua, afectando las fuentes de humedad hacia diversas regiones de América del Sur tropical (Ruiz-Vásquez , Arias, Martínez, & et al, 2020).

5. *El costo de la inacción climática: Un llamado a la acción colectiva:*

Este informe destaca que, al considerar los costos de la inacción, el caso económico para la acción climática se vuelve claro, enfatizando la necesidad de colaboración para mitigar los impactos económicos y ambientales (Boston Consulting Group, 2024).

6. *La economía de la supervivencia depende de desbloquear el capital verde:*

Este artículo enfatiza la necesidad urgente de inversiones en mitigación y adaptación al cambio climático para evitar pérdidas económicas significativas, destacando la importancia de la acción inmediata (Lagarde, 2021)

7. *Proyecciones del cambio climático sobre caudales y áreas de inundación en la cuenca del Amazonas:*

- Metodología: Modelo hidrológico regional MGB-IPH.
- Impactos económicos: Reducción del potencial hidroeléctrico y aumento del riesgo de inundaciones en regiones específicas.
- Fuente: (Sorribas, Paiva, Melack, & et al, 2016)
- Ubicación: Toda la cuenca del Amazonas.

8. *Impactos de la deforestación y el cambio climático en la planificación hidroeléctrica de la Amazonía brasileña:*

- Metodología: Modelos hidrológicos combinados con proyecciones de cambios globales y regionales.
- Impactos económicos: Reducción del potencial de generación hidroeléctrica en la estación seca, pérdida anual de 312–430 GWh.
- Fuente: (Arias, Farinosi, Lee, & et al, 2020)
- Ubicación: Río Tapajós, Brasil.

9. *Evaluación de los impactos del cambio climático en la cuenca del río Purus:*

- Metodología: Simulación hidrológica usando el modelo MHD-INPE.
- Impactos económicos: Reducción proyectada del caudal en un 27%, afectando la sostenibilidad del ecosistema y los usos humanos.
- Fuente: (Dalagnol, Borma, Mateus, & et al, 2017)
- Ubicación: Cuenca del río Purus, sudoeste del Amazonas.

10. *Modelización de cambios históricos y futuros en el uso de suelo e hidrología en el Amazonas:*

- Metodología: Modelo SWAT para el balance hídrico basado en escenarios de conservación y uso intensivo.
- Impactos económicos: Incremento de eventos extremos como inundaciones, potencial de daños económicos significativos.
- Fuente: (Abe , Lobo , Dibike , & et al, 2018)
- Ubicación: Cuenca del río Tapajós.

11. *Evaluación del cambio climático en el ciclo hidrológico de la Amazonía:*

- Metodología: Análisis empírico de variables climáticas e hidrológicas con datos históricos.

- Impactos económicos: Incremento en costos de gestión de inundaciones y mitigación de desastres.
- Fuente: (Chagas & Chaffe, 2016)
- Ubicación: Brasil meridional.

12. Impacto del cambio climático en flujos extremos en subcuencas amazónicas:

- Metodología: Modelo ORCHIDEE con proyecciones multimodelo basadas en escenarios AR4.
- Impactos económicos: Reducción de caudales en la estación seca, afectando actividades económicas dependientes del agua.
- Fuente: (Guimbertau, Ronchail, Espinoza, & et al, 2013)
- Ubicación: Subcuencas del Amazonas.

13. Efectos potenciales del cambio climático en los patrones de inundación del Amazonas:

- Metodología: Modelo global de vegetación y simulación hidrológica LPJmL.
- Impactos económicos: Cambios en los patrones de inundación, afectando la biodiversidad y servicios ecosistémicos.
- Fuente: (Langerwisch, Rost, Gerten, & et al, 2012)
- Ubicación: Toda la cuenca del Amazonas.

14. Valuación de riesgos de cambio climático en el ciclo hidrológico de la cuenca del Amazonas:

- Metodología: Modelos climáticos CMIP5 y análisis de extremos hidrológicos.
- Impactos económicos: Incremento en costos relacionados con sequías y eventos extremos de humedad.
- Fuente: (Duffy, Brando, Asner, & et al, 2015)
- Ubicación: Amazonas oriental y occidental.

15. Intensificación del ciclo hidrológico del Amazonas en las últimas dos décadas:

- Metodología: Análisis de tendencias en caudales máximos y mínimos vinculados a la humedad atmosférica.
- Impactos económicos: Cambios en la disponibilidad de agua para navegación y actividades económicas.
- Fuente: (Gloor, M., Brien, Gabraith, & et al, 2013)
- Ubicación: Toda la cuenca del Amazonas.

16. Impactos de la sequía en los flujos de carbono de los bosques amazónicos:

- Metodología: Monitoreo a largo plazo de parcelas forestales.
- Impactos económicos: Pérdida de servicios ecosistémicos, incluidos los relacionados con el secuestro de carbono.
- Fuente: (Doughty, Metcalfe, Girardin, & et al, 2015)
- Ubicación: Amazonas en general.

17. Efectos del cambio climático en la producción hidroeléctrica en la cuenca del Tapajós:

- Metodología: Modelos hidrológicos aplicados a escenarios climáticos futuros.
- Impactos económicos: Reducción de la producción energética y aumento en costos de generación.
- Fuente: (Mohor, Rodriguez, Tomasella, & et al, 2015)
- Ubicación: Cuenca del Tapajós, Brasil.

18. Impactos de cambio climático y uso de suelo en el flujo del río Tapajós:

- Metodología: Modelos de uso de suelo y clima con rutas de concentración representativa (RCP).
- Impactos económicos: Reducción del caudal estacional, afectando la hidroenergía y la agricultura.
- Fuente: (Farinosi, Arias, Lee, & et al, 2019)
- Ubicación: Cuenca del Tapajós.

19. Efectos potenciales del cambio climático en patrones de inundación en el Amazonas:

- Metodología: Modelos de vegetación y simulación de inundaciones.
- Impactos económicos: Cambios en la duración de las inundaciones, alterando la biodiversidad y servicios fluviales.
- Fuente: (Langerwisch, Rost, Gerten, & et al, 2012)
- Ubicación: Toda la cuenca del Amazonas.

20. Riesgos de cambio climático y uso de suelo en la Amazonía:

- Metodología: Análisis de modelos y límites de deforestación y calentamiento global.
- Impactos económicos: Cambios irreversibles en la biodiversidad y servicios ecosistémicos.
- Fuente: (Nobre, Sampaio, Borma, & et al, 2016)
- Ubicación: Toda la Amazonía.

21. *Evaluación de cambio climático en recursos hídricos del río Mundaú:*
- Metodología: Modelos SWAT y escenarios de cambio climático (RCP).
 - Impactos económicos: Reducción en caudales anuales y seguridad hídrica.
 - Fuente: (Andrade , Montenegro , Montenegro, & et al, 2020)
 - Ubicación: Cuenca del río Mundaú, noreste de Brasil.
22. *Impactos del cambio climático en los recursos hídricos del Amazonas a través de modelos dinámicos:*
- Metodología: Modelos de vegetación y simulación dinámica de caudales.
 - Impactos económicos: Reducción de la capacidad hidroeléctrica y disponibilidad hídrica para la agricultura.
 - Fuente: (Langerwisch, Rost, Gerten, & et al, 2012)
 - Ubicación: Toda la cuenca del Amazonas.
23. *Evaluación de la vulnerabilidad de los ecosistemas de agua dulce en la Amazonía:*
- Metodología: Modelos de conectividad hidrológica y análisis de políticas.
 - Impactos económicos: Costos asociados a la degradación de ecosistemas y pérdida de servicios ecosistémicos.
 - Fuente: (Castello & Macedo, 2016)
 - Ubicación: Ecosistemas acuáticos de la Amazonía.
24. *Reducción de caudales y su impacto en la energía y transporte en el Amazonas:*
- Metodología: Proyecciones de caudales con modelos hidrológicos.
 - Impactos económicos: Reducción de la generación de energía y aumento en costos de transporte fluvial.
 - Fuente: (Farinosi, Arias, Lee, & et al, 2019)
 - Ubicación: Cuenca del Tapajós.
25. *Sensibilidad de la Amazonía a las sequías en el siglo XXI:*
- Metodología: Análisis de modelos climáticos y flujos de carbono.
 - Impactos económicos: Pérdida de carbono y alteraciones en el balance de energía superficial.
 - Fuente: (Phillips, Aragão, Lewis, & et al, 2009)
 - Ubicación: Amazonas en general.
26. *Cambios hidrológicos y servicios ecosistémicos en el Amazonas:*
- Metodología: Análisis de escenarios climáticos y de uso del suelo.

- Impactos económicos: Pérdida de servicios ecosistémicos relacionados con el ciclo hidrológico.
- Fuente: (Nobre, Sampaio, Borma, & et al, 2016)
- Ubicación: Toda la Amazonía.

27. *Impactos proyectados en flujos extremos en subcuencas amazónicas:*

- Metodología: Modelos ORCHIDEE aplicados a proyecciones climáticas.
- Impactos económicos: Reducción de caudales bajos hasta un 50% en regiones del sur.
- Fuente: (Guimbertau, Ronchail, Espinoza, & et al, 2013)
- Ubicación: Subcuencas amazónicas.

28. *Proyecciones de patrones de inundación en el Amazonas:*

- Metodología: Modelo de simulación hidrológica con múltiples escenarios.
- Impactos económicos: Aumento en la duración de inundaciones, afectando cultivos y actividades económicas.
- Fuente: (Langerwisch, Rost, Gerten, & et al, 2012).
- Ubicación: Amazonas occidental y oriental.

29. *Impactos en los ecosistemas y conectividad del agua dulce:*

- Metodología: Evaluaciones de conectividad hidrológica y proyecciones de políticas.
- Impactos económicos: Pérdida de productividad pesquera y agua para consumo.
- Fuente: (Castello & Macedo, 2016)
- Ubicación: Cuenca del Amazonas.

30. *Análisis de los efectos climáticos en la cuenca del río Madeira:*

- Metodología: Modelos hidrológicos utilizando datos de precipitación y caudales históricos.
- Impactos económicos: Costos relacionados con la reducción del transporte fluvial y el aumento de eventos extremos.
- Fuente: (Junior Siqueira de, Tomasella, Rodríguez , & et al , 2013); (Rodríguez , Lopes Garofolo, Carriello, & et al, 2017); (Chan Chou & Correia Silva, 2023); (Molina Carpio , 2007)
- Ubicación: Río Madeira, Brasil.

31. *Evaluación del impacto climático en la conectividad hidrológica de las subcuencas amazónicas:*

- Metodología: Modelos ORCHIDEE y datos históricos de caudal y precipitación.
- Impactos económicos: Pérdida de conectividad hídrica afectando actividades agrícolas y pesqueras.
- Fuente: (Guimberteau, Ronchail, Espinoza, & et al, 2013)
- Ubicación: Subcuencas amazónicas.

32. *Impactos en los ecosistemas acuáticos debido a la deforestación y el cambio climático:*

- Metodología: Modelos integrados para analizar conectividad y biodiversidad hídrica.
- Impactos económicos: Reducción de servicios ecosistémicos y productividad pesquera.
- Fuente: (Castello & Macedo, 2016)
- Ubicación: Ecosistemas de agua dulce en la Amazonía.

33. *Patrones de precipitación y su influencia en las comunidades fluviales amazónicas:*

- Metodología: Proyecciones climáticas con escenarios de alta concentración de gases de efecto invernadero.
- Impactos económicos: Afectación de comunidades ribereñas por la disminución de caudales.
- Fuente: (Duffy, Brando, Asner, & et al, 2015)
- Ubicación: Amazonía occidental y oriental.

34. *Intensificación de los ciclos hidrológicos y su impacto en la Amazonía:*

- Metodología: Análisis de tendencias con modelos de precipitación y vapor de agua.
- Impactos económicos: Aumento en costos de mitigación de inundaciones y sequías.
- Fuente: (Gloor, M., Brien, Gabraith, & et al, 2013)
- Ubicación: Cuenca del Amazonas.

35. *Proyecciones de cambios en los patrones de inundación amazónicos:*

- Metodología: Modelos hidrológicos y climáticos integrados.
- Impactos económicos: Alteraciones en la productividad agrícola y pérdidas por eventos de inundación.
- Fuente: (Langerwisch, Rost, Gerten, & et al, 2012)
- Ubicación: Amazonas central y occidental.

36. *Evaluación de vulnerabilidades en la energía hidroeléctrica amazónica:*
- Metodología: Modelos de energía integrados con simulaciones de caudal.
 - Impactos económicos: Reducción de generación energética, aumento en costos operativos.
 - Fuente: (Mohor, Rodriguez, Tomasella, & et al, 2015)
 - Ubicación: Hidroeléctrica Teles Pires, Brasil.
37. *Proyecciones climáticas y su impacto en la agricultura amazónica:*
- Metodología: Escenarios climáticos CMIP5 y análisis del uso del agua.
 - Impactos económicos: Pérdidas en cultivos debido a la reducción de agua disponible.
 - Fuente: (Phillips, Aragão, Lewis, & et al, 2009)
 - Ubicación: Subcuencas amazónicas.
38. *Impactos del cambio climático en la producción agrícola y la economía del Amazonas Legal:*
- Metodología: Modelo de Equilibrio General Computable (CGE) para evaluar cambios en producción agrícola y uso de la tierra bajo escenarios climáticos.
 - Impactos económicos: Pérdida proyectada de 1.18% del PIB real para 2049, con impacto significativo en los sectores agrícola y de empleo.
 - Fuente: (Tanure, Miyajima, Magalhães, & et al, 2020)
 - Ubicación: Amazonas Legal, Brasil.
39. *Proyecciones de cambio climático y sus efectos en las inundaciones del Amazonas occidental:*
- Metodología: Modelo de superficie terrestre para analizar impactos hidrológicos bajo escenarios de emisiones RCP.
 - Impactos económicos: Incremento del 12% en inundaciones extremas con implicaciones para ecosistemas y economías ribereñas.
 - Fuente: (Zulkafli, Buytaert, Manz, & et al, 2016)
 - Ubicación: Amazonas occidental.
40. *Impactos del uso del suelo y cambio climático en los flujos del río Tapajós:*
- Metodología: Modelo integrado de superficie terrestre y rutas de ríos con escenarios de cambio climático.
 - Impactos económicos: Reducción de caudales de hasta el 20%, afectando sistemas hidroeléctricos y demanda agrícola.
 - Fuente: (Farinosi, Arias, Lee, & et al, 2019)

- Ubicación: Cuenca del Tapajós, Brasil.

41. *Eventos extremos de sequías e inundaciones en el Amazonas:*

- Metodología: Análisis histórico de eventos extremos y su relación con fenómenos climáticos como El Niño.
- Impactos económicos: Incremento en vulnerabilidad social y costos asociados a la gestión de desastres.
- Fuente: (Sena , De Deus , Freitas, & et al, 2012)
- Ubicación: Amazonas brasileño.

42. *Impactos del cambio climático en la hidrología del Amazonas medio y superior:*

- Metodología: Modelos hidrológicos WaterGAP2 bajo escenarios RCP 6.0 y 8.5.
- Impactos económicos: Reducción de flujos extremos y potencial afectación a la navegación y agricultura.
- Fuente: (Costa , Blanco , & -Jún, 2021a)
- Ubicación: Amazonía media y superior.

43. *Retroalimentaciones entre deforestación, clima e hidrología en el Amazonas suroeste:*

- Metodología: Modelos climáticos acoplados a hidrológicos para analizar balances de agua estacional.
- Impactos económicos: Aumento en la estacionalidad de flujos, con pérdidas en agricultura e hidroenergía.
- Fuente: (Lima , Coe , Filho, & et al, 2014)
- Ubicación: Cuencas de los ríos Juruá, Purus y Madeira.

44. *Evaluación de riesgos climáticos bajo calentamiento de 4 °C en la Amazonía:*

- Metodología: Modelos hidrológicos y climáticos con proyecciones extremas de calentamiento.
- Impactos económicos: Reducción de descargas fluviales y cambios en la distribución de biomas.
- Fuente: (Sampaio, Borma, Cardoso, & et al, 2018)
- Ubicación: Toda la Amazonía.

45. *Impactos del cambio climático en las comunidades ribereñas del río Negro:*

- Metodología: Análisis de tendencias hidroclimáticas y percepción comunitaria de impactos.

- Impactos económicos: Alteraciones en salud, educación y productividad agrícola.
- Fuente: (Vasconcelos , Pereira , Lopes , & et al, 2022)
- Ubicación: Río Negro, Brasil.

3. EL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA DEL RÍO AMAZONAS

3.1 LOS ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO

Los estudios efectuados con el propósito de comprender los efectos del cambio climático en la cuenca del río Amazonas han empleado diversos escenarios climáticos y socioeconómicos para establecer y dimensionar los impactos posibles. Estos escenarios ayudan a modelar cómo podrían evolucionar las condiciones climáticas, hidrológicas y ecológicas bajo diferentes contextos futuros. Se han identificado 10 escenarios que se han agrupado en 5 tipos, los cuales se describen a continuación:

3.1.1 Trayectorias de Concentración Representativa (RCP).

Los RCP son utilizados para representar diferentes trayectorias de concentración de gases de efecto invernadero, donde destacan:

- *RCP 4.5*: Representa un escenario de mitigación moderada, con un calentamiento limitado a ~2-3 °C para finales del siglo.
- *RCP 8.5*: Escenario más pesimista, con altas emisiones que podrían llevar a un calentamiento de 4-6 °C y alteraciones severas en la precipitación (Llopart, Reboita, & Da Rocha, Assessment of multi-model climate projections of water resources over South America CORDEX domain., 2019).

3.1.2 Reporte Especial de Escenarios de Emisiones (SRES).

Parte de las evaluaciones del IPCC anteriores a los RCP empleaban los siguientes:

- *SRES A1B*: Considera un equilibrio entre diferentes fuentes de energía y un calentamiento de ~3-4 °C para finales del siglo (Marengo, Chou, Kay, & et al, 2012).
- Escenarios A2 (alto crecimiento de emisiones) y B1 (desarrollo sostenible) son también comúnmente usados.

3.1.3 Escenarios de Cambio de Uso de Suelo.

Modelos como *Sustainability* (desarrollo sostenible) y *Fragmentation* (deforestación acelerada), combinan cambios en el uso del suelo con trayectorias climáticas, mostrando cómo la deforestación podría amplificar los efectos del cambio climático (Fonseca, Alves, Aguiar, & et al, 2019).

3.1.4 Modelos Regionales y Multimodelos.

- *RegCM4 y ETA-CPTEC*: Modelos climáticos regionales que detallan las variaciones locales en temperatura y precipitación. Utilizados en combinación con modelos globales como HadGEM y CMIP (Marengo, Chou, Kay, & et al, 2012).

3.1.5 Escenarios de Hibridación Climática y Socioeconómica.

Escenarios como los *Shared Socioeconomic Pathways (SSPs)* vinculados a las RCP integran variables socioeconómicas como población y economía con proyecciones climáticas (a continuación, dos ejemplos):

- *SSP1-2.6*: Mitigación máxima, con calentamiento limitado.
- *SSP5-8.5*: Escenario altamente industrializado y de altas emisiones (Carvalho, Oliveira, Pedersen, & et al, 2020).

Estos escenarios brindan un marco esencial para evaluar los posibles escenarios futuros de la cuenca del Amazonas, permitiendo el diseño de estrategias de mitigación y adaptación para proteger sus ecosistemas y comunidades.

Los escenarios muestran reducciones significativas en la precipitación anual y cambios en la estacionalidad del flujo fluvial debido al aumento de temperaturas y alteraciones en los patrones de circulación atmosférica. (Duffy, Brando, Asner, & et al, 2015), (Guimberteau, Ronchail, Espinoza, & et al, 2013). Una serie de modelos de simulación climática para la Amazonia, que se consideran representativos de investigaciones recientes con este propósito⁴⁶, indican una tendencia hacia la reducción de la precipitación anual en ciertas áreas y cambios en la estacionalidad del flujo fluvial, impulsados por el aumento de temperaturas y alteraciones en los patrones de circulación atmosférica. (Lucas, Silva, De Assis Salviano De Souza, & et al, 2022), (Llopart, Coppola, Giorgi, & et al, 2014), (Friedman, Bollasina, Gastineau, & et al, 2021), (Liao, Lan, Liang, & et al, 2024), (Baker, Garcia-Carreras, Buermann, & et al, 2021), (Guimberteau, Ronchail, Espinoza, & et al, 2013), (Sorribas, Paiva, Melack, & et al, 2016), (Liang, Lo, Lan, & et al, 2020), (Duffy, Brando, Asner, & et al, 2015), (Wang, Li, Zhu, & et al, 2018). Estos cambios podrían tener importantes implicaciones para la hidrología y el ecosistema de la región.

Cambios en la Precipitación y Estacionalidad:

- *Reducción de Precipitación*: Varios estudios proyectan una disminución de la precipitación en ciertas partes de la Amazonia, especialmente durante la estación seca, mientras que algunas áreas podrían experimentar un aumento durante la estación húmeda.

⁴⁶ Respuesta de CONSENSUS, 2024 a la pregunta: ¿Se puede considerar correcta la aseveración respecto a los modelos de simulación de cambio climático en la Amazonia: *los escenarios muestran reducciones significativas en la precipitación anual y cambios en la estacionalidad del flujo fluvial debido al aumento de temperaturas y alteraciones en los patrones de circulación atmosférica*? El medidor de consenso del algoritmo indicó 100%, Si, para 10 artículos relevantes escogidos por la IA y ofreció la siguiente respuesta: *La afirmación sobre los modelos de simulación de cambio climático en la Amazonia, que indican reducciones significativas en la precipitación anual y cambios en la estacionalidad del flujo fluvial debido al aumento de temperaturas y alteraciones en los patrones de circulación atmosférica, es en gran medida correcta.*

- *Cambios en la Estacionalidad*: Se espera una extensión de la estación seca en el centro de América del Sur, con un inicio tardío y un retiro temprano del monzón sudamericano.
- Además, se proyecta una disminución del flujo fluvial en ciertas áreas, como el río Xingú, debido a la reducción de la precipitación.

Impactos de la Temperatura y Circulación Atmosférica:

- *Aumento de Temperaturas*: El calentamiento global y las variaciones en la temperatura de la superficie del mar, especialmente en el Atlántico y el Pacífico, influyen significativamente en los patrones de precipitación y flujo fluvial en la Amazonia.
- *Patrones de Circulación*: Cambios en la circulación atmosférica, como el fortalecimiento de la circulación de Walker, han sido vinculados a variaciones en la precipitación y el ciclo hidrológico de la Amazonia.

3.2 MODELOS DE SIMULACIÓN

Los modelos climáticos e hidrológicos utilizados para abordar los impactos potenciales del cambio climático en la cuenca del Amazonas incluyen una variedad de enfoques regionales y globales que consideran las complejidades hidrológicas, climáticas y ecosistémicas de la región. Los principales modelos identificados son:

3.2.1 Modelos de Circulación General (GCMs).

- *Modelos globales que incluyen Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP)*: CMIP5 y CMIP6 para proyecciones climáticas de largo plazo. (Duffy, Brando, Asner, & et al, 2015).

El Proyecto de Intercomparación de Modelos de Escenarios (Scenario-MIP) lleva a cabo simulaciones de modelos del sistema terrestre basadas en futuros alternativos plausibles de emisiones y uso de la tierra. Los principales objetivos del Scenario-MIP son:

- Facilitar la investigación integrada que conduzca a una mejor comprensión de las consecuencias del sistema climático físico de los escenarios futuros y su impacto en los sistemas naturales y sociales, incluidas consideraciones de adaptación y mitigación.
- Proporcionar una base para abordar preguntas científicas específicas sobre los efectos climáticos de aspectos del forzamiento relevantes para la investigación basada en escenarios.
- Proporcionar una base para diversos esfuerzos internacionales que apuntan a mejorar los métodos para cuantificar las incertidumbres de proyección basadas en conjuntos de múltiples modelos.

- *RegCM4*: Un modelo climático regional que permite proyecciones más detalladas para Sudamérica, incluyendo configuraciones específicas para la cuenca del Amazonas (Llopart, Coppola, Giorgi, & et al, 2014).
- *ETA-CPTEC*: Un modelo climático regional utilizado para simular escenarios futuros de cambio climático en Sudamérica, con particular atención a la Amazonia (Marengo, Chou, Kay, & et al, 2012).

3.3 MODELOS MÁS USADOS

Entre los modelos hidrológicos aplicados de amplia difusión destacan los siguientes:

3.3.1 *MGB-IPH*

Modelo hidrológico que incluye simulaciones del régimen de inundaciones y descargas fluviales en la región (Sorribas, Paiva, Melack, & et al, 2016). El modelo MGB-IPH (Modelo de Grandes Bacias - Instituto de Pesquisas Hidráulicas) es un modelo hidrológico distribuido que simula el ciclo del agua en una cuenca hidrográfica, teniendo en cuenta las variaciones espaciales de las características del terreno, como el relieve, la vegetación y el suelo. Permite simular el comportamiento de los ríos, el flujo de agua subterránea y la interacción entre la tierra y la atmósfera. Evalúa el impacto de escenarios, como el cambio climático o la deforestación, en el ciclo del agua. Es adecuado para estudiar el cambio climático en la Amazonía, que es una región vasta y compleja, con una gran diversidad de ecosistemas y un ciclo hidrológico único. El MGB-IPH es capaz de representar esta complejidad, lo que lo hace ideal para estudiar los impactos del cambio climático en la región. El cambio climático está alterando los patrones de lluvia y temperatura en la Amazonía, lo que a su vez afecta el ciclo del agua. El MGB-IPH puede simular estas interacciones, permitiendo a los investigadores comprender mejor cómo el cambio climático está afectando los recursos hídricos de la región. La deforestación y el cambio de uso del suelo también tienen un impacto significativo en el ciclo del agua en la Amazonía, impactos que también pueden ser evaluados mediante el modelo MGB-IPH. Al trabajar con información geográfica detallada, permite estudios tanto a gran escala de toda la cuenca, como a escalas más pequeñas de subcuencas, y esto es muy importante para entender el impacto del cambio climático en diferentes áreas de la Amazonía.

3.3.2 *ORCHIDEE*

Modelo de superficie terrestre que puede proporcionar información valiosa sobre los cambios en la disponibilidad de agua y la escorrentía. Al combinar los resultados de ORCHIDEE con otros modelos hidrológicos y datos observacionales, es posible obtener una imagen más completa de cómo el cambio climático está afectando los caudales extremos (Guimbertau, Ronchail, Espinoza, & et al, 2013). Modelo ORCHIDEE: (Organizing Carbon and Hydrology In Dynamic EcosystEms) es un modelo de superficie terrestre que simula los flujos de carbono, agua y energía entre la tierra y la atmósfera. Este modelo permite entender cómo la vegetación responde a los cambios en el clima, y cómo estos cambios a su vez afectan el ciclo del carbono. Permite evaluar el impacto del cambio climático en la vegetación y los ciclos biogeoquímicos al pronosticar cómo los ecosistemas terrestres absorberán o liberarán carbono en el futuro. ORCHIDEE permite simular cómo la

Amazonía es un ecosistema altamente sensible a los cambios en la temperatura y como afecta la precipitación en su capacidad para almacenar carbono, lo que es fundamental para comprender el cambio climático global.

El cambio climático puede alterar los patrones de lluvia y temperatura en la Amazonía, lo que a su vez afecta la salud y la función de la vegetación. ORCHIDEE permite estudiar estas interacciones complejas. Igualmente ayuda a analizar como la deforestación afecta los ciclos biogeoquímicos y como interactúa con el cambio climático, lo que es muy importante para la región Amazónica, ya que la deforestación es una gran amenaza.

3.3.3 *Hydro-BID y VIC.*

Utilizados para la simulación de flujos hidrológicos en diferentes subcuencas del Amazonas, analizando el impacto combinado de cambios climáticos y uso del suelo (Dalagnol, Borma, Mateus, & et al, 2017). El Modelo Hydro-BID es un sistema integrado de modelación hidrológica desarrollado por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID). Su objetivo principal es apoyar la gestión y planificación de los recursos hídricos, permitiendo simular la disponibilidad de agua presente y futura. Permite evaluar el impacto del cambio climático en los recursos hídricos al pronosticar la disponibilidad de agua en diferentes escenarios. También ayuda a comprender los impactos de la deforestación y los cambios en el uso del suelo en el ciclo hidrológico. El Modelo VIC (Variable Infiltration Capacity) es un modelo de balance hídrico de superficie terrestre, ampliamente utilizado para simular los flujos de agua y energía entre la tierra y la atmósfera. Es un modelo distribuido, lo que significa que puede representar la variabilidad espacial de las características del terreno. Al simular el ciclo hidrológico a gran escala, permite evaluar el impacto del cambio climático en la disponibilidad de agua y la escorrentía y pronosticar sequías e inundaciones. De este modo ayuda a comprender cómo el cambio climático afecta los patrones de lluvia y la disponibilidad de agua en la región y proporciona información valiosa para evaluar los riesgos de sequías e inundaciones en la Amazonía.

3.4 COBERTURAS ESPACIALES DE LOS MODELOS DE SIMULACIÓN

Los modelos de simulación empleados en la cuenca del Amazonas se caracterizan por abarcar diferentes coberturas espaciales, que van desde escalas locales y regionales hasta simulaciones a nivel continental y global. Estas coberturas permiten conocer la complejidad geográfica y climática de la región, lo que facilita evaluar impactos específicos del cambio climático en diferentes subregiones. Las coberturas espaciales varían según la escala de análisis y objetivos del estudio. Desde simulaciones de alta resolución para subcuencas específicas hasta evaluaciones continentales y globales, estas coberturas permiten un análisis integral de los impactos climáticos en la región. Las coberturas se han agrupado en 4 categorías:

3.4.1 Modelos Regionales.

Los modelos climáticos regionales, como RegCM4 y ETA-CPTEC, son comúnmente utilizados para simular las condiciones locales en la Amazonia. Estos modelos operan con una resolución espacial de mayor detalle (40 km) que permite evaluar variaciones climáticas y de uso del suelo en subcuencas y áreas específicas de la región (Marengo,

Chou, Kay, & et al, 2012). Por ejemplo, ETA-CPTEC, un modelo brasileño, ha sido utilizado para analizar los impactos climáticos en subcuencas como la del río Purus, que presenta desafíos específicos debido a su vulnerabilidad a sequías y cambios en los patrones de precipitación (Dalagnol, Borma, Mateus, & et al, 2017).

3.4.2 Multimodelos.

Las coberturas espaciales multimodal, como las proporcionadas por los conjuntos de modelos CMIP5/CMIP6, abarcan toda la cuenca del Amazonas e incorporan datos globales para analizar las conexiones entre la Amazonia y los sistemas climáticos globales. Estas simulaciones permiten identificar tendencias generales, como aumentos en la frecuencia de sequías en el este de la cuenca y mayor incidencia de inundaciones en el oeste (Doughty, Metcalfe, Girardin, & et al, 2015).

3.4.3 Simulaciones de Uso del Suelo.

Modelos como ORCHIDEE y MGB-IPH integran datos de uso del suelo para simular la interacción entre deforestación, cambio climático y dinámica hidrológica a nivel subregional. Estos modelos ofrecen resoluciones espaciales que oscilan entre 10 y 50 km, permitiendo análisis precisos en subcuencas como las del Tapajós y del Xingu (Guimbertau, Ronchail, Espinoza, & et al, 2013).

3.4.4 Simulaciones Continentales.

Las proyecciones regionales de cambio climático para la segunda mitad del siglo XXI se han elaborado para América del Sur, en el marco del proyecto regional CREAS (*Cenarios Regionalizados de Clima Futuro de América del Sur*). Suramérica, y en particular la Amazonía, es una región climáticamente compleja. Las interacciones entre los sistemas climáticos del Atlántico y el Pacífico, así como la influencia de la topografía y la vegetación, generan patrones climáticos únicos. Por ello, el estudio del cambio climático en esta región requiere modelos que puedan capturar estas interacciones a escala continental. Los Modelos Climáticos Globales (MCGs), aunque proporcionan información valiosa, pueden tener limitaciones en la resolución espacial para representar procesos locales en la Amazonía. Los Modelos Climáticos Regionales (MCRs), se enfocan en áreas geográficas más pequeñas y proporcionan una mayor resolución espacial, por ello se utilizan para obtener información a escala regional a partir MCGs. Esta combinación de modelos resulta muy útil para estudiar los impactos del cambio climático en la Amazonía. Se anidaron tres modelos climáticos regionales (Eta CCS, RegCM3 y HadRM3P) dentro del modelo global HadAM3P. De este modo se incorporaron las interacciones entre los sistemas climáticos del Atlántico y el Pacífico y se obtuvieron resoluciones menores (100-200 km) para proyectar escenarios a largo plazo (Markewitz, Devine, Davidson, & et al, 2010).

3.5 CONSIDERACIONES SOBRE IMPACTOS EN LA CUENCA AMAZÓNICA Y EN OTRAS REGIONES TROPICALES

3.5.1 Alteración del sistema regulador del ciclo de carbono.

La selva amazónica es un centro de biodiversidad con un impacto global. Su desaparición no solo liberaría cantidades significativas de carbono a la atmósfera, sino que también eliminaría un sistema regulador crucial dentro del ciclo del carbono, lo que tendría consecuencias globales drásticas. Estos cambios alteran las condiciones ambientales regionales, acelerando aún más estas transformaciones (Caesar, Sakschewski, Andersen, & et al, 2024).

3.5.2 Anomalías en el flujo de humedad Amazonia -Altiplano.

En el trabajo de (Gutierrez-Villareal, J.C., Espinoza, W. Lavado-Casimiro, & et al, 2024), se afirma que el año hidrológico 2022-23 en el sistema hidrológico del Lago Titicaca, el Río Desaguadero y el Lago Poopó (TDPS) sobre el Altiplano Sudamericano, constituyó un período históricamente seco. La fuerte estacionalidad de las lluvias en esta región está relacionada con el anticiclón de niveles superiores sobre el Altiplano Peruano-Boliviano, que potencia el transporte zonal de humedad desde la cuenca del Amazonas hacia el Altiplano y favorece la convección sobre la región. Utilizando un conjunto de datos hidroclimáticos, de temperatura de la superficie del mar (SST) y de reanálisis atmosférico, los autores encuentran que esta nueva sequía histórica se asoció con anomalías en el flujo de humedad hacia el sur, lo que redujo la entrada de vientos cargados de humedad desde la cuenca del Amazonas al sistema TDPS. Este tipo de anomalías en el transporte de humedad no se habían visto al menos desde la década de los 50. Los autores sugieren que se realicen más investigaciones sobre cómo el calentamiento global y la deforestación en la cuenca del Amazonas impactan los Andes tropicales del sur y la región del altiplano.

3.6 IMPACTOS SOBRE EL CLIMA AMAZÓNICO SEGÚN LOS MODELOS DE SIMULACIÓN

Los modelos climáticos e hidrológicos en general han proyectado impactos significativos del cambio climático sobre el clima de la cuenca del Amazonas que se resumen a continuación.

Se identifican seis tipos de impactos:

- a) Reducción de precipitaciones y cambios de estacionalidad.
- b) Extensión de la temporada seca.
- c) Aumento de la temperatura.
- d) Aumento de caudales máximos y mínimos.
- e) Reducción en la evapotranspiración.
- f) Aumento en el riesgo de incendios forestales.

3.6.1 Reducción de precipitaciones y cambios de estacionalidad.

3.6.1.1 Incrementos de lluvia en el este y disminuciones en el oeste.

Bajo un escenario de deforestación, (Llopart M. , Reboita, Coppola, & et al, 2018) destacan un patrón dipolar con una disminución del 7.9% en las precipitaciones en el **oeste** del

Amazonas versus un aumento del 8.3% en el **este**. Para la simulación se usó información climática del periodo 1979 – 2009 y se reemplazaron los árboles de hoja perenne de hoja ancha con pasto C3⁴⁷. Las plantas C3 están mejor adaptadas a ambientes frescos y húmedos, donde la fotorrespiración es menos pronunciada.

3.6.1.2 Reducción de flujo de humedad desde la Amazonia al norte de la América del Sur.

(Ruiz-Vásquez , Arias, Martínez, & et al, 2020) encontraron que la deforestación en el Amazonas reduce la humedad transportada al norte de América del Sur en un 40-43% anual.

3.6.1.3 Incremento de la frecuencia de extremos cálidos y húmedos.

(Wu, Miao, Sun, & et al, 2021) aplicaron los modelos del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP6) y encontraron que la frecuencia promedio de extremos cálidos y húmedos aumentará a nivel mundial entre 2070 y 2099, sin embargo, la Amazonía es una de las zonas donde hay mayor incertidumbre en los modelos climáticos. El estudio indica un incremento significativo en la frecuencia de eventos climáticos extremos cálidos (combinaciones de calor con sequía o humedad) en el futuro lo que coincide con las proyecciones para la Amazonía. Por el contrario, se espera una reducción en la frecuencia de eventos climáticos extremos fríos (combinaciones de frío con sequía o humedad). Los escenarios de Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP) indican que, a medida que aumentan las emisiones de gases de efecto invernadero, se intensifican los extremos cálidos.

En consecuencia, la Amazonía podría enfrentar olas de calor más frecuentes y prolongadas, combinadas con alta humedad, lo que tendría impactos significativos en la salud humana y en los ecosistemas. Los extremos cálidos/secos podrían llevar a sequías más intensas, mientras que los extremos cálidos/húmedos podrían resultar en inundaciones más frecuentes.

Las comunidades indígenas y locales que dependen de los recursos naturales de la Amazonía serían particularmente vulnerables a estos cambios.

3.6.1.4 Posibilidad de eventos de inflexión.

(Parry, Ritchie, & Cox, 2022) informan que los modelos climáticos, sugieren que podrían producirse *eventos de inflexión* localizados en la Amazonía con niveles de calentamiento global superiores a 1,5 °C y un sostenido aumento de la deforestación.

3.6.2 Extensión de la Temporada Seca.

⁴⁷ Una planta C3 se define como un tipo de planta que produce un compuesto de tres carbonos (ácido 3-fosfoglicérico) mediante el ciclo de Calvin-Benson. Estas plantas constituyen alrededor del 95 % de todas las plantas verdes de la Tierra y están adaptadas a regiones con luz solar, temperatura y disponibilidad de agua moderadas. [<https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/c3-plant>]

(Marengo, Chou, Kay, & et al, 2012) proyectan una extensión de la estación seca en la Amazonia oriental bajo escenarios de altas emisiones. El modelo Eta-CPTEC se configuró con un tamaño de cuadrícula de 40 km y se ejecutó durante 1961-1990 para representar el clima de referencia y 2011-2100 para simular posibles cambios futuros. Se usó el escenario de emisiones SRES A1B es uno de los escenarios desarrollados por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), que describe un futuro con un crecimiento económico muy rápido, una población mundial que alcanza su punto máximo a mediados de siglo y la introducción de tecnologías nuevas y más eficientes. Se realizaron múltiples simulaciones del clima futuro, utilizando un escenario específico de emisiones de gases de efecto invernadero. Aunque todos los modelos siguieron el mismo escenario, cada uno predijo un nivel de calentamiento ligeramente diferente debido a las variaciones en la forma en que simulan el sistema climático.

(Drumond, Marengo, Ambrizzi, & et al, 2014) utilizaron los datos de reanálisis 1979-2012 para investigar el papel de la humedad en la cuenca del Amazonas en el balance hidrológico regional a lo largo del año. El Atlántico tropical es la fuente remota de humedad más importante para la cuenca del Amazonas. El Atlántico Norte tropical (NA) contribuyó principalmente durante el verano austral, mientras que la contribución del Atlántico Sur tropical (SA) prevaleció durante el resto del año. Al mismo tiempo, la contribución de humedad de la propia cuenca del Amazonas es principalmente para el suministro de humedad al sureste de América del Sur. El transporte desde la Amazonía hacia los subtrópicos aumentó durante los años de El Niño y se redujo durante La Niña. Observaron cambios estacionales significativos en la Amazonia bajo eventos El Niño y La Niña, agravando la duración de la temporada seca.

(Sy & Quesada, 2020) establecen que los *cambios futuros en la cobertura terrestre modifican significativamente los extremos climáticos proyectados*. El estudio utiliza modelos del sistema terrestre bajo escenarios de cambio de cobertura terrestre (RCP8.5 y RCP2.6) para demostrar cómo estos cambios afectan los índices meteorológicos extremos: *Bajo el escenario RCP 8.5, el LCC futuro reduce drásticamente las proyecciones globales de extremos de precipitaciones altas en un 22%*. Esto indica una disminución significativa en la cantidad de lluvia intensa. Además, se señala que *considerar el LCC⁴⁸ disminuye sus proyecciones regionales en más del 70 % en el noreste de Brasil*. Esto confirma que la deforestación y los cambios en el uso del suelo intensifican las sequías. Los autores también indican que *bajo un escenario RCP 2.6, los impactos globales del LCC son similares, pero de menor magnitud, mientras que, a escala regional en la Amazonia, el LCC mejora las proyecciones de sequía*". Esto significa que, incluso si se toman medidas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (RCP2.6), los cambios en la cobertura terrestre seguirán teniendo un impacto en los extremos climáticos, especialmente en regiones como la Amazonía.

3.6.3 Aumento de la Temperatura.

(Silva, Capistrano, Veiga, & et al, 2023) evaluaron la precipitación, la temperatura y un índice de riesgo de incendios del conjunto de simulaciones del modelo Eta acoplado con tres modelos climáticos globales diferentes para la cuenca amazónica. Los datos

⁴⁸ LCC: Land Climate Change o Cambio Climático relacionado con el Uso de la Tierra

comparativos corresponden a la estación seca del periodo 1979 – 2005. El modelo subestimó la temperatura máxima y a 2 m en toda la región, pero mostró una correlación espacial estadísticamente significativa con los datos de referencia. La precipitación se sobreestimó en la Amazonia, de acuerdo con las principales fuentes de humedad analizadas. El índice de sequía Keetch-Byram (KBDI) no se vio afectado significativamente por el sesgo encontrado en la temperatura y la precipitación, y el conjunto mejoró en relación con las simulaciones de los miembros individuales.

Según (Costa & Foley, 2000) se espera que la cuenca amazónica experimente al menos dos cambios ambientales importantes durante las próximas décadas y siglos: 1) áreas cada vez mayores de bosque se convertirán en pastizales y tierras de cultivo, y 2) las concentraciones de CO₂ atmosférico seguirán aumentando. En este estudio, los autores utilizan el modelo de circulación atmosférica general GENESIS del Centro Nacional de Investigación Atmosférica, acoplado al Simulador Integrado de la Biosfera, para determinar los efectos combinados de la deforestación a gran escala y el aumento de las concentraciones de CO₂ (incluidos los efectos fisiológicos y radiativos) en el clima amazónico. Las series históricas corresponden a CO₂ desde 1900-2000 y deforestación 1980-2000. Las simulaciones corresponden CO₂ 2001-2150 y deforestación 2000-2150. De 2150 a 2200 se supuso que se había alcanzado el máximo de deforestación. En estas simulaciones, la deforestación reduce la precipitación promedio de la cuenca en 0,73 mm/ día. El efecto general de las concentraciones duplicadas de CO₂ en la Amazonia es un aumento en la precipitación promedio de la cuenca de 0,28 mm/día. El efecto combinado de la deforestación y el aumento de las concentraciones de CO₂, incluidas las interacciones entre los procesos, es una disminución de la precipitación media de la cuenca de 0,42 mm/día. Si bien los efectos de la deforestación y el aumento de las concentraciones de CO₂ en la precipitación tienden a contrarrestarse entre sí, ambos procesos contribuyen a calentar la cuenca amazónica. El efecto de la deforestación y el aumento de las concentraciones de CO₂ tiende a aumentar la temperatura de la superficie, principalmente debido a la disminución de la evapotranspiración y el efecto radiativo del CO₂. El efecto combinado de la deforestación y el aumento de las concentraciones de CO₂ incluidas las interacciones entre los procesos, aumenta la temperatura media de la cuenca en aproximadamente 3,58 °C.

(Carvalho, Oliveira, Pedersen, & et al, 2020) confirman el aumento de temperatura en la Amazonia, señalando que *las tendencias anuales para el período 1982-2015 sugieren aumentos significativos de temperatura de 0,2°C a 0,3°C/década*. Además, indican que *las proyecciones climáticas para la Amazonía sugieren, entre otros resultados, un aumento en el rango de 1,3 °C (límite inferior bajo SSP1-2.6) a 6,5 °C (límite superior bajo SSP5-8.5)*, lo que respalda las proyecciones de futuros aumentos de temperatura bajo diferentes escenarios. El informe demanda poner atención a la vulnerabilidad del sureste de la cuenca, al señalar que: *a pesar de la incertidumbre con respecto a las proyecciones, es posible que se produzcan cambios como la muerte regresiva de los bosques y la sabanización, especialmente en el sureste de la Amazonía, para finales de siglo*. Confirman que la

deforestación es un factor importante, que, combinado con los aumentos de temperatura y cambios en las precipitaciones, agudizan la vulnerabilidad de la zona.

3.6.4 Aumentos en los Caudales Máximos y Mínimos.

(Sorribas, Paiva, Melack, & et al, 2016) predicen para el periodo 2070 -2099 incrementos de 9-18.3% en los caudales máximos en el sector occidental de la cuenca del río Amazonas, pero reducciones del 15.9% en el sector oriental.

(Guimberteau, Clais, Ducharne, & et al, 2017) reportaron disminuciones del 22% en el caudal del río Tapajós en el sureste amazónico para 2100. Se quería medir exactamente cuánto afecta la deforestación al clima, por lo que crearon simulaciones con diferentes grados de deforestación. De esta manera, podrían comparar los resultados y ver cómo cambia el clima a medida que se pierden más bosques. Para ello, utilizaron modelos climáticos (LSM). Crearon tres escenarios diferentes, cada uno con un nivel distinto de deforestación: desde una disminución del 7% hasta una del 34% de los bosques a lo largo de este siglo. Al comparar los resultados de estos tres escenarios, se pudo aislar y estudiar el impacto adicional que tiene la deforestación.

LSM (Land Surface Models): Modelos de la superficie terrestre. Son herramientas informáticas que simulan cómo interactúa la tierra con la atmósfera, incluyendo procesos como el clima, la vegetación y el agua.

LCC (Land Cover Change): Cambio en la cobertura del suelo. Se refiere a las modificaciones en el tipo de vegetación y el uso del suelo, como la conversión de bosques en tierras de cultivo.

Escenarios de LCC contrastados: Diferentes situaciones hipotéticas que muestran distintos grados de cambio en la cobertura del suelo, en este caso, diferentes niveles de deforestación.

En promedio, en la cuenca amazónica sin deforestación, los resultados del GCM indican un aumento de temperatura de 3,3 °C para 2100, lo que aumenta la demanda evaporativa, por lo que la precipitación aumenta en un 8,5 %.

La descarga mínima del río Tapajós se reduce en un 31 % en 2100.

Las proyecciones de los efectos del cambio climático en la cuenca del Amazonas indican un aumento y una disminución en la descarga fluvial y la inundación. Específicamente, se proyecta un aumento de la descarga media y máxima en los grandes ríos que drenan los Andes orientales en el noroeste de la Amazonía, mientras que se espera una disminución de la descarga fluvial (principalmente en la estación seca) y una disminución de la extensión de las inundaciones en aguas bajas (mínimo anual) en las cuencas orientales

3.6.5 Reducción en la Evapotranspiración.

(Wu, Schurgers, Ahlström, & et al, 2017), identificaron impactos significativos asociados al cambio en el uso del suelo y la cubierta terrestre en el clima y la vegetación tanto a nivel

local como remoto en América del Sur, incluyendo la Amazonía. Encontraron una disminución del 10% en la evapotranspiración en áreas deforestadas del Amazonas.

(Bagley, Desai, Harding, & et al, 2014) identificaron impactos biogeofísicos significativos que reducen la evapotranspiración durante eventos de sequía. Se investigó cómo la expansión de tierras agrícolas (deforestación) y la variabilidad climática (sequías y lluvias extremas) interactúan para afectar el ciclo del agua en la cuenca del Amazonas. Estos dos factores no actúan por separado, se influyen mutuamente creando efectos complejos.

Los autores realizaron simulaciones para los meses de abril a septiembre, representando años de sequía, normales y de mucha lluvia.

Las sequías intensifican los efectos de la deforestación, especialmente al disminuir el "flujo de calor latente" (la energía utilizada para evaporar agua). Hay menos agua que se evapora de la tierra y vuelve a caer como lluvia, lo que hace que las sequías sean más críticas.

En resumen, la deforestación y la sequía se combinan para reducir la lluvia, creando un ciclo negativo.

3.6.6 Aumentos en el Riesgo de Incendios Forestales.

3.6.6.1 Resiliencia de los bosques.

(Flores, Montoya, Sakschewski, & et al, 2024) sugieren una disminución en la resiliencia de los bosques desde principios del 2000, posiblemente como resultado de los cambios globales. Señalan que, aunque los bosques amazónicos fueron resilientes durante 65 millones de años, *actualmente, la región está cada vez más expuesta a un estrés sin precedentes*, enumerando como factores de estrés el *aumento de las temperaturas, las sequías extremas, la deforestación y los incendios*, que son cambios globales que afectan a la Amazonía. Por lo tanto, las retroalimentaciones ancestrales entre el bosque y las condiciones ambientales están siendo sustituidas por nuevas retroalimentaciones que modifican la resiliencia del ecosistema y en consecuencia el bosque está perdiendo su capacidad para recuperarse de las perturbaciones.

El estudio predice que para el 2050, entre el 10% y el 47% de los bosques amazónicos estarán expuestos a perturbaciones agravadas que podrían desencadenar transiciones inesperadas en los ecosistemas e incrementar el cambio climático regional.

3.6.6.2 Áreas protegidas y territorios indígenas.

(Torres-Amaral, Anjos, Vieira, & et al, 2023) utilizando datos actuales (1970-2000) y futuros (2041-2060) de temperatura del aire y precipitación anual promedio con una resolución de 10 km, evaluaron las velocidades climáticas en todo el bioma amazónico y las velocidades climáticas⁴⁹ promedio de Áreas Protegidas (AP) y Tierras Indígenas (TI).

⁴⁹ La velocidad climática es un concepto que se utiliza para describir la rapidez con la que las condiciones climáticas están cambiando en un área determinada. Mide la velocidad a la que las temperaturas y otros aspectos del clima se desplazan a través de un paisaje. Informa sobre a qué velocidad las especies y los

Los resultados muestran que los efectos de la velocidad hacia atrás⁵⁰ serán mayores que los de la velocidad hacia adelante en el bioma amazónico⁵¹

La evaluación del riesgo climático basada en la velocidad muestra que la extensión de las zonas con alta velocidad de retroceso (32,4%) es mayor que la de avance (5,85%). Se registra un gran número de Áreas Protegidas (AP) y Territorios Indígenas (TI) con velocidades de avance bajas (31,3%), en relación con las de retroceso (16,3%). Además, un mayor porcentaje de AP e TI experimentan bajas velocidades combinadas de avance y retroceso (11,4%) que altas velocidades combinadas (3,1%). Esta tendencia destaca el hecho de que el menor número de AP clasificadas con altas velocidades puede subestimar la amenaza real de riesgo climático a la que se verán sometidas. En conclusión, *a pesar del importante papel de las AP y las TI como herramientas de conservación, no son inmunes a los efectos del cambio climático, por lo que serán necesarias nuevas estrategias de gestión, específicas para cada área, que permitan la adaptación a los cambios globales*. Lo cual quiere decir que los riesgos son reales, a pesar de los porcentajes registrados.

Se encontró una gran extensión de climas no análogos para velocidades retrógradas en la Amazonía central, lo que indica que las altas temperaturas y los cambios en los patrones de precipitación en esta región superarán la variabilidad histórica de todo el bioma, convirtiéndola en una cobertura climática potencialmente aislada e inadecuada para las especies en el futuro.

Los autores consideran que la Amazonía es una de las regiones globales con mayor riesgo de desarrollar distanciamientos entre climas análogos actuales y futuros, y la aparición de condiciones climáticas sin análogos en el pasado. La investigación se centra en determinar la velocidad climática con base en análogos climáticos futuros y pasados, utilizando direcciones hacia adelante y hacia atrás en la red de Áreas Protegidas de la Amazonía, con el fin de evaluar el riesgo climático de estas áreas al cambio climático y verificar su efectividad en el mantenimiento de las condiciones climáticas actuales.

3.6.6.3 Factores de riesgo de incendios forestales.

(Silva, Capistrano, Veiga, & et al, 2023) encontraron que los factores de riesgo claves en relación con los incendios de vegetación son: la deforestación y el cambio climático. La sequía y la deforestación duplican el riesgo de incendios en el Amazonas oriental. La deforestación es un factor crítico, ya que las áreas deforestadas son más susceptibles a los incendios. El cambio climático influye en las condiciones meteorológicas, aumentando las temperaturas y alterando los patrones de lluvia, lo que puede incrementar la sequedad y, por

ecosistemas necesitan moverse o adaptarse para seguir las condiciones climáticas a las que están acostumbrados

⁵⁰ Las velocidades climáticas hacia atrás implican mirar hacia el pasado para encontrar análogos climáticos. Es decir, buscar lugares donde el clima actual se asemeje al clima que existía en otro lugar en el pasado.

⁵¹ Las velocidades climáticas hacia adelante buscan predecir hacia dónde se moverán las condiciones climáticas actuales de un lugar determinado en el futuro. Esto implica analizar cómo las temperaturas, las precipitaciones y otros factores climáticos evolucionarán y se redistribuirán geográficamente.

ende, el riesgo de incendios. Respecto a las condiciones meteorológicas: la temperatura, la precipitación y la sequedad son variables cruciales.

El índice de sequía Keetch-Byram (KBDI) proporciona una herramienta útil para evaluar el riesgo. La estación seca es un periodo de alto riesgo. Gran parte de los incendios en la Amazonía son provocados por actividades humanas, como la expansión agrícola y ganadera. La quema de pastizales y de restos de deforestación es una práctica que contribuye al incremento de los incendios. El índice KBDI es útil para evaluar el riesgo de incendios, a pesar de las posibles inexactitudes en las simulaciones de temperatura y precipitación. Los incendios forestales en la Amazonia se concentran principalmente en Brasil y Bolivia.

3.6.6.4 Factores de perturbación y propensión a incendios de vegetación.

(Davidson, Araújo, Artaxo, & et al, 2012) afirman que el riesgo de incendios forestales en la Amazonía está aumentando debido a la combinación de la expansión agrícola y variabilidad climática. La expansión agrícola conlleva la deforestación, que a su vez aumenta la vulnerabilidad a los incendios. La variabilidad climática, incluyendo las sequías, juega un papel crucial en el riesgo de incendios. Aunque los bosques amazónicos muestran cierta resiliencia a sequías moderadas, las sequías intensas aumentan significativamente el riesgo. La interacción entre deforestación, incendios y sequía es especialmente peligrosa. Esta interacción puede llevar a pérdidas de almacenamiento de carbono y cambios en los patrones de precipitación y descarga de ríos.

Hay señales de que la Amazonía está transitando hacia un régimen dominado por perturbaciones. Las sequías, especialmente cuando coinciden con áreas deforestadas, aumentan drásticamente el riesgo de incendios de gran magnitud. La pérdida de almacenamiento de carbono debido a los incendios contribuye al cambio climático global. Los cambios en los patrones de precipitación y descarga de ríos pueden tener impactos significativos en las comunidades locales y en la disponibilidad de agua. Las zonas sur y este de la Amazonía son las que presentan mayor riesgo.

(Cano, Shevliakova, Malyshev, & et al , 2022) revisaron la contribución de los bosques tropicales como importante sumidero de emisiones de carbono antropogénicas, esencial para frenar la acumulación de CO₂ atmosférico y amortiguar los impactos del cambio climático.

La respuesta de los bosques tropicales a fenómenos meteorológicos extremos más frecuentes y perturbaciones de larga recuperación, como los incendios, sigue siendo incierta. Contrastan los análisis de datos de campo y la teoría ecológica que plantean inquietudes sobre la posibilidad de que la Amazonía cruce un punto de inflexión que conduzca a una pérdida catastrófica de bosques tropicales con los resultados de los modelos climáticos que proyectan consistentemente un sumidero tropical mejorado.

La investigación de (Cano, Shevliakova, Malyshev, & et al , 2022) muestra una respuesta heterogénea de las reservas de carbono amazónicas en GFDL-ESM4.1. Este es un Modelo del Sistema Terrestre (ESM) que simula perturbaciones dinámicas y competencia entre árboles y pastos estructurada en altura. La mayor productividad debido a la fertilización con

CO₂ promueve aumentos en la biomasa forestal que, en escenarios de bajas emisiones, perduran hasta finales de siglo. En condiciones de altas emisiones, las tendencias positivas se revierten después de 2060, cuando los incendios simulados provocan la pérdida de bosques que resulta en una disminución del 40% en la biomasa de los bosques tropicales para 2100.

Los incendios proyectados ocurren en condiciones secas asociadas con El Niño Oscilación del Sur y la Oscilación Multidecadal Atlántica, una respuesta observada en las condiciones climáticas actuales, pero acelerada por una disminución general en la precipitación. El análisis de las tendencias proyectadas revela que las disminuciones en la humedad del suelo y la humedad relativa provocarán el aumento de la prevalencia de incendios forestales en la Amazonía bajo el escenario SSP5-8.5.

3.7 LOS MODELOS HIDROLÓGICOS BAJO CONDICIONES DE CAMBIO CLIMATICO

Los modelos hidrológicos desempeñan un papel crucial en la predicción de los impactos del cambio climático en toda cuenca hidrográfica y son la base para poder entender y priorizar los posibles impactos. Las proyecciones en la cuenca amazónica muestran tendencias hacia una mayor estacionalidad (variabilidad de la precipitación a lo largo de un año calendario). Se esperan reducciones significativas en los caudales de ríos y afluentes durante la estación seca. La integración de diferentes modelos permite mejorar la precisión y priorización para entender mejor los riesgos futuros para la gestión sostenible de los recursos hídricos, planificación socioeconómica, planes de desarrollo, etc.

Principales impactos evidenciados por los modelos hidrológicos identificados:

- 1 **MGB-IPH.** Este modelo es ampliamente utilizado para simular caudales y áreas de inundación en la cuenca del Amazonas. Proyecciones basadas en datos del IPCC CMIP5⁵² muestran un aumento del caudal máximo en el noroeste (+18.3%) y una reducción en el este durante la estación seca (Sorribas, Paiva, Melack, & et al, 2016).
- 2 **RegCM4 (Regional Climate Model).** Este modelo regional acoplado con modelos globales (HadGEM, GFDL, MPI) proyecta una extensión de la estación seca en el Amazonas central, con una disminución de la precipitación en un 12% (Llopart, Coppola, Giorgi, & et al, 2014).
- 3 **SWAT (Soil and Water Assessment Tool).** Utilizado en cuencas amazónicas poco monitoreadas, como la del río Jari. Simula el balance hídrico y caudales con alta precisión, especialmente en regiones tropicales (Rufino, Gücker, Famarzi, & et al, 2023).
- 4 **ORCHIDEE (Organizing Carbon and Hydrology in Dynamic Ecosystems).** Utilizado para modelar variaciones de caudales extremos. Proyecciones indican una

⁵² CMIP son las siglas de "Coupled Model Intercomparison Project" (Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados). En el contexto de la climatología, se refiere a un proyecto internacional que coordina y estandariza experimentos con modelos climáticos globales. Estos modelos simulan el sistema climático de la Tierra y se utilizan para comprender mejor el cambio climático y hacer proyecciones futuras.

reducción del 10% en los caudales mínimos del río Xingú debido a disminuciones en la precipitación (Guimbertau, Ronchail, Espinoza, & et al, 2013).

- 5 **ED2+R (Ecosystem Demography model with Routing).** Este modelo integra procesos ecosistémicos y rutas hidrológicas, proyectando reducciones del 20% en los caudales del río Tapajós, con un retraso de 1.5 meses en la temporada húmeda (Pereira, Farinosi, Arias, & et al, 21).
- 6 **VIC (Variable Infiltration Capacity)** El modelo VIC se aplica para evaluar la sensibilidad hidrológica a nivel global. Proyecciones muestran que las cuencas tropicales, como la del Amazonas, podrían experimentar reducciones del caudal anual a pesar del aumento de la precipitación proyectada en algunas regiones (Nijssen, O'Donnell, Hamlet, & et al, 2001).
- 7 **THMB (Terrestrial Hydrology Model with Biogeochemistry)** Utilizado en conjunto con INLAND, este modelo permite simular dinámicas de inundación y caudales en la Amazonía. Proyecciones indican subestimación de caudales en la región este debido a posibles deficiencias en datos de precipitación (De Castro, Cuartas, Coe, & et al, 2018).
- 8 **MHD-INPE (Modelo Hidrológico Distribuido)** Este modelo simula impactos del cambio climático en la cuenca del Purus, sugiriendo reducciones del caudal del 27% hacia finales del siglo XXI. Las proyecciones muestran patrones contrastantes entre la estación seca y la húmeda (Dalagnol, Borma, Mateus, & et al, 2017).
- 9 **GR2M (Modelo Hidrológico Mensual)** Aplicado en cuencas andino-amazónicas, este modelo proyecta tendencias de incremento en caudales anuales en algunas subcuencas, mientras que otras muestran disminuciones, especialmente durante la primavera y el verano (Lavado-Casimiro, Labat, Guyot, & et al, 2011).
- 10 **Lisflood (Modelo de Flujo Lisflood)** Utilizado para simular inundaciones extremas, este modelo muestra alta variabilidad en los picos de caudal debido a la sensibilidad del modelo a la entrada meteorológica. Los resultados destacan la importancia de la calibración regional para reducir incertidumbres (Towner, Cloke, Zsoter, & et al, 2019).

Estos modelos hidrológicos adicionales ofrecen una perspectiva integral sobre la variabilidad y los impactos del cambio climático en la cuenca del Amazonas. Cada uno presenta fortalezas y desafíos específicos, destacando la necesidad de calibraciones precisas y datos confiables para reducir incertidumbres en las proyecciones. La combinación de múltiples modelos es clave para una gestión sostenible de los recursos hídricos en la región.

En el Cuadro 5 se presentan los impactos identificados utilizando los modelos descritos. El cuadro ha sido elaborado con base a las 12 fuentes indicadas

Cuadro 5. *Impactos en el clima amazónico según modelos de simulación*

No	Modelo	Impactos proyectados	Fuente
1	MGB-IPH	Aumento del caudal máximo en el noroeste (+18.3%); reducción en el este (-15.9% durante estación seca)	(Sorribas, Paiva, Melack, & et al, 2016)
2	RegCM4	Extensión de la estación seca en la Amazonía central; reducción de precipitación (-12%)	(Llopart, Coppola, Giorgi, & et al, 2014)
3	SWAT	Reducción en el flujo anual (hasta 27%); mayor variabilidad estacional	(Rufino, Gücker, Faramarzi, & et al, 2023)
4	ORCHIDEE	Reducción de caudales mínimos (-10% en río Xingu); aumento del caudal en regiones occidentales	(Guimbertau, Ronchail, Espinoza, & et al, 2013)
5	ED2+R	Reducción del 20% en caudales; retraso en la temporada húmeda (1.5 meses)	(Pereira F. F., 2017)
6	VIC	Reducción en el caudal anual en cuencas tropicales a pesar del aumento en la precipitación.	(Nijssen, O'Donnell, Hamlet,, & et al, 2001)
7	THMB	Subestimación de caudales en la región este; importancia de mejoras en datos de precipitación.	(De Castro, Cuartas, Coe, & et al, 2018)
8	MHD-INPE	Reducción del caudal en la cuenca del Purus (27%); variabilidad estacional significativa.	(Dalagnol, Borma, Mateus, & et al, 2017)
9	GR2M	Incremento o reducción de caudales dependiendo de la cuenca; disminución estacional en primavera y verano.	(Lavado-Casimiro, Labat, Guyot, & et al, 2011)
10	Lisflood	Alta variabilidad en picos de caudal; sensibilidad a datos meteorológicos; necesidad de calibración regional.	(Towner, Cloke, Zsoter, & et al, 2019)

4. LAS ACCIONES DE MITIGACION Y ADAPTACIÓN FRENTE A LOS IMPACTOS CLIMATICOS: NDC y NAP

Las Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC, por sus siglas en inglés) y los Planes de Adaptación (NAP, por sus siglas en inglés), representan una visión de los planes climáticos actuales de las naciones sobre las expectativas de las emisiones globales y las medidas de mitigación y adaptación en 2030, entre otras medidas.

Las NDC y los NAP de los países que comparten el territorio de la cuenca del Amazonas (se excluye a la Guyana francesa), presentadas durante el período entre el 2016 y el 2023, según se registra en la página web oficial de la Secretaría de la Convención Marco de las Naciones Unidas para Cambio Climático (CMNUCC) (United Nations. Climate Change , 2024), muestran los sectores y ecosistemas prioritarios para cada país, así como los alcances y detalles de las medidas enunciadas para los mismos. Sin embargo, no todos los países amazónicos, incorporan medidas específicas para la Amazonía.

Para noviembre de 2024, el informe Nationally determined contributions under the Paris Agreement (*Contribuciones determinadas a nivel nacional en virtud del Acuerdo de París*) (United Nations. Framework Convention on Climate Change, 2024), refleja que no se ha

alcanzado lo esperado: mayor suficiencia y aceleración de los acuerdos alcanzados en París 2015 y las COP posteriores, con nuevos planes climáticos nacionales mucho más audaces de cada país.

Las conclusiones del informe no sorprendieron al revelar que se destaca una brecha significativa entre los planes climáticos actuales y las acciones necesarias para prevenir los graves impactos del calentamiento global.

El informe indica que las NDC han sido insuficientes, señalando que no son lo bastante ambiciosas para limitar el calentamiento global a los objetivos establecidos en el Acuerdo de París (idealmente 1,5 °C). Esa insuficiencia supone un riesgo sustancial para las economías y los medios de vida de todo el mundo. El reporte síntesis revela que el impacto proyectado de estos planes en las emisiones globales pone de relieve la necesidad de establecer objetivos de reducción de emisiones significativamente más estrictos e igualmente demanda la necesidad de mejores estrategias de adaptación. Un aspecto especialmente preocupante es su advertencia sobre que, suponiendo que, las NDC actuales se implementasen en su totalidad, el nivel de emisiones globales que tendría efectos muy negativos para el mundo.

De todo ello es posible deducir que los planes climáticos nacionales actuales están muy por debajo de lo que se necesita para evitar que el calentamiento global paralice todas las economías y destruya miles de millones de vidas y medios de subsistencia en todos los países⁵³.

Respecto a la Amazonia sólo 3 países de la cuenca del Amazonas (Bolivia, Brasil y Colombia) han incluido medidas específicas para sus territorios amazónicos en sus NDC y NAP. Este hallazgo es evidente y preocupante. Evidente porque los hechos contundentes de un clima cada vez más volátil e impredecible está afectando a la amazonia, a sus gentes, a su economía, y a sus recursos naturales, comprometiendo la seguridad de la vida, en toda la extensión de este vasto e intrincado ecosistema; preocupante porque se han subestimado las evidencias científicas cada vez más robustas y verificables, que insistentemente han advertido sobre la gravedad de la ocurrencia de cambios irreversibles en la Amazonia (*tipping points*) que pueden desencadenar respuestas del bioma amazónico –sea por efecto de factores climáticos y no climáticos o por combinación de ambos- para los cuales ninguno de los países de la cuenca está adecuadamente preparado.

Sorprende también que las NDC y los NAP carezcan de información sobre análisis de costos de las medidas propuestas, en particular para medidas de adaptación. La carencia de costos de las medidas enunciadas en los países de la cuenca del Amazonas – con muy escasas excepciones - impide disponer de una base de referencia para establecer una aproximación a los costos de inacción relacionado con los impactos del cambio climático en la cuenca.

⁵³ El informe de síntesis refleja que de implementarse de forma combinada lo propuesto en los diferentes planes climáticos de cada país, entre los cuales están las NDC, para el 2030 se lograría apenas una disminución de emisiones de aproximadamente un 2,6% respecto al 2019 (unas 51,5 GtCO₂), porcentaje insignificante frente a la reducción a un 46% que el IPCC ha indicado necesario para no superar los 1.5 °C de calentamiento global al 2030.

Respecto a los NAP, sólo Brasil y Surinam presentan medidas de adaptación para su territorio amazónico. Si bien ambos planes (NDC y NAP) no son iguales para todos los países porque se ajustan a sus circunstancias nacionales, deben estar respaldados por regulaciones, leyes y financiamiento que garanticen el cumplimiento de los objetivos y su implementación.

La revisión muestra que todos los países de la cuenca amazónica cuentan con respaldo institucional y legal, pero casi todos presentan medidas condicionadas a financiamiento externo. Sólo Brasil y Guyana informan sobre datos sobre costos –muy escasos- para algunas de las medidas propuestas. Esto último pone de relieve la necesidad de que las nuevas NDC de los países de la cuenca del Amazonas incorporen con detalle, las prioridades de adaptación y las inversiones asociadas para proteger sectores críticos, infraestructura y personas de los impactos climáticos en sus territorios amazónicos y así lo reflejen en su Plan Nacional de Adaptación. Esto permitirá contar con una línea de referencia para la estimación de costos de inacción futuros.

En las secciones siguientes se presentan las medidas de adaptación enunciadas específicamente para el territorio amazónico de cada país. Considerando la escasa información específica para el territorio amazónico presente en ambos documentos (NDC y NAP), para los países que no contemplan medidas específicas para la Amazonia, se seleccionan algunas medidas para sectores o recursos naturales considerados relevantes como, por ejemplo, recursos hídricos, cuencas, bosques, biodiversidad, deforestación y agua. Para los países que no han elaborado el NAP se hace referencia a medidas de adaptación, incorporadas en políticas climáticas nacionales, para los aspectos antes señalados. Si bien el contenido de las NDC y los NAP abordan aspectos comunes que responden a acuerdos previos emanados de la CMNUCC y de las COP, cada país presenta información y datos bajo un formato particular ajustado.

4.1 BOLIVIA

El (Ministerio de Medio Ambiente y Agua. Autoridad Plurinacional de la Madre Tierra, 2021) presenta medidas de adaptación para recursos hídricos, cuencas, bosques y deforestación⁵⁴. En el Cuadro 6 se presenta información sobre las medidas de adaptación propuestas, las metas acordadas, la línea base, el condicionamiento para el cumplimiento de las metas y la contribución esperada de las metas a los ODS. Las medidas enunciadas en la NDC abarcan el manejo integral de cuencas, funciones ambientales, deforestación, fortalecimiento de capacidades de fiscalización, incendios forestales, conservación y gestión integral y sustentable del bosque, restitución del bosque, promoción de prácticas sustentables. También se incluye en el Cuadro 5.1 una acción enunciada para la Amazonia boliviana en el Plan Nacional de Desarrollo 2021-2025.

Cuadro 6. Medidas de adaptación enunciadas para la Amazonia boliviana en la Comunicación Nacionalmente Acordada (NDC 2022) y en el PND 2021-2025

Aspecto	Meta	Línea base	ODS
Manejo Integral de Cuencas	Meta 22 Hasta el 2030, se ha alcanzado 12 MM ha con Manejo Integral de Cuencas (MIC). Condicionada 100%	2020: 3.254.200 ha con MIC	1, 6, 9 y 15
	Meta 23 Hasta el 2030, se han aprobado 51 instrumentos de planificación para la gestión de cuencas priorizadas de los cuales el 60% son implementados. Condicionada 100%	2020: 14 instrumentos de planificación aprobados.	5, 6,11 y 13
	Meta 24 Hasta el 2030, se han alcanzado 900 km con infraestructura resiliente para control hidráulico. Incondicional:718km; Condicionado: 900km	2020: 672 km.	1, 6, 9 y 11
Funciones ambientales	Meta 25 Hasta 2030, se ha mantenido y conservado 16 MM ha de superficie de humedales designadas como Sitios Ramsar. Condicionada 100%	2020: 100% (16 MM ha en Sitios Ramsar)	6,9,13 y 17
Deforestación Fortalecimiento de capacidades de fiscalización	Meta 11 Hasta 2030, reducir al 80% la deforestación en comparación con la línea base. Incondicionado 40%, 60% adicional condicionado	Línea base 2020: Deforestación 262.178 ha/año (promedio 2016-2020)	13, 15 y 16.
	Meta 12 Hasta 2030, reducir en 100% la deforestación en Áreas Protegidas Nacionales. Incondicionado 40%; 60% adicional condicionado.	2020: 1990-2000 se perdió 0,2% de los boques dentro de áreas protegidas y en el periodo 2000 al 2010 0,5%.	13, 15 y 16
Incendios forestales	Meta 13 Hasta 2030, reducir en un 60% la superficie con incendios forestales, en comparación con la línea base. Incondicional 50% 50% adicional condicionado	2020: Incendios forestales: 1.447.070 ha/año (promedio 2019-2021)	13, 15 y 16

⁵⁴ Si bien se pudo localizar la NDC Bolivia 2021, en la institución boliviana responsable, hay que advertir que no hay registro en la página oficial de la CMNUCC, *Submitted NAPs from developing country Parties* [<https://napcentral.org/submitted-naps>] del NAP de Bolivia.

Aspecto	Meta	Línea base	ODS
Conservación y gestión integral y sustentable del bosque	Meta 14 Hasta 2030, duplicar las áreas bajo manejo integral y sustentable de bosques. Incondicional 40% 60% adicional condicionado	2020: 10,8 MM ha.	1, 2, 13 y 15
Restitución del bosque	Meta 15 Hasta 2030, incrementar la ganancia de cobertura de bosques en un millón de hectáreas. Incondicional: Regenerar 500.000 ha con esfuerzo propio y 500.000 ha adicional condicionada	2012: 86.800 ha ganancia de cobertura boscosa forestación y reforestación al 2020.	2, 13, 15 y 16.
Promoción de prácticas sustentables	Meta 16 Hasta 2030, duplicar la producción de madera autorizada en comparación con el promedio de 2016-2020. Incondicional incremento del 30% y el 70% adicional condicionado	2020: Promedio de producción (2016-2020): 1.371.223 m3/año equivalente a 685.611 Tn de madera)..	1,8,13,15 y 16
	Meta 17 Hasta 2030, duplicar la producción de productos forestales no-maderables en comparación con el promedio de 2016-2020. Incondicional: 150.000 Tn y 200.000 Tn condicionadas	2020: 103.732 Tn (promedio 2016-2020) .	1,8,15 y 16
Plan Nacional de Desarrollo 2021-2025	Acción: Implementar una planta de transformación de frutos amazónicos. Indicadores: Frutos amazónicos transformados (Tn métricas/ año).	2020: 5.417 Tm. 2025: 8.480 Tm de frutos amazónicos (Almendra, Asaí, Copoazú).	

4.2 BRASIL. NAP / NDC

El NAP (Brasil. Ministry of Environment, 2016 a) (Brasil. Ministry of Environment, 2016 b) guía la gestión y reducción de riesgos climáticos a largo plazo. Está alineado con la Política Nacional de Cambio Climático. En él se reconocen los impactos actuales del cambio climático, como cambios en patrones de lluvia y aumento de eventos extremos. Prevé efectos adversos en sistemas naturales, humanos, infraestructuras y sectores productivos de manera desigual. Establece que la gestión de riesgos requiere coordinación entre niveles de gobierno, sectores económicos y la sociedad civil. Propone acciones, estrategias y directrices para enfrentar los efectos adversos del cambio climático en dimensiones sociales, económicas y ambientales y mecanismos institucionales para la implementación coordinada entre estados, municipios y sectores. Está constituido por dos volúmenes: Estrategia General y Estrategias Sectoriales y Temáticas. En el volumen II se abordan vulnerabilidades y se proponen directrices para aumentar la resiliencia climática en once (11) sectores clave. Adicionalmente, se consultó Country Climate and Development Report: Brazil (The World Bank Group, 2023) para obtener actualizaciones del NAP.

Brasil presentó segunda NDC en la COP29 (noviembre 2024) (Brasil. Ministry of Environment and Climate Change, 2024), comprometiéndose a reducir sus emisiones netas de gases de efecto invernadero entre un 59% y un 67%, por debajo de 2005, para 2035. Esta meta, establecida como un rango, permite flexibilidad ante variables futuras y consolida una trayectoria de mayor ambición, según lo determinado por el Acuerdo de París. La meta considera la variación de los escenarios futuros, reconociendo que su implementación depende de factores impredecibles tanto a nivel nacional como internacional. Brasil informa que hará todo lo posible para alcanzar la máxima ambición de la meta, que es reducir las emisiones en un 67 % para 2035.

La nueva NDC abarca toda la economía y establece un objetivo absoluto de reducción de emisiones y está alineada con la trayectoria del país hacia la neutralidad climática para 2050. La NDC está respaldada por el Pacto para la Transformación Ecológica y el Plan Clima de Brasil. Es necesario destacar que el plan Clima cuenta con el apoyo de los mecanismos económicos del Plan de Transformación Ecológica, incluida la Plataforma Brasil de Inversiones Climáticas y Transformación Ecológica (*Plataforma Brasil de Investimentos Climáticos e para a Transformação Ecológica/BIP*); el Programa Eco Invest Brasil; la Taxonomía Sostenible Brasileña (*Taxonomia Sustentável Brasileira*); los Bonos Soberanos Sostenibles (*Títulos Soberanos Sustentáveis*); el Fondo Climático; reforma fiscal; el mercado regulado de carbono; y el Sistema Brasileño de Comercio de Emisiones (*Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões/SBCE*).

Además, las acciones para combatir la deforestación y la restauración de la selva tropical serán apoyadas por el Fondo Amazonia, el Fondo Bosques Tropicales para Siempre (TFFF) y a través de iniciativas del Banco Nacional de Desarrollo de Brasil (*Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social/BNDES*), como el Arco de Restauración del Amazonas (*Arco da Restauração na Amazônia*). Se destacan las reducciones significativas en la deforestación de la Amazonía y el Cerrado, logradas mediante planes de acción específicos. En 2023, la deforestación en la Amazonía disminuyó un 30.6% y en el Cerrado un 25.7%, evitando la emisión de 400.8

millones de toneladas de CO₂. En la NDC 2023 se hace referencia al compromiso de alcanzar la deforestación cero para 2030, de acuerdo con el *Plan de Acción para la Prevención y Control de la Deforestación en el ámbito Legal Amazonas* (PPCDAM) que se encuentra en su quinta (5.^a) fase de implementación, con énfasis en el sector Forestal. Brasil también contempla planes de mitigación y adaptación para los sectores Agricultura, Energía y Carbón.

La NDC, fue desarrollada a través de consultas amplias y busca impulsar un nuevo paradigma de desarrollo que equilibre prosperidad socioeconómica, justicia climática y sostenibilidad. Brasil pretende convertirse en un líder global en desarrollo sostenible, mediante innovación tecnológica, uso consciente de recursos y creación de empleo.

En el Cuadro 7 se presenta información de la NDC 2023, del Plan de Acción para la Prevención y Control de la Deforestación en la Amazonia Legal (PPCDAM) 2023-2027 (Brasil. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima., 2023).

Cuadro 7. *Medidas de adaptación enunciadas para la Amazonia brasileira en la Comunicación Nacionalmente Acordada (NDC 2023), el PPCDAm (2023-2027), en el Plan para el Control de la Deforestación Ilegal y la Recuperación de Vegetación Nativa (2019) y en el Plan Nacional de Adaptación 2023 (*)*

Documento	Aspecto	Meta/Medida
NDC 2023	Deforestación	Deforestación cero para 2030
PPCDAM (2023-2027)	Sector Forestal.	Deforestación cero en la Amazonia, reducir las emisiones GEI e intensificar la adaptación al cambio climático y sus impactos
Plan para el Control de la Deforestación Ilegal y la Recuperación de Vegetación Nativa (2019)	Deforestación ilegal	Territorio amazónico cubierto por unidades de conservación (km ²): Línea base (2022):1.205.232; Meta: 1.300.000 (2026)
	Protección de fronteras de la Amazonia	Contener el tráfico de drogas y armas que alimenta el crimen organizado en todo el territorio nacional.
	Pacto entre los países amazónicos	Luchar contra el crimen organizado, el tráfico de armas, devastación de bosques y a favor de la protección de los pueblos indígenas.
	Financiamiento	Créditos de instituciones financieras públicas que contribuyen a la implementación de los programas Banco del Amazonas (Basa); Banco de Brasil (BB); Banco del Nordeste (BNB); Banco Nacional de Desarrollo Económico y Social (BNDES); y Caixa Econômica Federal (CEF).
NAP según “World Bank Group. 2023. Brazil Country Climate and Development Report. CCDR http://hdl.handle.net/10986/39782)	Combinar reformas estructurales y políticas climáticas	Permitir la administración de la tierra y los usos sostenibles y productivos de la misma (por ejemplo, áreas protegidas, establecimiento de territorios indígenas y restauración de pasturas degradadas) y actividades económicas sostenibles basadas en los recursos naturales (por ejemplo, ecoturismo y plantaciones forestales) para impulsar el almacenamiento de carbono, eliminando unos 600 MtCO ₂ e/año

Documento	Aspecto	Meta/Medida
	Planificación y gestión urbana; financiamiento y SbN	Utilizar la planificación urbana, la gestión urbana, las finanzas e invertir en soluciones basadas en la naturaleza (SbN) como la creación de espacios verdes, la protección de los humedales y la mejora de la protección natural frente a las inundaciones costeras, y crear el entorno propicio para ciudades verdes y resilientes.
	Implementar intervenciones en toda la economía	Cambio de incentivos para los inversores privados y los consumidores con reformas fiscales y de subsidios. Medidas para mejorar la inserción laboral y la formación en nuevas competencias. Inversiones en sanidad y educación, así como el apoyo laboral y de protección social pertinente.
NAP 2016	Deforestación	Proyecto de Monitoreo de la Deforestación en el Amazonía (PRODES) y el Sistema de Detección en Tiempo Real de la Deforestación en la Amazonía (DETER); concluir la implementación del Plan de Combate a la Deforestación en la Caatinga (PPCaatinga) y redactar e implementar planes similares para otros biomas.
	Cuencas	Incrementar la eficacia de la gobernanza de las cuencas fluviales considerando modelos de gestión específicos para la Amazonía.

4.3 COLOMBIA

La NDC 2021 (Colombia. Comisión Intersectorial de Cambio Climático, 2020) y el ANP (Colombia: DNP, IDEAM, MinAmbiente y UNGRD, 2018) enuncian medidas de adaptación específicas para la amazonia colombiana. En el Cuadro 8 se presentan las medidas enunciadas en cada documento para temas vinculados a las comunidades étnicas, deforestación y ecosistemas.

Cuadro 8. Medidas de adaptación enunciadas para la Amazonia colombiana en la Comunicación Nacionalmente Acordada (NDC 2021) y Plan Nacional de Adaptación (2018)

Documento	Aspecto	Meta/Medida
NDC 2021	Enfoque diferencial con comunidades étnicas y vulnerables: Deforestación	Proteger/preservar los bosques en la Amazonía situados en resguardos y territorios colectivos de las comunidades indígenas y afrocolombianas que dependen de la defensa de modos de vida de estas poblaciones adecuados al territorio, actores indispensables para la consecución de la meta de reducción de la deforestación.
	Marco normativo: Deforestación y protección de ecosistemas	Marco normativo y de implementación, en el cual destacan: Delimitación de la frontera agropecuaria (2018), Consejo Nacional de Lucha contra la Deforestación y otros Crímenes Ambientales Asociados (2019), Pacto de Leticia (2019); Ley 1930 sobre protección de ecosistemas de páramo, Decreto Ley 870 (2017) y 1007 (2018) sobre Pagos por Servicios Ambientales. Programa REDD+ Visión Amazonía (2016), programa Desarrollo Sostenible bajo en Carbono para la Orinoquia y la suscripción de la Declaración Conjunta de Intención con Noruega, Reino Unido y Alemania sobre Reducción de la Deforestación y Desarrollo Sostenible (2015, refrendada en 2019).
	Reducción intersectorial de la deforestación (REDD+)	a) Estrategia Integral de Control a La Deforestación y Gestión de Bosques; b) Programas REDD+: Declaración Conjunta de Intención/Visión Amazonía / Desarrollo Sostenible Bajo en Carbono para la Orinoquia; c) Acciones intersectoriales y de control de la deforestación coordinadas en el CONALDEF; d) Acuerdos Cero Deforestación con las Cadenas de Carne, Lácteos, Aceite de Palma y Cacao; y Pacto Intersectorial por la Madera Legal en Colombia. e) Proyectos REDD+ f) Pago por servicios ambientales g) Articulación con meta de incendios forestales
	Construcción de mapas de amenaza, vulnerabilidad, y riesgo de mayor calidad.	Evidencian que el 13% de los departamentos se encuentra en la categoría muy alta, principalmente en los departamentos localizados en la Amazonia colombiana
NAP (2018)	Implementación de las Estrategias Corazón de la Amazonía y Visión Amazonía ⁵⁵ .	Diseño de estrategias para la mitigación y adaptación al cambio climático en Vaupés, Guainía y Guaviare.

⁵⁵ Corazón de la Amazonia y Visión Amazonia son estrategias del gobierno de Colombia para reducir la deforestación en la Amazonía y promover el uso sostenible de los recursos naturales. Es un proyecto que busca mejorar la gobernanza y promover el uso sostenible de la tierra. Entre sus acciones están: Realizar acuerdos sociales de conservación, restauración, y no deforestación con los productores; Restaurar áreas estratégicas como rondas y nacederos; Asegurar los medios de vida de comunidades campesinas e indígenas. GOV. CO. COP 26 Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. [<https://cop26.minambiente.gov.co/vision-amazonia/#:~:text=El%20programa%20REM%20Colombia%20%E2%80%933%20Visi%C3%B3n,alternativas%20productivas%20bajas%20en%20deforestaci%C3%B3n>].

4.4 ECUADOR

En la NDC 2019 (Ecuador., 2019) no hay mención a la Amazonia ecuatoriana.

En el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático del Ecuador (2023 – 2027) (Ecuador. Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica, 2023) las estrategias fueron establecidas para los siguientes sectores priorizados para la adaptación al cambio climático en Ecuador: (i) Patrimonio Natural; (ii) Patrimonio Hídrico; (iii) Salud; (iv) Asentamientos Humanos; (v) Sectores Productivos y Estratégicos y, (vi) Soberanía Alimentaria, Agricultura, Ganadería, Acuicultura y Pesca. No hubo una priorización por regiones geográficas.

En el Cuadro 9 se presentan las medidas de adaptación enunciadas en la NDC 2019 con relación a los sectores agricultura/bosques; uso de la tierra, deforestación y degradación de bosques; patrimonio natural y patrimonio hídrico; y en el NAP 2023-2027 para los aspectos, deforestación para el sector priorizado patrimonio natural, bosques, suelos, cuencas e incendios forestales

Cuadro 9. Medidas de adaptación enunciadas para la Amazonia ecuatoriana, en la Comunicación Nacionalmente Acordada (NDC 2021)

Documento	Aspecto	ODS	Meta/Medida
NDC 2019	Agricultura/deforestación	1,2,8,10,12,13	Plan de Implementación de Medidas y Acciones REDD+ para la reducción de la deforestación y la degradación de los bosques en ganadería sostenible Implementación de prácticas pecuarias sostenibles a nivel nacional que reduzcan la deforestación.
	USCUSS	6,7,9,11,12,13	Plan de Acción REDD+ del Ecuador “Bosques para el Buen Vivir” 2016-2025 Contribuir con la reducción, monitoreo, reporte y verificación de la deforestación y degradación de los bosques a través de la conservación, manejo forestal sostenible, y la optimización de otros usos de suelo para reducir la presión sobre los bosques, aportando de esta forma a la reducción de emisiones de GEI asociada.
	Patrimonio natural	1,2,11,1213,14,15	Mejoramiento de instrumentos de política pública de patrimonio natural que incorporan la adaptación.
			Incremento de la superficie de bosques, cobertura de vegetación natural remanente y ecosistemas marinos y costeros conservados o con manejo sostenible, para mantener su funcionalidad ecosistémica.
			Prácticas sostenibles de uso de los recursos naturales en zonas de influencia de áreas bajo diferentes estatus de conservación, vulnerables.
			Corredores de conservación y restauración de bosques secundarios y zonas de amortiguamiento para mantener la conectividad del paisaje, reducir impactos (actuales y esperados) del cambio climático e incrementar la resiliencia ecosistémica.
			Creación y fortalecimiento de capacidades sobre cambio climático y gestión del patrimonio natural en actores sociales, académicos, investigadores y gubernamentales.
	Patrimonio hídrico	4,5,12,1315,17	Fortalecimiento del Sistema Nacional Estratégico del Agua como mecanismo de coordinación e interacción sectorial para incrementar la capacidad adaptativa del sector hídrico en territorio.
			Sistema nacional de información para el sector hídrico como herramienta de apoyo a la gestión, monitoreo y evaluación de los efectos del cambio climático.

Documento	Aspecto	ODS	Meta/Medida
NDC 2019			Estrategia nacional de cultura del agua, que incluya prácticas y saberes de los pueblos ancestrales, como mecanismo que contribuya a la sensibilización local de los efectos del cambio climático.
			Mecanismos para la valoración económica y social de los impactos del cambio climático en el sector hídrico.
			Criterios de cambio climático en estrategias y planes nacionales y sectoriales del sector hídrico.
			Inclusión de variables de cambio climático en las viabilidades técnicas y en la normativa de regulación y control del recurso hídrico.
			Gestión de la oferta y demanda hídrica nacional integrando variables de cambio climático, con énfasis en zonas con estrés hídrico.
			Programas de comunicación, divulgación y fortalecimiento de capacidades que permitan la sensibilización de actores del sector hídrico y usuarios del agua, sobre los efectos del cambio climático.
			Mecanismos de conservación de fuentes hídricas e implementación de sus planes de manejo para asegurar, a futuro, agua en cantidad y calidad.
			Acciones que contribuyan a aumentar la capacidad adaptativa de la infraestructura hidráulica (existente y nueva) de uso múltiple.

Cuadro 10. Medidas de adaptación enunciadas para la Amazonia ecuatoriana, en el Plan de Adaptación (2023-2027)

Documento	Aspecto	Meta/Medida
NAP 2023-2027	Deforestación para el sector priorizado Patrimonio Natural	Estudios enfocados en evaluar la acción simultánea del cambio climático y la deforestación para obtener mejores estimaciones sobre la dinámica de respuesta de las especies ante los cambios globales.
		Modelos y planes de negocio en las comunidades rurales a fin de promover la agro producción sostenible y libre de deforestación.
		Fomentar procesos intersectoriales de trazabilidad y certificación para productos que provienen de prácticas agroproductivas sostenibles y libres de deforestación.
	Bosques	Programa nacional de monitoreo de bosques para medir el impacto del cambio climático considerando escenarios de clima actuales y futuros.
		Sistema de vigilancia fitosanitaria e incendios en bosques naturales y plantaciones forestales para prevenir su pérdida.
		Acciones de control, vigilancia y fiscalización en bosques
	Suelos (vertientes de la Cordillera de los Andes, provincias de Bolívar, Carchi, Pichincha, Loja).	Prácticas conservacionistas aplicadas a nivel de ladera: a) Repoblación de pastos y de bosques, fundamentalmente con especies adaptadas a la zona y al valor económico b) Buen manejo de pastos (pastoreo de corta duración y frecuente) y Bosques c) Construcción de zanjas o acequia de infiltración en áreas de bosques y pastizales
	Cuencas	Infraestructura hidráulica mayor para uso multisectorial en cuencas vulnerables
		Sistemas de alerta meteorológica temprana en las cuencas vulnerables
		Servicios de información para la planificación y la gestión multisectorial de los recursos hídricos en cuencas vulnerables.

Documento	Aspecto	Meta/Medida
NAP 2023-2027		Sistemas de Alerta Temprana ante inundaciones, sequías, aluviones y peligros de origen glaciar en cuencas vulnerables considerando el clima actual y los escenarios futuros proyectados.
		Monitoreo y vigilancia de la calidad de agua superficial en cuencas vulnerables
		Aprovechar eficientemente la energía hidroeléctrica en cuencas vulnerables
	Patrimonio hídrico	Diseñar sistemas de observación de cuencas hidrográficas, para el desarrollo de planes de conservación, restauración y manejo sostenible del suelo, incluyendo evaluaciones de riesgo climático actual y futuro
		Integrar las proyecciones climáticas para el estudio de disponibilidad de agua en cuencas bajo escenarios de cambio climático.
		Modernizar el otorgamiento de derechos de uso de agua en cuencas vulnerables considerando caudales actuales y futuros bajo escenarios climáticos actuales y futuros
		Prácticas sostenibles para la conservación de ecosistemas en cuencas hidrográficas del ámbito de las Áreas Naturales Protegidas, priorizando sitios con altos niveles de riesgo climático.
		Infraestructura de protección en la generación, transmisión y distribución de electricidad en cuencas hidrográficas vulnerables con altos niveles de riesgo climático.
		Red hidrométrica en infraestructuras hidráulicas de captación y distribución de agua en cuencas vulnerables.
		Implementar Infraestructura hidráulica mayor para uso multisectorial en cuencas vulnerables.
		Rejillas, canales y otras infraestructuras para atender el abastecimiento y el drenaje de agua
	Incendios forestales	Sistemas de alerta meteorológica temprana en las cuencas con altos niveles de riesgo climático.
		Servicios de información para la planificación y la gestión multisectorial de los recursos hídricos en cuencas vulnerables
		Fortalecer procesos para la gestión de información y generación de evaluaciones de riesgo climático en escenarios actuales y futuros relacionados con incendios forestales en áreas afectadas por altas temperaturas y estrés hídrico.
		Sistema de vigilancia fitosanitaria e incendios en bosques naturales y plantaciones forestales para prevenir su pérdida

4.5 GUYANA

En NDC 2016 (Guyana, 2016) no hay mención a la Amazonia guyanesa. Se hace referencia a medidas para los sectores bosques/deforestación, manejo forestal, deforestación/minería, bosques/ cuencas, gestión del agua y medios de implementación.

En Guyana's National Drought Mitigation and Adaptation Plan (NDMAP - 2020). United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD) Drought Initiative (Guyana, Cooperative Republic of. Guyana Lands and Surveys Commission, 2020) no hay mención de acciones específicas para la Amazonia guyanesa. Se seleccionan medidas para bosques, incendios forestales, biodiversidad, agua.

En National Adaptation Plan for the Cooperative Republic of Guyana. Inception Report (Guyana, Cooperative Republic of., 2018) no hay mención de acciones específicas para la Amazonia. Se seleccionan medidas para el sector agua.

Cuadro 11. *Medidas de adaptación relacionadas con la Amazonia guyanesa, enunciadas en la Comunicación Nacionalmente Acordada (NDC 2016), en la Política Nacional de cambio Climático y Plan de Acción (2020-2030, y en el Plan Nacional de Adaptación (2024).*

Documento	Aspecto	Meta/Medida
NDC 2016	Bosques/ Deforestación	Conservación forestal a escala nacional, de pago por desempeño, proporciona financiamiento para la Estrategia de Desarrollo Bajo en Carbono (LCDS) (2009-2015), modelo REDD+ cuya viabilidad depende del Sistema Nacional de Medición, Notificación y Verificación de Bosques (MRVS) de Guyana.
		Reservas de carbono forestal y otros servicios ecosistémicos importantes, incluida el agua dulce y la biodiversidad, permiten continuar probando y perfeccionando la viabilidad económica de los esquemas de pago de REDD+.
		Políticas y programas de incentivos para generar una participación más amplia de la sociedad civil y el sector privado en acciones para evitar la deforestación y la degradación forestal.
	Manejo forestal	Manejo forestal sustentable, garantizará el cumplimiento de los diversos códigos de prácticas que rigen la industria maderera utilizando recursos locales.
		Monitoreo forestal mantendrá un alto nivel de legalidad de la madera. Con ello se espera mantener una baja tasa de tala ilegal (menos del 2% de la producción).
		Acuerdo Voluntario de Asociación (VPA) se espera proporcione una acreditación independiente de la legalidad forestal y las prácticas de gestión en toda la industria maderera del país
		Mejorar las actividades de valor agregado a nivel local para ayudar a crear un mayor potencial de almacenamiento de carbono en productos de madera de uso prolongado. Esto también podría reducir potencialmente la presión sobre los recursos forestales, ya que la obtención de un valor más alto puede dar como resultado niveles reducidos de cosecha.
	Manejo forestal	Utilizando una reserva total de carbono de los bosques en la biomasa aérea y subterránea de 19.197.411.268 tCO ₂ e, el nivel de referencia propuesto por Guyana para su programa REDD+ es 48,7 MtCO ₂ e anuales si se brindan incentivos adecuados.

Documento	Aspecto	Meta/Medida
		A partir de los incentivos proporcionados por REDD+ se podría reducir el área a talar a favor de concesiones de conservación y promover el desarrollo de productos forestales no maderables y otros servicios forestales, reconociendo al mismo tiempo la necesidad de medios de vida.
	Deforestación/ minería	Mapeo en los distritos mineros para identificar yacimientos económicamente explotables. Esto reducirá significativamente la deforestación al evitar la tala de la cubierta forestal de tierras que contienen sólo depósitos minerales marginales.
		Programas de concientización e incentivos para mejorar la eficiencia de las tecnologías y prácticas en la industria minera.
		Políticas para instituir la recuperación de tierras y la reforestación de áreas mineras de forma obligatoria a nivel nacional.
	Bosques/ cuencas	Conservación de 2 MMha adicionales a través del Sistema Nacional de Áreas Protegidas de Guyana y otras medidas efectivas de conservación basadas en áreas según el compromiso de Guyana bajo la UNCBD, incluida la protección de áreas de conservación y embalses y sus cuencas y las cuencas aguas arriba de nuevos sitios hidroeléctricos. En esta meta se contarán los bosques de manglares existentes y se ampliará el programa de restauración de manglares a lo largo de la costa vulnerable
		La tala de impacto reducido podría ayudar con una reducción de las emisiones anuales de la industria maderera de 3,5 millones de tCO ₂ a 2,3 MMtCO ₂ , una reducción del 20 % con respecto a los niveles históricos para este factor y una reducción del 11 % en el nivel histórico general.
	Gestión del agua	Guyana continuará con el trabajo básico sobre infraestructura de gestión integrada del agua, que incluye la construcción, rehabilitación y mantenimiento de zonas de conservación y canales, y defensas marítimas, suministro de agua y saneamiento, así como la introducción de nuevas técnicas agrícolas como la hidroponía y la fertirrigación. Las consideraciones sobre el cambio climático se incorporarán en todos los sectores del desarrollo nacional.
	Medios de implementación	Para implementar las acciones de adaptación condicional, incluidas las obras de desarrollo de infraestructura, se necesitará aproximadamente 1.6B USD al 2025.
NDMAP (2020)	Bosques	National Forest Policy Statement and Plan (2018): Obtener beneficios de desarrollo del bosque (economía); Conservar, proteger y sostener el bosque (conservación); Gobernar el bosque para asegurar beneficios actuales y futuros (gobernanza); y Fortalecimiento de capacidades humanas e institucionales para el manejo de actividades en el bosque (capacidad).
		Principios, políticas y directrices desarrollados para mejorar la gestión forestal y las prácticas de aprovechamiento de madera.
		Todas las grandes concesiones deben asignar el 4,5% del área total a la conservación de la biodiversidad durante la vida de la concesión
	Incendios forestales	Responder a los incendios relacionados con la sequía
	Biodiversidad	Green State Development Strategy: Vision 2040: Gestionar la riqueza de recursos naturales; Apoyar la resiliencia económica; y Desarrollar capital humano y capacidad institucional.
	Agua	Alineado con la Estrategia general de desarrollo del Estado Verde: Visión 2040: Gestión de cuencas, modalidades de recolección de agua, prácticas de conservación de agua, participación y compromiso de las mujeres, gestión ganadera y agrícola, y distribución de agua potable.
		Programa integral de educación pública sobre la condición de la sequía, mitigación y adaptación y acciones de conservación del agua que estén fundamentadas en información oportuna y con base científica;
		Estrategia que aborde un acceso más equitativo al agua durante la escasez y fomente la gestión de la demanda.

Documento	Aspecto	Meta/Medida
NAP (2024 inception)	Agua	Analizar impactos pasados y actuales del clima en el agua, incluidos los impactos económicos; Mejorar los conocimientos sobre la vulnerabilidad social a los cambios en los recursos hídricos inducidos por el clima; Desarrollar infraestructura resiliente al clima para garantizar la disponibilidad de agua potable
		Explorar la viabilidad de perforar pozos para crear una fuente del agua para comunidades vulnerables; Explorar otras tecnologías para el tratamiento de aguas superficiales en regiones rurales y del interior; y Realizar estudios para la producción de suministro redundante para abordar el cambio climático.

4.6 PERÚ

En la NDC 2021-2030 (Perú. Comisión de Alto Nivel de Cambio Climático. , 2020) No hay mención a la Amazonía. Se hace referencia a los aspectos bosques, agua, deforestación.

En la ANP 2021 (Perú. Ministerio del Ambiente, 2021) se seleccionan medidas vinculadas a agua/cuencas, agua uso urbano, cuencas e incendios forestales.

Cuadro 12. *Medidas de adaptación relacionadas con la Amazonia peruana, enunciadas en la Comunicación Nacionalmente Acordada (NDC 2021) y en el Plan Nacional de Adaptación (2021)*

Documento	Aspecto	Meta/Medida
NAP 2021	Agua/Cuencas	Mejoramiento y construcción de reservorios para la provisión del servicio de agua para uso agrario en cuencas hidrográficas vulnerables.
		Infraestructura hidráulica de conducción, distribución y aplicación de agua para riego en cuencas hidrográficas vulnerables.
		Implementación de infraestructura de protección en los sectores hidráulicos para uso agrario ante impactos de eventos extremos asociados al cambio climático.
		Implementación de sistemas de riego tecnificado en cuencas hidrográficas vulnerables.
		Fortalecimiento de la institucionalidad de los sectores hidráulicos para la gestión del agua de uso agrario en cuencas hidrográficas vulnerables
		Asistencia técnica y fortalecimiento de capacidades para el aprovechamiento sostenible del agua para uso agrario en cuencas hidrográficas vulnerables
		Desarrollo de infraestructura que reduzca la vulnerabilidad de la generación hidroeléctrica, especialmente en centrales ubicadas en cuencas vulnerables.
		Infraestructura de protección en la generación, transmisión y distribución de electricidad ante los impactos de peligros asociados al cambio climático en cuencas hidrográficas vulnerables.
		Buenas prácticas de uso eficiente de energía en los sectores económicos.
		Aprovechamiento eficiente de la energía hidroeléctrica en cuencas vulnerables.
		Servicio de Soporte a las Decisiones (SSD) para el planeamiento energético en unidades hidrográficas con potencial hidroenergético y vulnerabilidad ante el cambio climático.
		Infraestructura hidráulica mayor para uso multisectorial en cuencas vulnerables al cambio climático.
		Conservación y recuperación de la infraestructura natural para la provisión del servicio ecosistémico hídrico en cuencas vulnerables.
		Monitoreo y vigilancia de la calidad de los recursos hídricos en cuencas vulnerables.
		Red Hidrométrica de captación y distribución de agua en infraestructura hidráulica mayor y menor en cuencas vulnerables.
		Modernización del Otorgamiento de derechos de uso de agua en cuencas vulnerables incorporando escenarios climáticos.
		Incremento de los mecanismos de articulación multisectorial y multiactor para la GIRH ante los efectos del cambio climático.
		Servicios de información para la planificación y la gestión multisectorial de los recursos hídricos en cuencas vulnerables.
		Diversificación de la matriz energética para reducir la presión sobre el recurso agua.

Documento	Aspecto	Meta/Medida
NAP 2021	Agua urbano uso	Incremento de la disponibilidad hídrica formal en ámbitos urbanos vulnerables.
		Sistemas de Alerta Temprana ante inundaciones, sequías, aluviones y peligros de origen glaciar en cuencas vulnerables.
		Incorporación del modelo de Mecanismos de Retribución por Servicios Ecosistémicos-MRSE en Empresas Prestadoras Servicios de Saneamiento-EPS para implementar infraestructura natural para la conservación, recuperación y uso sostenible de los servicios ecosistémicos hídricos.
		Ampliación, optimización y/o mejoramiento de la capacidad de producción de los sistemas de agua potable.
		Ampliación, optimización y/o mejoramiento de la capacidad de regulación de los sistemas de agua potable
		Infraestructura redundante en los sistemas de abastecimiento de agua con vulnerabilidad al cambio climático.
		Incremento de la cobertura de micromedición en ámbitos urbanos vulnerables al cambio climático
		Reducción del Agua No Facturada en los servicios de saneamiento de ámbitos urbanos con mayor vulnerabilidad al cambio climático.
		Tecnologías de ahorro de agua en ámbitos urbanos con vulnerabilidad al cambio climático
NAP 2021	Bosques	Prácticas ancestrales en comunidades campesinas y nativas en el uso sostenible de los bienes y servicios de los ecosistemas.
		Restauración de ecosistemas en el ámbito del Sistema Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado (Sinanpe) para mantener la conectividad del paisaje y reducir los impactos.
		Programa nacional de monitoreo de la dinámica del bosque para medir el impacto del cambio climático y adaptarse a sus efectos.
		Prácticas sostenibles para la conservación de ecosistemas en cuencas hidrográficas del ámbito de las Áreas Naturales Protegidas vulnerables ante los eventos climáticos extremos.
		Sistema de vigilancia y control en Áreas Naturales Protegidas para reducir la vulnerabilidad ante los efectos climáticos y no climáticos.
		Sistema de vigilancia y control de plagas en bosques naturales y plantaciones forestales con riesgo ante eventos extremos climáticos.
		Control, vigilancia y fiscalización, para reducir la vulnerabilidad ante los efectos climáticos y no climáticos para áreas forestales conservadas y recuperadas.
		Restauración de ecosistemas forestales y otros ecosistemas de vegetación silvestre para garantizar la funcionalidad del paisaje, servicios ecosistémicos y reducir los riesgos ante los efectos del cambio climático.
		Tecnologías por parte de los productores(as) forestales y manejadores(as) de fauna, que contribuyan al manejo y aprovechamiento sostenible de los bosques, reduciendo la vulnerabilidad.
		Sistema de alerta temprana (SAT) ante peligros climáticos y no climáticos extremos para disminuir el impacto en la conservación y el aprovechamiento sostenible.
NAP 2021	Incendios forestales	Cadenas productivas estratégicas de comunidades campesinas y nativas para reducir los riesgos ante los efectos del cambio climático.
		Procesos de la gestión del riesgo de incendios forestales con enfoque de paisaje en un contexto de cambio climático.

4.7 SURINAM

En la NDC (2020) (Surinam, Cabinet of the President of, 2019) se seleccionan medidas para bosques, agua y biodiversidad. Del NAP 2019 (Surinam, Government of, 2019) se seleccionan medidas para bosques, agua y biodiversidad. De la *Final National Climate Change Policy, Strategy and Action Plan for Suriname 2014-2021* (Republiek Suriname, 2015) se seleccionan medidas para bosques, agua y biodiversidad.

Cuadro 13. Medidas de adaptación relacionadas con la Amazonia se Suriname, enunciadas en la Comunicación Nacionalmente Acordada (NDC 2020) y en el Plan Nacional de Adaptación (2019)

Documento	Aspecto	Medida
NDC 2020	Bosques	Productos forestales no maderables (PFNM), turismo de naturaleza, plantas medicinales y agroforestería.
		Fortalecimiento de las instituciones forestales
		Eliminación de las exportaciones de madera en rollo y aumento del valor agregado nacional a los productos forestales.
		Mejorar la legislación y la capacidad de hacer cumplir la ley pueden mejorar la sostenibilidad.
		La protección y gestión de áreas protegidas es la máxima prioridad para la preservación de la biodiversidad.
	Agua	Rehabilitación y mejora de infraestructuras como diques y defensas fluviales.
		Mejoras en la gestión de los recursos hídricos.
		Identificar la escala de los desafíos relacionados con el agua y las respuestas adecuadas.
	Biodiversidad	Contribuir con la economía y al bienestar del país mediante la preservación de la biodiversidad.
		La protección y gestión de áreas protegidas es la máxima prioridad para la preservación de la biodiversidad.
NAP 2019	Bosques	Utilizar el valor económico del bosque de manera sostenible.
		Compensación por la preservación del prístino bosque tropical de Surinam y la recuperación de la selva tropical de Surinam (REDD+ Fondo Verde para el Clima).
		Los servicios ecosistémicos pueden convertirse en fondos a través del mecanismo REDD+, incluyendo los SE derivados de productos forestales maderables y no maderables del bosque.
		Aumento de la superficie de bosque de manglares
		Planes para coordinar y recopilar variables de datos priorizadas para su uso en actividades de adaptación climática (cobertura de bosques)
		Continuar el análisis de los impactos climáticos pasados en los bosques y la gestión forestal sostenible con énfasis en los manglares.
		Identificación, análisis e implementación de opciones forestales sostenibles que incluyen, entre otras: degradación y nutrición del suelo, planificación de reforestación, riego, áreas protegidas, agrosilvicultura, zonas de amortiguamiento, producción y cosecha, rodales naturales y gestión participativa.
		Sensibilización sobre el papel de la conservación forestal, la restauración y el uso sostenible de los bosques en cambio climático.
		Evaluar opciones para acceder a financiación climática a través de mecanismos de la CMNUCC y otras vías de financiación relacionadas que financien el secuestro de carbono por parte de los bosques y la gestión forestal sostenible o la resiliencia climática y las medidas de mitigación.
	Agua	Incrementar la capacidad de los recursos hídricos existentes a través de mejoras tecnológicas y fortalecimiento institucional.
		Uso de recursos alternativos de agua dulce, como la utilización de agua de lluvia y agua superficial cuando sea posible.

Documento	Aspecto	Medida
		Uso eficiente del agua a través de la gestión y el reciclaje del agua
		Conciencia pública sobre la necesidad para la conservación del agua.
		Importar agua dulce de la región sur del país donde hay agua dulce disponible.
		Establecer nuevas juntas de agua y activar las existentes, y establecer una autoridad del agua.
		Actualizar el proyecto de ley de aguas existente y su aprobación por el Parlamento y su implementación por el Gobierno.
		Mejorar la capacidad para utilizar los recursos hídricos presentes y futuros.
	Biodiversidad	Conservación de la biodiversidad o restauración de manglares y programas de empleos verdes para pueblos indígenas, mujeres y jóvenes.
		Monitorear y proteger la biodiversidad, así como para utilizar los recursos naturales de manera sostenible.
		Vincular mejor el Plan de Acción Nacional sobre Biodiversidad (NBAP) 2012-2016 con el Plan de Acción Nacional sobre el Cambio Climático (NCCAP 2014-2021), que se centra en la adaptación y la mitigación.

4.8 VENEZUELA

En la NDC 2021 (Venezuela, República Bolivariana de; Ministerio del Poder Popular para el Ecosocialismo, 2021), no hay referencia a la región amazónica del país. Se seleccionan medidas vinculadas a los aspectos forestal/bosques, agua y biodiversidad. Sobre el Plan Nacional de Adaptación no hay registro en la página oficial de la CMNUCC [<https://napcentral.org/submitted-naps>]

Cuadro 14. Medidas de adaptación relacionadas con la Amazonia venezolana, enunciadas en la Comunicación Nacionalmente Acordada (NDC 2021).

Documento	Aspecto	Medida
NDC 2021	Forestal/Bosques	Ordenación Forestal Sustentable y Conservación de Bosques en la perspectiva ecosocial.
		Restauración, conservación y manejo sostenible de bosques en zonas afectadas por procesos de degradación.
		Mantener la tasa anual de deforestación en 0.2%, equivalente a 90,000 ha/año hasta el año 2030.
		Plantación forestal multipropósito (155,000 ha).
		Conformación de 11.414 Ecobrigadas en diversos sectores; viveros institucionales y comunales.
		Producción de insumos agrícolas.
		Establecimiento de 480 ha de bosques frutales y policromáticos para embellecimiento urbano.
		Plantación de 4.8 millones de árboles
		Acciones en el ámbito nacional e internacional para la protección, conservación y gestión sustentable de áreas estratégicas, como fuentes y reservorios de agua dulce (superficial y subterránea), cuencas hidrográficas, diversidad biológica, mares, océanos y bosques en correspondencia con lo establecido en el PND 2019 – 2025.
		Monitorear y evaluar 4.465.909 ha de ecosistemas forestales.
		Complementar el inventario forestal nacional con productos temáticos mejorados sobre biodiversidad y GEI.
		Fortalecer el procesamiento de la información geoespacial y socioeconómica; y monitoreo participativo de cobertura forestal.
		Fortalecer capacidades y desarrollar instrumentos innovadores para el Manejo Forestal Sostenible, que abarquen al menos 166.634 ha de bosques para evitar la emisión de 24MM Tn CO ₂ eq y detener los procesos de degradación de tierras.
		El diseño e implementación inicial de un programa nacional de certificación forestal.
NDC 2021	Agua	Fortalecimiento del Sistema Hídrico Nacional
		Seguridad integral del sistema hídrico nacional
		Educación, innovación tecnológica y encadenamiento productivo
		Transformación integral del modelo de gestión de agua
		Siembra y cosecha de agua
		Protección y recuperación del agua en fuente.
		Red de monitoreo de cantidad y calidad del agua.
		Organización institucional a través de los consejos de regiones hidrográficas y consejos de cuencas hidrográficas.

Documento	Aspecto	Medida
		Control administrativo del aprovechamiento del agua en la fuente, el almacenamiento en embalses, control y manejo de aguas subterráneas.
		Gestión integral de riesgos de inundaciones, sequías y fallas estructurales de presas y obras complementarias que puedan afectar negativamente a las personas y sus bienes.
	Biodiversidad	Talleres de capacitación sobre la conservación de la diversidad biológica
		Programa de liberación de ejemplares de especies amenazadas o en peligro de extinción
		Instalación y funcionamiento de seis centros de conservación ex situ de especies amenazadas o en peligro de extinción
		Restauración de dos humedales vulnerables cambio climático

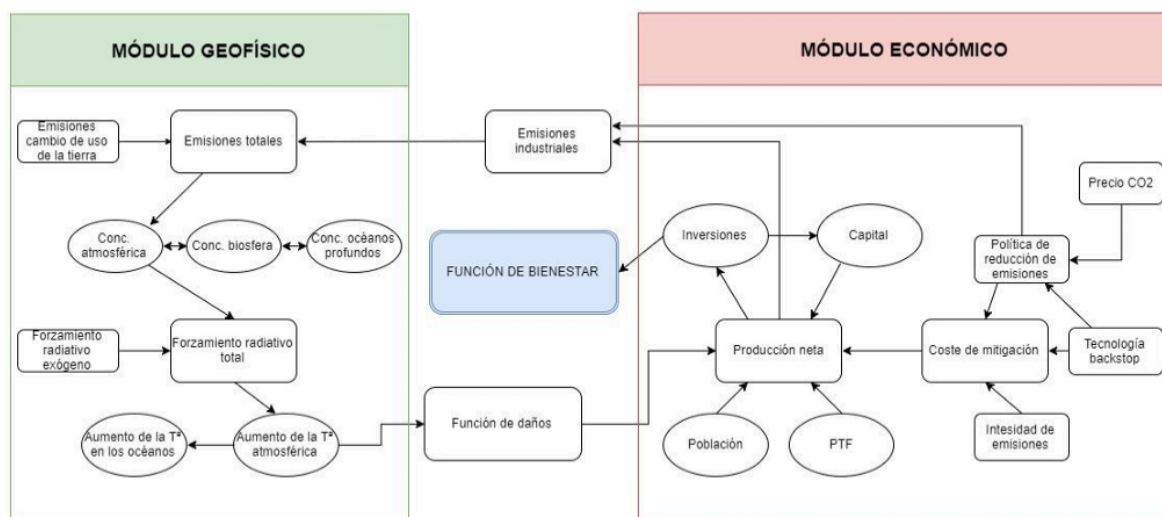
5. APROXIMACIÓN A LA DETERMINACIÓN DE COSTOS DE INACCIÓN

5.1 MARCO TEÓRICO

William Nordhaus, Premio Nobel de Economía en el 2018, por sus modelos sobre economía y clima, desarrolló un modelo dinámico (DICE model) que incluye un sistema de circuito cerrado para analizar emisiones, concentraciones, cambio climático, daños y controles de emisiones. (Nordhaus, 1994)⁵⁶. Los principios y elementos del modelo DICE permitieron iniciar la conceptualización de la economía del cambio climático para la comprender las consecuencias de los costos de inacción (Ruiz Velasco, 2017) En la Figura 23 se puede apreciar el efecto de los *costos de mitigación* sobre la producción neta y consecuentemente sobre la función de bienestar. Si se aplican las previsiones económicas para adaptación y/o mitigación se obtendrá una producción neta (PN_1) si no se aplican o se reducen los presupuestos acordados se obtendrá una producción neta (PN_2). La diferencia $PN_1 - PN_2$ representa la perdida por no haber realizado la acción programada y es el punto de partida para considerar los costos de inacción. La Figura 23 ilustra como se vincula el modelo económico con el modelo geofísico y como la función de daños y las inversiones en mitigación y adaptación se acoplan para generar la producción neta.

Figura 23. *Esquema de Flujos del Modelo DICE*

⁵⁶ *DICE model* estima los costos y beneficios de acciones para frenar el cambio climático y para analizar el impacto de las estrategias de control en el tiempo y considera el rol de la incertidumbre y la "prima de riesgo" que implican las políticas para frenar el calentamiento global. Algunos de sus componentes clave son las variables integradas que combinan datos sobre crecimiento económico, emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), y cambios en la temperatura global facilitando la evaluación de políticas climáticas, al permitir simular diferentes escenarios para determinar su efectividad en la reducción de emisiones y mitigación del cambio.



Fuente: (Ruiz Velasco, 2017)

Para el 2001, el IPCC (IPCC, 2001), reportaba que algunos sistemas sociales y económicos, se han visto afectados por los aumentos en inundaciones y sequías y ha habido mayores pérdidas económicas por fenómenos meteorológicos catastróficos. A pesar de ese señalamiento advertía que *como estos sistemas también se ven afectados por los cambios en los factores socioeconómicos, tales como los desplazamientos demográficos y los cambios en el uso de las tierras, resulta difícil cuantificar los impactos relacionados con el cambio climático (ya sea antropogénico o natural) y con los factores socioeconómicos*. Esta acotación advierte sobre la necesidad de identificar con la mayor certeza posible cuales son los daños y sus costos atribuibles al cambio climático.

Stern advirtió que la evidencia de los cambios impone la necesidad de actuar, y hacerlo con urgencia, porque el cambio climático es una amenaza global que requiere una respuesta inmediata. Recalca que actuar pronto para mitigar sus efectos es más beneficioso económicamente que la inacción. Los impactos del cambio climático afectarán aspectos esenciales de la vida, como el acceso al agua, la producción de alimentos y la salud y en consecuencia podrían provocar hambre, escasez de agua e inundaciones costeras a gran escala. De acuerdo con sus estimaciones la inacción podría resultar en una pérdida del 5% al 20% del PIB mundial mientras que las medidas para reducir las emisiones tendrían un costo aproximado del 1% del PIB mundial (Stern N. , 2007).

Stern señala que no es posible predecir con total certeza las consecuencias del cambio climático, pero se cuenta con suficientes conocimientos para reconocer los riesgos. Al hacerlo está advirtiendo que ante las incertidumbres es preferible actuar y que en consecuencia los costos de la mitigación deberán entenderse como una inversión, un costo incurrido ahora y en las próximas décadas

para evitar el riesgo de consecuencias muy graves en el futuro. Si estas inversiones se realizan acertadamente, los costos serán razonables y, al mismo tiempo, se abrirá una amplia gama de oportunidades de crecimiento y desarrollo. Es un señalamiento que puede interpretarse como si el daño está ocurriendo y tiene un origen climático exclusivamente o es incrementado por un factor socioeconómico debe resolverse independientemente de una estricta atribución de efectos al cambio climático.

En 2018 Nordhaus advirtiendo que a pesar de que el cambio climático es uno de los mayores retos que enfrentan las naciones, podría ocurrir un escenario de políticas climáticas mínimas y en esas circunstancias las proyecciones sobre el cambio climático anticipan un aumento significativo de las temperaturas globales, con consecuencias potencialmente catastróficas. La incertidumbre asociada a estas proyecciones se incrementa debido a la falta de compromisos firmes para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. La mitigación y adaptación son cruciales, pero su efectividad se ve seriamente comprometida por la inacción política (Nordhaus W. , 2018). Es por esto por lo que es necesario mostrar los daños y las cifras de los costos de inacción para motivar a los gobiernos a actuar.

Los impactos descritos para la biodiversidad, las actividades económicas, las poblaciones autóctonas y las ciudades y población rural de la cuenca del Amazonas, constituyen el punto de partida para estimar el costo de la inacción de no concretar los compromisos enunciados en las NDC y NAP.

La metodología para determinar los costos de inacción frente a los efectos del cambio climático tiene sus orígenes en la economía ambiental y los análisis costo-beneficio con enfoque ambiental (Labandeira , León, & Vázquez, 2007) (Tietenberg & Lewis, 2019). Mediante este enfoque se busca evaluar las pérdidas económicas, sociales y ambientales asociadas con la falta de mitigación o adaptación a los impactos del cambio climático. Sin embargo, hay que advertir que: *el uso del análisis costo-beneficio en el debate sobre el cambio climático es controvertido debido al papel del criterio del valor actual.* (Tietenberg & Lewis, 2019)

El análisis evolucionó de evaluar únicamente los costos de mitigación hacia una comprensión más profunda de los impactos a largo plazo de la inacción, especialmente en regiones vulnerables, como las naciones en desarrollo y los pequeños estados insulares. Efectivamente, (Stanton & Ackerman, 2007) y (Bueno, Herzfeld, Stanton, & Ackerman, 2008) compararon un escenario optimista con uno pesimista. Bajo el escenario optimista se reducen sustancialmente las emisiones hacia mediados del siglo XXI, con reducciones adicionales hasta fines del siglo. Bajo el escenario pesimista (BAU) las emisiones de los gases de efecto invernadero continúan aumentando aceleradamente a lo largo del siglo XXI. Ambos escenarios se basan en el informe de 2007 del Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. ***El costo de la inacción***—o sea, la diferencia entre estos dos escenarios—puede verse como ***el ahorro potencial de actuar a tiempo de manera que se evite lo peor de las devastadoras consecuencias económicas del cambio climático.***

El proyecto *Economics of Adaptation to Climate Change (EACC)* (World Bank, 2010) analiza los costos y beneficios de las ***medidas de adaptación al cambio climático.*** evalúa la rentabilidad de diferentes estrategias y políticas de adaptación en diversos sectores y

regiones. El EACC fue diseñado para ayudar a priorizar inversiones y a diseñar políticas más eficientes para proteger a las poblaciones y las economías de los impactos del cambio climático. Se enfoca en la valoración económica de los daños climáticos y las medidas de adaptación.

El concepto de costos de inacción se fundamenta en la economía del bienestar, destacando los costos asociados a las externalidades no gestionadas, como las emisiones de gases de efecto invernadero. Estas externalidades generan impactos económicos y ambientales significativos si no se abordan adecuadamente. Efectivamente, (Nordhaus W. D., 2017) demuestra que existe incertidumbre sobre la trayectoria del cambio climático y sus impactos. Los rangos de incertidumbre para futuras emisiones, concentraciones, temperatura y daños son extremadamente amplios. Sin embargo, afirma que esto no reduce la urgencia de implementar políticas sólidas contra el cambio climático hoy. Al considerar las incertidumbres, la solidez de las políticas (medida por el costo social del carbono⁵⁷ o el impuesto óptimo al carbono⁵⁸) aumenta, no disminuye.

Sunita Narain⁵⁹ ha desarrollado una amplia labor con miras a concienciar y consensuar sobre la necesidad de un acuerdo efectivo y equitativo sobre el cambio climático, advirtiendo que cada vez cobra mayor relevancia. Sus publicaciones se basan en diferentes aspectos del régimen climático, desde aspectos de las posiciones de negociación hasta críticas de diversos mecanismos comerciales y opciones de mitigación y adaptación. Algunos puntos clave de su trabajo relacionados con este tema son:

- Enfoque en la equidad: Narain ha destacado la importancia de considerar la equidad y la justicia en las políticas climáticas.
- Impacto en los países en desarrollo: resalta cómo los países en desarrollo, a pesar de ser los menos responsables del cambio climático, son los más vulnerables a sus impactos. **Los costos de la inacción** se traducen en pérdidas económicas, inseguridad alimentaria, desplazamientos y otros efectos devastadores.

⁵⁷ El costo social del carbono (CSC) es una estimación, en dólares, de los daños económicos resultantes de emitir una tonelada adicional de dióxido de carbono a la atmósfera. El CSC presenta los efectos del cambio climático en términos económicos para ayudar a los responsables políticos y a otros responsables de la toma de decisiones a comprender el impacto económico de las decisiones que aumentarían o reducirían las emisiones.

⁵⁸ El impuesto óptimo al carbono, en términos económicos, internaliza las externalidades negativas del cambio climático al gravar las emisiones de gases de efecto invernadero. Su objetivo es alcanzar una reducción eficiente de emisiones al menor costo económico posible, promoviendo la adopción de tecnologías limpias y cambios en el comportamiento. El diseño del impuesto ideal considera factores como la elasticidad de la demanda de combustibles fósiles, el costo marginal de mitigación y los impactos distributivos.

⁵⁹ Sunita Narain es una ambientalista india. Actualmente es directora general del Centro para la Ciencia y el Medio Ambiente (CSE) de la India y editora de la revista *Down To Earth*. Es miembro del Consejo del Primer Ministro para el Cambio Climático, encargado de decidir las medidas para abordar los impactos del cambio climático.

- Defensa de soluciones sostenibles: promueve soluciones sostenibles que aborden el cambio climático sin comprometer el desarrollo de los países en desarrollo. Esto implica la transición a energías renovables, la adopción de prácticas agrícolas sostenibles y la protección de los ecosistemas.
- Conciencia sobre la emergencia climática: hace énfasis en que no hay conciencia sobre la emergencia climática y que el cambio solo será posible cuando ésta alcance el nivel de convicción.

5.2 PROPUESTAS METOLÓGICAS PARA LA DETERMINACIÓN DE COSTOS DE INACCIÓN

5.2.1 Estimación de pérdidas y daños.

Esta metodología proporciona un proceso ordenado para valorar económica y no económicamente las pérdidas y daños ocasionados por eventos climáticos atribuibles al cambio climático. Tal como está descrita se aplica a sucesos ocurridos; sin embargo, la metodología se puede adaptar a situaciones contingentes provenientes de modelos globales de simulación de cambios en las variables climáticas y su expresión como eventos hidrológicos extremos o de simulaciones basadas en fenómenos climáticos sucedidos previamente aplicados en áreas donde podría suponerse que pudieran ocurrir (MiAMBIENTE (Panamá); UNOPS; ICAT; Fundación NATURA , 2022).

El método comprende los siguientes aspectos

- *Recopilación de Información*: Incluye la evaluación de la información disponible, definición de métodos de recolección de datos y diagnóstico de zonas afectadas. Se obtiene y analiza la información disponible sobre eventos climáticos pasados y su impacto, según criterios pertinentes a obtener datos precisos y completos. Se evalúa el impacto en la zona específica afectada por el evento climático que se haya seleccionado.
- *Identificación de Pérdidas y Daños*: Se enfoca en eventos hidrometeorológicos extremos, ocurridos previamente y de baja frecuencia, tales como huracanes, tsunamis, lluvias torrenciales, sequías y fenómenos de El Niño/La Niña, identificando pérdidas económicas y no económicas. Las pérdidas se refieren a la pérdida directa de bienes y servicios, mientras que los daños implican impactos a largo plazo en infraestructuras y ecosistemas.
- *Valoración de Pérdidas*: Utiliza metodologías para valorar pérdidas económicas (daños a infraestructuras, pérdida de producción) y no económicas (impactos en la salud, bienestar social), incluyendo estudios de caso. Se realizan estudios de caso en áreas geográficas propias o similares para evaluar y documentar las pérdidas y daños en situaciones específicas. Los métodos y enfoques para valorar las pérdidas y daños comprenden: estimación de costo de reposición (el necesario reemplazar o reparar infraestructuras y bienes dañados); análisis costo-beneficio: relación entre los costos de implementar medidas de

reposición y los beneficios esperados. Valoración contingente: valor que las personas asignan a bienes y servicios ambientales sin precio de mercado. Para la valoración no económica: se usan técnicas de impacto social considerando cómo los eventos climáticos afectan la salud, el bienestar social y la calidad de vida. Evaluación de impactos culturales, efectos en el patrimonio cultural y los valores tradicionales.

- *Análisis de Vulnerabilidad*: Se identifican grupos vulnerables y se evalúa su capacidad para recuperarse de los impactos climáticos.
- *Cooperación internacional*: Se puede solicitar una evaluación de pérdidas y daños a la CEPAL que aplicará la metodología DaLa (Damage and Loss Assessment) desarrollada por esta institución.

5.2.2 Escenarios y simulaciones en la valoración de los costos de inacción.

(Pontet Ubal, 2017) indica: *El costo de inacción no es el costo de no hacer nada: es el costo de no hacer algo en particular. Pone énfasis en las consecuencias negativas de no seguir con la acción apropiada. Es un componente clave en la elaboración de los escenarios futuros: el de las políticas, ya sean solo diseñadas, aprobadas o en vías de implantación, implantadas, consolidadas o ya en condiciones de ser evaluados sus resultados. En este sentido, es fundamental para las decisiones con impacto más allá del horizonte temporal en el que se da la toma de decisiones.*

La medición del costo de la inacción requiere identificar las acciones hipotéticas que pueden evitarse, al menos en algún grado y las consecuencias negativas de no tomar un curso de acción. Los costos de inacción dependerán de las hipótesis definidas en los planes de acción y, contra ellas, se definirán las no acciones. Las acciones hipotéticas podrán estar basadas en intervenciones que generen tanto altos como bajos beneficios y costos. Las hipótesis de acción podrán estar basadas en una intervención simple o en múltiples en uno o varios sectores de una misma región. **Para calcular el valor económico de los daños ocurridos al no ejecutar las previsiones del plan de acción se deben seguir los siguientes pasos:**

- Identificar los impactos: Se deben identificar los múltiples impactos y los costos directos que resultarían de la inacción.
- Cuantificar los costos: De los múltiples costos de inacción identificados, se incluirán aquellos que puedan valorarse. Esto se debe a que estos costos están, en alguna medida, bajo el control de los responsables de la ejecución del plan de acción definido.
- Considerar la perspectiva del evaluador: La perspectiva adoptada por el evaluador determinará los costos que se incluirán en el cálculo de los costos de la inacción. Esto es particularmente importante en lo relativo a los costos no tasables.
- Evaluar los costos a través del tiempo: Se deben considerar conceptos clave, como:

- El horizonte temporal apropiado.
- La tasa de descuento para comparar costos en distintos momentos del tiempo.
- Estimación de costos no monetarios en el horizonte temporal.
 - Hay costos que pueden cuantificarse, pero cuya cuantía monetaria es difícil de identificar (por ejemplo, la mortalidad infantil y el impacto para sus familias).
 - Hay otros costos que no pueden cuantificarse, ni siquiera en términos no monetarios, como el dolor, sufrimiento o afecciones emocionales.
 - Es relevante identificarlos y exponerlos buscando formas alternativas. Para ello se puede recurrir a cuantificar algunos mediante el uso de escalas no monetarias. Los costos que se cuantifique en diferentes aspectos pueden presentarse como los elementos de un vector multidimensional o pueden listarse e identificarse en una tabla o presentarse en diagramas gráficos.

5.2.3 Modelo de Correlación.

(Chirinos, 2021), evaluó los efectos económicos del cambio climático, siguiendo la propuesta metodológica desarrollada por (Kahn, Mohaddes, Ryan, & et al, 2019) quienes usaron un modelo estocástico de crecimiento económico, que sometieron a afectaciones por las variables temperatura y precipitación, temperatura máximas y mínimas con desviaciones estándares positivas y negativas respecto a los valores promedios del periodo base. Estas variaciones las aplicaron a escenario económico base, al crecer menos, como consecuencia de la afectación a la temperatura, se alcanza un nivel de ingreso menor. La pérdida de ingreso respecto al escenario base, representa el costo del cambio climático.

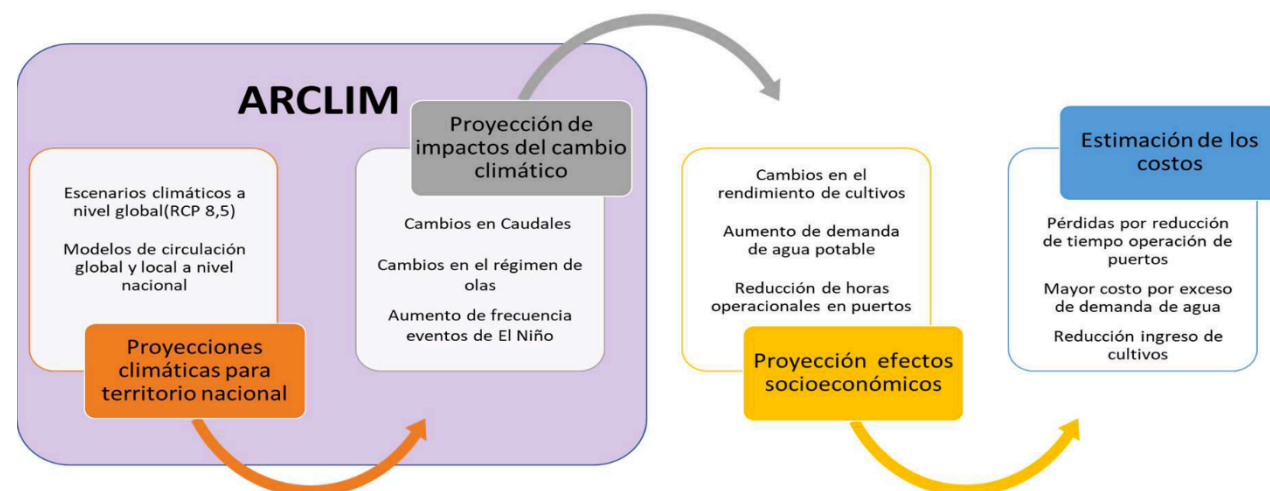
El modelo permite conocer el incremento del PIB per cápita para una región y para un año, consiste en una regresión donde la variable independiente es el crecimiento del PIB per cápita en una región j y un año t y las variables independientes son las desviaciones de los indicadores climáticos (precipitación y temperatura) en los periodos t y $t-1$ en la región considerada, también considera las variables geográficas de la región (altitud, bioma) y las variables socio-económicas de la región (población y producto).

5.2.4 Modelo contrafactual.⁶⁰

⁶⁰ Contrafactual significa contrario a los hechos o algo que no ha sucedido, pero pudo haber sucedido. El término contrafactual se utiliza en diferentes contextos, como en el pensamiento, en la economía y en la evaluación de políticas. Pensamiento contra fáctico: Es un razonamiento hipotético que consiste en imaginar las

La inacción es considerada como el contrafactual o la referencia contra la cual comparar posibles acciones o políticas que contrarresten los efectos del cambio climático. Así, la estimación de los costos económicos de la inacción permite apreciar los beneficios de las acciones y políticas de mitigación y adaptación (Melo, Samaniego, Ferrer Carbonell, & et al , 2023). La Figura 24 describe el método propuesto.

Figura 24. Esquema metodológico general para la estimación de los costos de inacción frente al cambio climático



Fuente: (Melo, Samaniego, Ferrer Carbonell, & et al , 2023)

- *Consideraciones en la estimación de los costos.*

Se realiza por sectores económicos: agricultura, energía, minería y pesca industrial y se adopta el escenario RCP 8.5: por representar uno de los escenarios más extremos en términos de la concentración de GEI. Bajo este escenario se identifican los efectos físicos del cambio

climático sobre cada uno de los sectores y se procede a la evaluación económica de los efectos identificados

- *Incorporación de la adaptación en los modelos.*

El modelo permite considerar dos tipos de adaptación: (i) adaptación endógena o autónoma que consiste en acciones que se espera ocurran sin intervención de políticas gubernamentales y que tenga efectos parciales en la economía y (ii) adaptación planificada que corresponde a una acción sectorial o multisectorial

- *Variables climáticas y socioeconómicas analizadas.*

consecuencias de algo que no ha sucedido o que no sucederá. Análisis contrafactual: Es una técnica que se utiliza para evaluar el impacto de las políticas. Consiste en comparar los resultados de diferentes escenarios de políticas. Se puede realizar utilizando modelos económicos, datos históricos o estudios experimentales. (IA Google, 2025)

Cuadro 15. Variables analizadas y fuentes de información para el análisis del costo económico de la inacción a mediados de siglo y fin de siglo XXI

Sector	Variables climáticas	Variables Socioeconómicas	Método de valoración del costo de inacción
Agropecuaria	Cambios en el rendimiento de cultivos		Cambio en los ingresos netos acumulados del sector agrícola a partir de la situación actual bajo el escenario RCP 8.5 al 2050.
Agua potable	Cambio en caudales Temperatura Precipitación	Proyección de población Consumo de agua potable por hogar	Oferta de agua y la demanda residencial de agua potable basada en variables precipitación y temperatura, consumo y precio del agua,
Biodiversidad y turismo	Cambio de precipitación Cambio en temperatura Aumento de riesgo de incendios forestales Elevación de la isoterma cero Disminución de acumulación de nieve	Metodología de transferencia de beneficios para la estimación del valor.	Relación del clima actual con la distribución de especies de fauna y flora, proyectando la distribución futura (2050) con escenario RCP 8.5 y el modelo ARCLIM. Se valorizan estos cambios a través de los servicios ecosistémicos que la fauna y la flora generan.
Energía	Cambio en caudales Temperatura		Impactos de cambios en precipitaciones y temperatura en los costos del sistema eléctrico nacional.
Pesca y acuicultura	Cambio en régimen de olas		
	Aumento de frecuencia de eventos de “El Niño”		
	Eventos de floraciones masivas		
Puertos y playas	Cambio en régimen de las olas	Estimación de viajes de recreación de hogares chilenos	
	Nivel medio del mar		

Sector	Variables climáticas	Variables Socioeconómicas	Método de valoración del costo de inacción
Salud	Temperatura Humedad específica	Proyección de población	
Minería		Estimación del precio del cobre a largo plazo	

Nota: Elaboración propia a partir de (Melo, Samaniego, Ferrer Carbonell, & et al , 2023)

5.3 PROPUESTA METODOLÓGICA PARA DETERMINACIÓN DE COSTOS DE INACCIÓN EN LA CUENCA AMAZÓNICA

La metodología propuesta para calcular los costos de inacción frente al cambio climático en la cuenca del Amazonas se basa particularmente en el **modelo contrafactual** utilizando indicadores climáticos (precipitación y temperatura), datos registrados y proyecciones o escenarios de acciones antrópicas (deforestación e incendios de vegetación) y su retroalimentación en variables climáticas, indicadores biológicos representativos de la biodegradación de los ecosistemas y modelos de simulación de vulnerabilidad hídrica a partir de datos climáticos de modelos generales.

La metodología que se propone comprende seis etapas para la estimación de los costos de la inacción frente al cambio climático en la cuenca del Amazonas. Esta metodología emplea herramientas basadas en inteligencia artificial, como *Consensus.AI*, para analizar información científica y datos disponibles en la red, procesar y ayudar a obtener los resultados bajo la dirección del investigador.

La metodología busca proporcionar una **aproximación integral y basada en evidencia** para cuantificar los costos de no actuar frente a los impactos del cambio climático en la cuenca del Amazonas. Este enfoque articula la recopilación de información científica, la revisión de los resultados del uso de modelos predictivos, así como herramientas de inteligencia artificial, y la integración de datos económicos y ambientales.

Considerando la situación de vulnerabilidad al cambio climático de la cuenca del Amazonas, es imperativo evaluar los costos de la inacción desde un enfoque integral que considere no sólo las pérdidas económicas directas, sino también sus consecuencias ecológicas, sociales y culturales. Para ello busca atender esta necesidad a través de un diseño estructurado y multidimensional, que emplea herramientas avanzadas como *Consensus.AI* para analizar información científica, identificar impactos específicos y describir escenarios futuros. Este enfoque se complementa con las evidencias aportadas por artículos científicos que informan sobre datos obtenidos directamente en campo y con el aporte de comunidades locales. El uso de inteligencia artificial procura garantizar que las soluciones sean viables y estén alineadas con las realidades locales.

Asimismo, la metodología responde a objetivos globales como los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en particular el ODS 13 (**Acción por el clima**) y el ODS 15 (**Vida de ecosistemas terrestres**), al promover acciones informadas y estratégicas para mitigar los efectos del cambio climático.

La secuencia operativa de la propuesta consiste en:

Etapla 1: Identificación del problema y alcance del estudio.

- **Objetivo:** Definir los impactos del cambio climático en la cuenca del Amazonas, estableciendo su relevancia ecológica, social y económica. Se identifican los límites espaciales (toda la cuenca o subregiones específicas) y temporales (proyecciones a corto o largo plazo).
- **Información requerida:** Revisar estudios previos, informes climáticos (e.g., IPCC) y bases de datos relevantes.
- **Actividades:**
 - Definir los impactos del cambio climático relevantes para la cuenca del Amazonas (p.ej., pérdida de biodiversidad, impactos en comunidades indígenas, deforestación, etc.).
 - Determinar el alcance espacial y temporal del análisis.
 - Revisar estudios existentes sobre cambio climático en la región para identificar brechas de conocimiento.
- **Información requerida**
 - Artículos científicos sobre impactos del cambio climático en la cuenca del Amazonas.
 - Informes climáticos y bases de datos ambientales globales (p.ej., IPCC, FAO, NASA).
 - Estudios de casos similares en otras regiones.
- **Productos intermedios:**
 - Documento base con la definición del problema y los límites del análisis.
 - Lista inicial de indicadores clave para evaluar los costos de inacción.
 - Documento inicial que detalle el alcance del estudio y la identificación de indicadores clave.

Etapla 2: Selección y análisis de impactos específicos.

- **Objetivo:** Identificar sectores críticos afectados, como biodiversidad, recursos hídricos y medios de vida humanos. Priorizar impactos según relevancia y probabilidad de ocurrencia. Este proceso identifica los impactos con mayor relevancia y probabilidad de ocurrencia en función de sucesos como deforestación, cambios en los ciclos hidrológicos o actividades económicas con potencial de generar daños ambientales y retroalimentar cambios climáticos.
- **Información requerida:** Estudios de vulnerabilidad y evaluaciones sectoriales específicas.
- **Actividades:**

- Identificar los principales sectores afectados (e.g., ecosistemas, agricultura, agua, comunidades humanas).
- Realizar una búsqueda en Consensus.AI, Perplexity, Gemini, Deep Seek o similar de estudios que cuantifiquen los impactos del cambio climático en dichos sectores.
- Priorizar los impactos más relevantes según su magnitud y probabilidad.
- **Información por recopilar:**
 - Estimaciones de impacto económico, social y ecológico por sector.
 - Estudios de vulnerabilidad en la región amazónica.
 - Indicadores que permitan relacionar impactos y costos (p.ej., hectáreas deforestadas vs. pérdida de servicios ecosistémicos).
- **Productos intermedios:**
 - Matriz de impactos priorizados, con evidencia respaldada por estudios.
 - Lista detallada de indicadores para cuantificar cada impacto.
 - Matriz de impactos priorizados con indicadores detallados para cada sector.
 - Estudios que modelen escenarios climáticos relacionados.

Etapa 3: Identificación de escenarios de inacción.

- **Objetivo:** Proyectar tendencias actuales (deforestación, incendios forestales, zonas agropecuarias, emisiones de CO2) y diseñar escenarios de inacción que describan las posibles consecuencias de no intervenir. Los escenarios permiten visualizar el alcance de las pérdidas en diferentes condiciones de inacción.
- **Información requerida:** Escenarios climáticos regionales y casos análogos en otras regiones.
- **Actividades:**
 - Diseñar escenarios donde no se toman acciones significativas contra los impactos identificados.
 - Proyectar las tendencias actuales hacia el futuro (p.ej., aumento de temperaturas, deforestación, pérdida de biodiversidad).
- **Información por recopilar:**
 - Proyecciones climáticas regionales (p.ej., de modelos CMIP6).
 - Estudios sobre los costos del cambio climático en otros contextos aplicables.
 - Escenarios narrativos y cuantitativos de inacción.
 - Base de datos de tendencias esperadas sin intervención.

- Narrativas y proyecciones cuantitativas de escenarios de inacción.

Etapa 4: Valoración económica de impactos

- **Objetivo:** Cuantificar los costos económicos derivados de la inacción, utilizando metodologías como valoración de servicios ecosistémicos y valor presente. Estimación de los costos monetarios asociados a los impactos. Estas estimaciones se fundamentan en datos de servicios ecosistémicos, salud pública y daños estructurales, entre otros.
- **Información requerida: Datos económicos históricos y metodologías económicas validadas.**
- **Descripción de las actividades:**
 - Aplicar metodologías económicas (p.ej., costo de oportunidad, costo-beneficio, valoración contingente) para calcular el costo de los impactos identificados.
 - Integrar los resultados de estudios previos encontrados en Consensus.AI.
 - Validar las estimaciones con análisis comparativos en casos similares.
- **Información por recopilar:**
 - Datos sobre costos asociados a pérdida de servicios ecosistémicos, daños agrícolas, migraciones forzadas, etc.
 - Metodologías económicas relevantes de la literatura.
- **Productos intermedios:**
 - Estimaciones preliminares de costos por impacto.
 - Informe técnico con las bases y supuestos del análisis.
 - Informe técnico con estimaciones preliminares de costos.

Etapas 5: Integración y validación de resultados.

- **Objetivo:** Consolidar los resultados de todas las etapas en un modelo integrado, validando mediante análisis de sensibilidad y consultas con expertos.
- **Información requerida:** Opiniones de expertos y estudios comparativos.
- **Descripción de las actividades:**
 - Consolidar los costos estimados en un modelo integrado.
 - Revisar la robustez de los resultados mediante análisis de sensibilidad.
 - Validar con expertos y comparar con estudios previos en la región o contextos similares.
- **Información por recopilar:**
 - Opiniones de expertos y validaciones externas.
 - Estimaciones de sensibilidad para ajustar las incertidumbres.
- **Productos intermedios:**
 - Modelo integrado de costos de inacción.
 - Informe de validación y sensibilidad.
 - Modelo integrado con resultados validados.

Etapas 6: Comunicación de resultados y recomendaciones

- **Objetivo:** Presentar resultados y visualizaciones que faciliten su interpretación. Proponer estrategias para mitigar los costos de la inacción. Informe final accesible a tomadores de decisiones y partes interesadas. Recomendaciones específicas para adaptarse o mitigar los impactos identificados
- **Información requerida:** Información adicional para contextualizar las recomendaciones.
- **Descripción de las actividades:**
 - Redactar un informe final con los resultados y su relevancia para tomadores de decisiones.
 - Elaborar visualizaciones claras de los costos y sus impactos asociados.
 - Generar recomendaciones para minimizar los costos identificados.
- **Información por recopilar:**
 - Ejemplos de comunicación efectiva de impactos climáticos.

- Estudios que apoyen las recomendaciones propuestas.
- **Productos Finales**
 - Informe final listo para su difusión.
 - Resumen ejecutivo con gráficos y puntos clave para tomadores de decisiones.
 - Informe final y resumen ejecutivo.

5.4 APRECIACIÓN DE LAS VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL METODO PROPUESTO

5.4.1 Ventajas.

- **Integración de Inteligencia Artificial:** El uso de Consensus.AI., Perplexity, Chat GPT, Gemini y otras herramientas digitales permite un análisis más eficiente y exhaustivo de la literatura científica, reduciendo sesgos y aumentando la precisión.
- **Enfoque sistémico:** La metodología aborda los costos de inacción desde múltiples perspectivas (social, económica y ecológica), proporcionando un análisis integral.
- **Adaptabilidad:** Puede ajustarse a diferentes contextos geográficos y temporales, lo que la hace aplicable en diferentes regiones de la cuenca del Amazonas.
- **Validación continua:** El uso de modelos predictivos asegura que los resultados sean sólidos y estén alineados con la evidencia más reciente.

5.4.2 Desventajas.

- **Dependencia de datos existentes:** La calidad y disponibilidad de datos científicos y económicos en la región pueden limitar la precisión de los resultados.
- **Requiere competencias especializadas:** El uso de herramientas avanzadas como Consensus.AI y otras aplicaciones de IA demanda habilidades técnicas y acceso a tecnologías que pueden no estar disponibles en todos los equipos de investigación. La implementación de un enfoque tan integral puede requerir recursos significativos en términos de tiempo, financiamiento y capacitación.

5.5 VACÍOS DE INFORMACIÓN POTENCIALES Y ESTRATEGIAS DE SOLUCIÓN

5.5.1 Falta de datos regionales detallados.

La cuenca del Amazonas carece de datos consistentes y actualizados lo que podría limitar la precisión de las estimaciones, presenta vacíos de datos precisos y actualizados sobre biodiversidad, emisiones de carbono, recursos hídricos y la magnitud de impactos locales (véase Capítulo 2). Esto se debe a la limitada infraestructura científica y a las dificultades de acceso a zonas remotas.

Para reducir esta limitación se pueden adoptar estrategias como:

- **Ampliación de redes de monitoreo ambiental:** Instalar estaciones de monitoreo adicionales para medir variables climáticas, hidrológicas y de biodiversidad en áreas clave.
- **Fomento de colaboraciones internacionales:** Promover acuerdos con instituciones globales para financiar y desarrollar proyectos de recopilación de datos.
- **Uso de tecnologías avanzadas:** Implementar imágenes satelitales y drones para el mapeo de biodiversidad y monitoreo de cambios ambientales.

5.5.2 Fortalecimiento de bases de datos públicas.

- Crear y mantener plataformas regionales centralizadas donde los investigadores puedan compartir y actualizar datos relevantes.

5.5.3 Impactos económicos indirectos.

Las interrelaciones entre sectores económicos, como el turismo y la agricultura, no siempre están suficientemente modeladas en los estudios actuales. Los análisis existentes suelen enfocarse en los costos directos (pérdidas económicas inmediatas) y omiten interacciones complejas entre sectores como el turismo, la agricultura y los servicios ecosistémicos.

Para reducir esta limitación se pueden adoptar estrategias como:

- **Modelos económicos integrados:** Desarrollar modelos que consideren las relaciones entre múltiples sectores económicos y los servicios ecosistémicos.
- **Estudios de casos locales:** Realizar análisis específicos en áreas afectadas para identificar relaciones económicas indirectas no documentadas.
- **Colaboración intersectorial:** Involucrar a actores locales, como agricultores, empresarios turísticos y comunidades, en la identificación de estos impactos.

5.5.4 Proyecciones de largo plazo.

Aunque los modelos climáticos ofrecen proyecciones valiosas, existe incertidumbre en su capacidad para prever eventos extremos o interacciones complejas entre factores climáticos y antropogénicos. Los modelos climáticos disponibles presentan incertidumbres para prever eventos extremos, como sequías prolongadas o lluvias copiosas y para integrar las interacciones entre factores climáticos y actividades humanas y los cambios climáticos y las respuestas de la biodiversidad.

Para reducir esta limitación se pueden adoptar estrategias como:

- **Desarrollo de modelos híbridos:** Combinar modelos climáticos globales con datos locales para mejorar la precisión de las proyecciones.
- **Validación constante:** Comparar resultados modelados con observaciones actuales para calibrar y validar los modelos.
- **Capacitación en modelado:** Ofrecer formación especializada a investigadores locales para fortalecer sus habilidades en la creación y uso de modelos predictivos.

5.5.5 Impactos socioculturales.

La influencia del cambio climático en las comunidades indígenas, sus modos de vida y sistemas de conocimiento tradicional está poco documentada, lo que genera un vacío significativo en el análisis. Existen escasos datos sobre cómo el cambio climático afecta a las comunidades indígenas y sus sistemas de conocimiento tradicional. Esto limita la integración de este tipo de aspectos socioculturales en los análisis.

Para reducir esta limitación se pueden adoptar estrategias como:

- **Investigación participativa:** Involucrar a las comunidades indígenas en el diseño y ejecución de estudios, asegurando que sus conocimientos y perspectivas sean incluidos.
- **Documentación de conocimientos tradicionales:** Crear bases de datos donde se registren prácticas tradicionales relacionadas con la adaptación al clima.
- **Programas de sensibilización:** Diseñar iniciativas que fomenten la participación activa de comunidades indígenas en debates y políticas climáticas.

- **Apoyo institucional:** Establecer vínculos entre gobiernos locales y comunidades para garantizar que estas últimas tengan recursos para adaptarse y documentar sus experiencias.

5.6 PUNTOS DÉBILES DE LA METODOLOGÍA POR TIPO DE ACTOR Y ESTRATEGIAS PARA SUPERARLOS

El Cuadro 16 constituye un resumen de las debilidades de la metodología propuesta que se aprecian por tipo actor presente en las interacciones humanas identificadas en la Amazonía.

Cuadro 16. *Resumen de debilidades identificadas por actor y estrategia para superarla*

Actor	Debilidad Identificada	Estrategia para Superar la Debilidad
Tomadores de decisiones	Dificultad para interpretar resultados complejos.	Resúmenes ejecutivos con visualizaciones claras y mensajes adaptados.
Líderes del sector público	Falta de recursos y capacidad técnica para implementar recomendaciones.	Planes de implementación escalables y capacitación técnica.
Sector privado	Percepción de costos adicionales que afectan la competitividad.	Estudios de caso que muestren beneficios y retorno de inversión a largo plazo.
ONGs	Enfoque percibido como economicista, excluyendo aspectos humanos y ambientales.	Inclusión de datos cualitativos y narrativas humanas desde las primeras etapas.
Cooperativas	Poca representación de sus perspectivas en el análisis de impactos económicos.	Consultas participativas durante el análisis de impactos específicos.
Líderes sociales	Desconfianza hacia una metodología percibida como académica y desconectada de la realidad local.	Talleres comunitarios para explicar objetivos y recoger aportes locales.

Actor	Debilidad Identificada	Estrategia para Superar la Debilidad
Sector académico	Dependencia excesiva de tecnologías avanzadas, descuidando enfoques cualitativos.	Integrar enfoques tradicionales y fomentar colaboraciones interdisciplinarias.
Comunidad científica	Falta de validación externa rigurosa y baja replicabilidad en otros contextos.	Publicación en revistas revisadas por pares y promoción de la replicación en otros entornos.

5.7 APORTES A LA GESTIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA AMAZONÍA DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA

- **Innovación basada en herramientas avanzadas:** La metodología integra tecnologías de inteligencia artificial, como Consensus.AI, Perplexity, Gemini, Deep Seek entre otras para realizar búsquedas científicas sistemáticas y análisis avanzados. Esto garantiza una evaluación robusta y eficiente de los costos de inacción, alineándose con las prioridades de promover enfoques innovadores y basados en evidencia.
- **Enfoque multidimensional y holístico:** Aborda los costos de inacción desde perspectivas sociales, económicas, ecológicas y culturales, permitiendo obtener un análisis integral que favorece el diseño de políticas inclusivas y sostenibles.
- **Adaptabilidad para contextos diversos:** La estructura modular de la metodología permite que se adapte fácilmente a diferentes escalas geográficas y temporales. Esto la convierte en una herramienta flexible para proyectos piloto que puedan replicarse en otras regiones vulnerables al cambio climático.
- **Énfasis en la validación científica y social:** La metodología incluye procesos de validación con información disponible obtenida de información proveniente de comunidades locales y validada por pares, garantizando resultados confiables y relevantes. Esto es crucial para el PNUD, que busca fortalecer la legitimidad y aceptación de sus iniciativas.
- **Contribución al cumplimiento de los ODS:** El enfoque propuesto está directamente vinculado a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), como el ODS 13 (Acción por el Clima), ODS 15 (Vida de Ecosistemas Terrestres) y ODS 10 (Reducción de Desigualdades), lo que respalda las prioridades estratégicas del proceso hacia el desarrollo sostenible.

- **Impulso a la gobernanza climática:** La metodología promueve la participación de actores clave, incluyendo comunidades indígenas, ONGs y gobiernos locales, fortaleciendo la gobernanza climática a través de la inclusión y la cooperación multisectorial.
- **Prevención de costos futuros elevados:** Al proporcionar una evaluación de los costos de la inacción permitirá a los gobiernos nacionales y locales anticiparse a los impactos económicos, sociales y ambientales, reduciendo así costos futuros derivados de la mitigación tardía.
- **Fortalecimiento de capacidades locales:** La metodología destaca la necesidad de formación técnica y transferencia de conocimiento hacia actores locales. Esto estimula el fortalecimiento de la resiliencia a largo plazo.
- **Generación de un modelo replicable a nivel global:** El modelo que puede ser escalado o desescalado a conveniencia y por tanto adaptado a diversas regiones.
- **Visibilidad y legitimidad internacional:** El uso de una metodología innovadora y basada en evidencia científica constituye un referente en la lucha contra el cambio climático capaz de atraer mayor financiamiento y apoyo internacional para proyectos adaptación y mitigación de consecuencias del cambio climático en la Amazonía.

6. ESTIMACIÓN PRELIMINAR DE COSTOS DE INACCIÓN EN LA CUENCA AMAZONICA

6.1 ESCENARIO SELECCIONADO

La cuenca del Amazonas es uno de los ecosistemas más importantes del planeta, desempeñando un papel crucial en la regulación del clima global, la provisión de agua dulce y la conservación de la biodiversidad. Sin embargo, el cambio climático y las actividades humanas han puesto en riesgo su estabilidad, generando impactos económicos, sociales y ambientales significativos. Para analizar los costos de inacción ante los efectos del cambio climático en la cuenca del Amazonas, se decidió estimar las pérdidas económicas asociadas a la degradación del ecosistema bajo un escenario de *business as usual* para el período 2026-2030.

El análisis se basa en estudios científicos verificables y modelos económicos, proporcionando una estimación cuantitativa de los costos de inacción en diversas categorías, como biodiversidad, agricultura, salud, infraestructura y servicios ecosistémicos. Además, se incluyen variables adicionales como los impactos en el sector turístico, la producción de energía, los mercados globales de *commodities* y los costos de escenarios catastróficos.

6.2 OBJETIVOS

El objetivo principal es cuantificar los costos económicos de la inacción ante los efectos del cambio climático en la cuenca del Amazonas para el período 2026-2030. Los objetivos específicos incluyen:

- **Evaluar los costos económicos** asociados a la degradación del ecosistema amazónico, incluyendo biodiversidad, servicios ecosistémicos, agricultura, salud y otros sectores clave.
- **Incorporar variables adicionales** como los impactos en el sector turístico, la producción de energía, los mercados globales de commodities y los costos de escenarios catastróficos.
- **Proporcionar una estimación cuantitativa** del costo total de inacción bajo un escenario de *business as usual*.
- **Identificar vacíos en el análisis** y proponer estrategias para mejorar la precisión y relevancia de los resultados.
- **Facilitar la toma de decisiones** al proporcionar una base sólida para la implementación de políticas de mitigación y adaptación.

6.3 APLICACIÓN DEL MÉTODO PROPUESTO

Tal cómo se explicó en el Capítulo 5 el análisis se realizó utilizando una combinación de estudios científicos verificables, modelos económicos y datos empíricos. Los pasos clave fueron los siguientes:

- **Revisión de la literatura científica:** Se revisaron estudios relevantes sobre los impactos del cambio climático en la cuenca del Amazonas (ver Capítulo 2), incluyendo análisis de biodiversidad, servicios ecosistémicos, agricultura, salud y otros sectores.
- **Estimación de costos:** Se calcularon los costos económicos con base en la revisión de estudios asociados a cada variable que estimaron costos de impacto o inacción utilizando modelos de valoración económica y datos de impacto climático. Por tanto, el método solo usa cifras de otros autores. **Para esta estimación se empleó la herramienta “ConsensusAI⁶¹” a fin de acceder a la mayor cantidad de estudios posible.**
- **Inclusión de variables adicionales:** Se incorporaron variables adicionales como los impactos en el sector turístico, la producción de energía, los mercados globales de commodities y los costos de escenarios catastróficos.

61

https://consensus.app/?gad_source=1&gad_campaignid=20789663884&gbraid=0AAAAAqgO5PLSDTkpv5DbpEnCelf5eqI-A&gclid=CjwKCAjwulbBBhBvEiwAsNypvckcdnUPM4iji5clgVomKqMP2Yq9T8guwthMnp_73vhxtVrQzp6NVRoCY58QAvD_BwE

- **Análisis de superposición de costos:** Se verificó que los costos no se duplicaran entre categorías para evitar sobreestimaciones.
- **Identificación de vacíos:** Se identificaron áreas donde los datos o análisis estaban incompletos y se propusieron estrategias para mejorar la precisión.
- **Presentación de resultados:** Los resultados se organizaron en un cuadro resumen para facilitar la visualización.

6.4 DESARROLLO DEL ANÁLISIS

El análisis se centró en cuantificar los costos de inacción en diversas categorías, agrupadas de manera lógica. La RSL permitió identificar investigaciones que facilitaron la cuantificación de variables como:

Carbono perdido debido a la deforestación (Song, Huang, Saatchi, & et al, 2015) estimaron entre 2000 y 2010, la deforestación y sus efectos alcanzaron los siguientes valores:

- Deforestación anual media en el periodo (2000 – 2010) fue de 1.590.000 \pm 250.000 hectáreas
- Pérdida promedio de biomasa anual (2000-2010): 413.4 \pm 65 millones de toneladas métricas de biomasa por año.
- Emisiones promedio de carbono anuales (2000-2010): 180 \pm 70 millones de toneladas métricas de carbono por año.
- Densidad de carbono de los bosques talados (después de 2005): 130 toneladas métricas de carbono por hectárea (o 260 toneladas métricas de biomasa por hectárea).
- Densidad de carbono de los bosques remanentes (en 2010): 144 toneladas métricas de carbono por hectárea (o 288 toneladas métricas de biomasa por hectárea).
- Tasa de aumento de la densidad de carbono de los bosques talados (2005-2010): 7 toneladas métricas de carbono por hectárea por año (o 14 toneladas métricas de biomasa por hectárea por año).

Resumen de Valores Económicos:

- Los valores económicos más altos identificados en el estudio oscilan entre US\$ 56,72 \pm 10 ha/año y US\$ 737 \pm 134 ha/año. Estos valores corresponden al servicio de regulación climática, específicamente a la prevención de pérdidas económicas en la producción agrícola y energética debido a la reducción de lluvias.

6.4.1 Valor de la pérdida de biodiversidad y servicios ecosistémicos.

(Strand, Soares-Filho, Costa, & et al, 2018) identificaron diversos servicios ecosistémicos de la Amazonia, pero solo pudieron valorar el denominado *regulación climática*, tal como se indica a continuación.

- *Producción de Alimentos*: representado por la nuez de Brasil. No se proporciona un valor económico específico para la producción de nuez de Brasil por hectárea. Se reconoce como uno de los servicios ecosistémicos con valor económico.
- *Suministro de Materia Prima*: representado por el caucho y la madera. Caucho: no proporciona un valor económico específico para el suministro de caucho por hectárea. Madera: no se proporciona un valor económico directo por la producción sostenible de madera. Sin embargo, se determinan las pérdidas de rentas en la producción de madera por la degradación inducida por incendios.
- *Mitigación de Gases de Efecto Invernadero*: representado por la evitación de emisiones de CO₂, no se proporciona un valor económico directo por la mitigación de gases de efecto invernadero por hectárea. Se reconoce su importancia y potencial valor económico.
- *Regulación Climática*: representado por la prevención de pérdidas de rentas en la producción de soja, carne de res e hidroelectricidad debido a la reducción de las precipitaciones. El valor económico de este servicio se estima entre US\$ 56,72 ± 10 ha /año y US\$ 737 ± 134 ha/año. Los valores más altos se limitan al 12% del bosque restante, lo que sugiere que la capacidad de regulación climática más valiosa se concentra en áreas específicas.
- *Recursos de Biodiversidad*: no se asigna un valor económico directo a este servicio en términos de dólares por hectárea por año.

(Hanusch & Strand, 2023) avanzaron en la estimación del valor monetario mínimo de la Amazonía brasileña del modo se indica en el Cuadro 17 (Hanusch ed., 2023) . De acuerdo con su determinación la Amazonía genera al menos un valor anual de 317 000 millones de US\$, 3 veces más que el mayor valor del rango de 43 000 a 98 000 millones de US\$ que estimaron (en su opinión generosamente) como el valor asociado con la tala para obtener madera, ganadería, soja o minería.

Cuadro 17. *Valores de la Amazonía brasileña, con evaluación mínima de los valores de protección. Cifras en miles de millones de dólares anuales*

Valor de explotación (todo privado, uso directo)		Valor de protección			
		Valor privado (uso directo)	Valor público regional (uso indirecto)	Valor público global (uso indirecto)	
Agricultura				Valor de uso	
(cultivos o pastos)	25-75	Madera	1 Agricultura	7.5 indirecto	210
			Ganadería, Soja, otros	Almacenamiento de	
			8.7 productos	1.5 dióxido de carbono	210
			1.8 Agrícolas	2.5	
			0.2 Polinización	3.5	
		No maderable	6.7 No agrícola	12.5	Valor de opción 10
		Nueces de Brasil	Servicios de regulación hídrica (agua y erosión)	8.7	Biodiversidad 10
		Caucho	Clima regional	2.3	
		Otros no maderables	Protección contra incendios	1.5	
Valores de la madera	10-15	Turismo sostenible	2.3	Valores de existencia	
				Biodiversidad	35
				Cubierta forestal	30
Minería	8				
Total parcial	43-98	Total Parcial	12	Total parcial	20
Total	43-98			Total parcial	285
					317

Nota: *Valor privado:* Esto incluye la producción sostenible de madera, nueces de Brasil, caucho, turismo y otros bienes. *Valor público regional:* Esto incluye los beneficios del ecosistema para todo el continente, a través de la regulación climática local y la precipitación (los “ríos voladores” de las lluvias amazónicas benefician a todo el continente), la polinización y la protección que brindan las selvas intactas contra los incendios forestales en la Amazonía. *Valor público global:* Esto representa la mayor parte del valor de la Amazonía, en gran parte debido a su enorme capacidad para almacenar CO₂, que Hanusch & Strand valoraron de manera conservadora en US\$40 por tonelada. Además, un “valor de opción” considerable para la industria farmacéutica, que está asociado con la biodiversidad de la Amazonía. También hay valor en la mera existencia de la Amazonía y su biodiversidad, que se puede estimar a través de encuestas.

(Cardoso da Silva, Fernandes B., Topf, & et al, 2022) estimaron el costo de preservar el Amazonas brasileño con un enfoque sistemático que incluye la delimitación precisa de las áreas a conservar, la estimación del personal necesario para su manejo, y la consideración de costos de establecimiento y operación del sistema de conservación. El costo mínimo anual recurrente para conservar el 80% de la Amazonia brasileña se sitúa en un rango de 1.7 a 2.8 mil millones de dólares, con una inversión inicial adicional de 1.0 a 1.6 mil millones para establecer las áreas protegidas¹. dentro de áreas de conservación (unidades de conservación y tierras indígenas).

Su metodología, como se muestra a continuación, se basó en un análisis detallado de las áreas existentes y prioritarias para conservación, eliminando superposiciones para evitar doble conteo, y utilizando datos georreferenciados oficiales.

- **Delimitación del área a conservar:**

Se consideró la Amazonia brasileña según la delimitación oficial del Instituto Brasileño de Geografía y Estadística (IBGE), en ellos se identificaron cuatro grupos de áreas: (1) unidades de conservación, (2) tierras indígenas, (3) tierras públicas no designadas y (4) áreas prioritarias de conservación. Se eliminaron los solapamientos siguiendo un orden jerárquico específico (indígenas primero, luego unidades de conservación, tierras públicas no designadas y finalmente áreas prioritarias)¹.

- **Clasificación de costos:**

Los costos para lograr la conservación se asignaron a tres categorías principales: (1) *Costos de gestión*: gastos recurrentes para administrar las áreas protegidas (personal, infraestructura, monitoreo, asistencia comunitaria, etc.). El personal requerido se estimó en relación con dos tamaños de áreas pequeñas y grandes para cada una de las cuales se asignó una densidad estándar de personal, los salarios se fijaron según el promedio pagado en Brasil. Los costos de administración y generales se estimaron como un porcentaje del costo de personal; (2) *Costos de establecimiento*: inversión inicial para crear nuevas áreas protegidas (inventarios biológicos, consultas sociales, demarcación de límites, infraestructura). Los costos de establecimiento se estimaron como 1.8 veces los costos anuales de gestión y (3) *Costos a nivel de sistema*: gastos para coordinar y mantener el sistema de conservación a nivel regional y nacional (planificación, coordinación, presupuesto), se calcularon como un 15-20% adicional de los costos anuales de gestión recurrentes.

6.4.2 Valor de los servicios a la agricultura y pérdidas de productores agrícolas.

(Vasconcelos Alves de, Pereira Santos dos, Lópes, & et al, 2022) demostraron que la pérdida económica por efectos del cambio climático sobre los agricultores ribereños en la Amazonia es significativa y multifacética, afectando principalmente sus cultivos y fuentes de ingreso.

Efectivamente, en la Amazonia peruana, la agricultura representa alrededor del 60% de los ingresos familiares para la población ribereña. Eventos climáticos extremos como las crecidas repentinas o *repiquetes*⁶² que inundan las áreas de cultivo pueden provocar la pérdida total de las cosechas. (Armijos, Figueroa, Espinoza, & et al, 2021)

En la Amazonia brasileña, el cambio climático y la deforestación están llevando a un aumento de la temperatura y a una estación seca más larga y seca, lo que puede causar pérdidas agrícolas en el orden de 1000 millones de dólares al año. Esto afecta a cientos de miles de personas que dependen de la agricultura y los recursos naturales del bosque (Nobre & Arieria , 2023).

Las referencias citadas indican que la pérdida económica directa para los agricultores ribereños puede ser muy alta, como la reducción del 50% de ingresos familiares en casos de inundaciones repentinas, y a nivel regional, las pérdidas agrícolas pueden alcanzar hasta 1000 millones de dólares anuales. Estas pérdidas afectan no solo la economía sino también la seguridad alimentaria y la sustentabilidad de las comunidades ribereñas en la Amazonia.

(López Feldman & Hernández Cortéz, 2016) realizaron una extensa investigación bibliográfica sobre el efecto del cambio climático en los países de centro y Suramérica. Se aprecia en el Cuadro 9 que las investigaciones usan diversos indicadores para valorar el impacto económico del cambio climático sobre la agricultura, los relevantes a los efectos de la estimación de costos de inacción en la Amazonía indican (i) una pérdida de 14% de ingreso por agricultura para 2020, 20% para 2060 y 53% para 2100. Sin embargo, se carece de una corroboración de la predicción para 2020; (ii) Pérdidas de entre 12 y 17% del valor total de tierra.

Cuadro 18. Estudios sobre el impacto del cambio climático en la agricultura de América Latina

Autor	País	Resultados Principales
Galindo et al. (2015)	Perú	Pérdidas entre 8 y 13% de los ingresos.
López Feldman (2013)	México	Aproximadamente 240 000 hogares adicionales por debajo de la línea de pobreza.
Mendelsohn, Arellano González, Christensen (2009)	México	Pérdidas entre -42 y -54% del valor de tierra.
Mora, Ramírez, Ordaz, Acosta y Serna (2010)	Guatemala	La renta de la tierra por hectárea disminuye en 5.8 dólares (5% de la renta promedio).
Mora, Ramírez, Ordaz, Acosta y Serna (2010)	Panamá	El valor de venta de la finca o parcela disminuye en 7.15 dólares (24% del valor promedio de venta de la finca).
Ordaz, Ramírez, Mora, Acosta y Serna (2010)	Costa Rica	El ingreso por alquiler de la propiedad disminuye cerca de dos dólares.

⁶²Por ejemplo, en 2012, un repiquete de 22 días en la zona de Muyuy (cercana a Iquitos) causó la pérdida completa de la cosecha, lo que representó una reducción del 50% del ingreso familiar para esa comunidad.

Autor	País	Resultados Principales
Ordaz, Ramírez, Mora, Acosta y Serna (2010)	El Salvador	El ingreso por alquiler de la propiedad disminuye en 46 centavos de dólar (2% de la ganancia mensual por alquiler de propiedad).
Ordaz, Ramírez, Mora, Acosta y Serna (2010)	Honduras	Disminución de las ganancias agrícolas mensuales promedio de 1.7 dólares (1% del ingreso promedio, pero 23% de hogares con menos ingresos).
Ponce, Blanco y Giupponi (2013)	Chile	Variación de 7.4 a 40% en pérdidas de rendimientos dependiendo de la región y cultivo.
Ordaz, Mora, Acosta, Serna y Ramírez (2010)	Nicaragua	El valor contingente de la renta de la tierra disminuye en 2.20 dólares (5% del valor con tingente de la renta de tierra).
Ramírez, Ordaz, Mora, Acosta y Serna (2013)	Belice	Para 2010, existirían pérdidas acumuladas de 35% del PIB de 2007.
Seo (2008)	Sudamérica	Pérdida de entre 8 y 20% del valor de la tierra.
Seo (2010)	Sudamérica	Pérdida de entre 2 y 8% de valor de tierra.
Seo y Mendelsohn (2008a)	Sudamérica	Pérdida de 14% de ingreso para 2020, 20% para 2060 y 53% para 2100.
Seo y Mendelsohn (2008b)	Sudamérica	Se elegirían calabaza, frutas y vegetales más frecuentemente. Se elegirían maíz, papas, leguminosas y trigo menos frecuentemente.
Skoufias y Vinha (2013)	México	Los choques de temperatura afectan el ingreso de las familias dependiendo la temporalidad del choque
Timmins (2006)	Brasil	Pérdidas de entre 12 y 17% del valor total de tierra.

Fuente: (López Feldman & Hernández Cortéz, 2016)

La cifra estimada por Strand citada por (Hanusch ed., 2023) corresponde al *valor público de la selva tropical brasileña por sus servicios ecosistémicos, que solo para la región de América del Sur se estiman en 20.000 millones de dólares anuales. Estos servicios incluyen las precipitaciones necesarias para la agricultura de la región y la protección contra la erosión del suelo y los incendios.*

6.4.3 Costos médicos, sanitarios, reducción de vida y muertes debido a incendios forestales.

Si bien los incendios forestales no son directamente provocados por el cambio climático, contribuyen al incremento de sus efectos y las condiciones de sequedad determinadas por cambio climático favorece el inicio y expansión de los incendios. Cada temporada seca debido a las quemas, muchas áreas pobladas quedan bajo una nube de humo. El material particulado fino (PM_{2.5}) producto de la ignición de la biomasa penetra profundamente en los pulmones, agravando enfermedades respiratorias y cardiovasculares.

(Tingting, Rongbin, Xu, & et al, 2022) evaluaron los riesgos y la carga de mortalidad asociados con la exposición a corto plazo a partículas finas (PM_{2,5}) relacionadas con incendios forestales con un diámetro $\leq 2,5 \mu\text{m}$. Para el periodo 2000 – 2016 en la zona más propensa a incendios forestales de Brasil, encontraron los siguientes incrementos de mortalidad atribuible a incendios forestales

- 0,65 % de la mortalidad por todas las causas,
- 0,56 % de la mortalidad cardiovascular
- 1,60 % de la mortalidad respiratoria atribuible a la exposición aguda a PM_{2,5} relacionado con incendios forestales

En el estudio, también hallaron asociaciones más fuertes en mujeres y adultos ≥ 60 años, así como diferencias geográficas en los riesgos y cargas de mortalidad.

(Yao, Shanshan, Rongbin, & et al, 2023) asociaron la exposición crónica al humo de incendios forestales en Brasil a pérdidas económicas por mortalidad y determinaron en unos \$5.000 millones de USD al año el valor de la estadística de vidas acortadas, buena parte de ello concentrado en la Amazonía. Tan solo en 2019, se registraron picos de hospitalizaciones por afecciones respiratorias en niños y ancianos de regiones amazónicas durante los incendios, saturando sistemas de salud locales (Villar, 2021). Los costos médicos directos de atender estos casos (hospitalizaciones, oxígeno, etc.) suman cientos de millones de reales en años (Fiocruz & WWF Brazil, 2021). A escala de 2026–2030, de mantenerse la tendencia de incendios intensos, la pérdida anual por impacto en salud (entre gastos médicos y valor económico de vidas perdidas) podría situarse entre \$1.000 y \$5.000 millones.

6.4.4 Daños a la infraestructura.

Valor International Business publicó un reportaje elaborado por (Zurur, 2024) basado en datos aportados por Manaus Industrial Hub (PIM), Amazonas State Industry Center (CIEAM), Federal University of Amazonas (UFAM), Amazonas State Industry Federation (FIEAM), Sustainable Amazon Foundation (FAS). Adicionalmente, Amazonas State Industry Center financió un recorrido de campo que permitió la visita a la Escuela Municipal Indígena Kanata T-Ykua, en la comunidad de Três Unidos, a orillas del río Cuieiras, a aproximadamente una hora y media en barco desde Manaus.

Con base en toda esta información (Zurur, 2024) informó sobre los estimados de costo de los siguientes daños:

- El Centro Industrial del Estado de Amazonas (CIEAM) estima que la sequía ha añadido más de R\$ 1,3 mil millones en costos para las empresas de la Zona Franca de Manaus. Ello debido al llamado *recargo por sequía*, que incluye el aumento de los

costos de flete, las tarifas de almacenamiento de productos en almacenes de terceros y los cargos adicionales de los buques de transporte de contenedores.

- Los costos no cuantificados comprenden inasistencia a las escuelas, aislamiento y pérdida de relaciones entre poblados. Resumido en las palabras del maestro escolar de la comunidad de Três Unidos: *El impacto es profundo: físico, mental y espiritual. La comunicación se interrumpe.*

Las comunidades ribereñas experimentan daños recurrentes en infraestructura, pérdidas agrícolas y alteraciones en actividades pesqueras. Las fuertes inundaciones de 2014 afectaron a más de 100,000 personas en la región del Acre (Sena, Beser de Deus, & Freitas, Extreme Events of Droughts and Floods in Amazonia: 2005 and 2009, 2012). Los costos de reparación y mitigación en áreas urbanas y rurales se han incrementado hasta en un 40% desde 1990, reflejando la necesidad de mayor resiliencia (Marengo, Espinosa, Fu, & et al, 2021).

El Banco Interamericano de Desarrollo (BID) estimó que el gasto en infraestructura y el gasto social necesarios para cumplir con los objetivos de cambio climático en América Latina y el Caribe están entre 7% y 19% del PBI de la región al 2030 (entre US \$470 mil y 1,300 mil millones en 2030) dependiendo de las condiciones iniciales y de las metas económicas y sociales propuestas (Galindo, Hoffman, & Vogt-Schilb, 2022).

Específicamente, de acuerdo con la RSL realizada por los autores el gasto en infraestructura se estima en alrededor de 5% del PIB que representa aproximadamente US \$279 mil millones en 2019, con un rango probable entre 2% y 8% del PIB. Esto corresponde a un monto entre US \$111 mil y US \$447 mil millones anuales en 2019. Los autores aclaran que de acuerdo con las evaluaciones consultadas, los rangos en la estimación de la inversión requerida en infraestructura son amplios y dependen de las trayectorias de crecimiento y demográficas, de las tecnologías, de la calidad y de la inclusión de costos de mantenimiento y operación, de las políticas públicas y de la incorporación de las opciones basadas en la naturaleza (Galindo, Hoffman, & Vogt-Schilb, 2022).

6.4.5 Pérdida de carbono almacenado.

La cuenca amazónica es uno de los mayores sumideros de carbono del planeta, almacenando enormes cantidades de carbono en sus bosques, turberas, suelos y otros reservorios naturales. Sin embargo, la inacción frente al cambio climático y la deforestación amenaza con liberar este carbono a la atmósfera, agravando el calentamiento global. Se estima que ya se ha perdido alrededor del 18% de los bosques amazónicos y otro 17% está degradado. (Vergara, Arias, Gachet, & et al, 2022) lo que indica que está acercándose peligrosamente a un punto de no retorno ecológico.

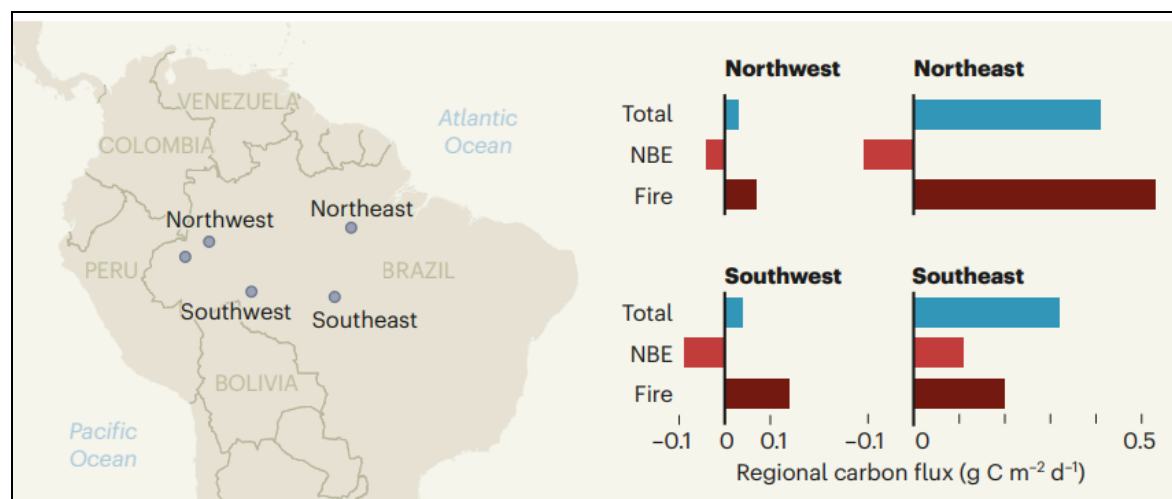
Con base en la RSL se presenta una estimación detallada de los costos económicos de la inacción durante el período 2026-2030, derivados de la pérdida de carbono almacenado en la Amazonía. La estimación se expresa en millones de dólares estadounidenses (USD) y abarca los nueve países amazónicos: Bolivia, Brasil, Colombia, Ecuador, Guayana Francesa, Guyana, Perú, Surinam y Venezuela,

Los ecosistemas amazónicos almacenan cantidad de carbono equivalente a varios años de emisiones globales. Un estudio reciente basado en datos satelitales de Planet encontró que solo los árboles de la Amazonía contienen ~56.800 millones de toneladas de carbono (56,8 Gt C) por encima del suelo (Amazon Conservation. Monitoring the Andes Amazon Program , 2024). Esto equivale a más de 200.000 millones de toneladas de CO₂ (GtCO₂) solo en biomasa aérea. Si se incluyen las raíces y el carbono del suelo, el almacenamiento total es aún mayor. Por ejemplo, se estima que los suelos amazónicos profundos (hasta 8 m) podrían contener del orden de 136 Gt C en Brasil (Fearnside & Imbrozio Barboza, 1998) y que las turberas de Perú almacenan en el bosque pantanoso de turba de la Amazonía peruana estimado en ~62.714 km² y 5.4 Pg de carbono (Lilleskov, c. 2023) (Hastie, Honorio Coronado, Reyna, & et al, 2022), casi igual al carbono en los bosques del Perú.

Estos depósitos de carbono han convertido históricamente a la Amazonía en un *pulmón* del planeta, actuando como sumidero y regulando el clima. Durante la última década (2013-2022) la Amazonía aún fue un sumidero neto pequeño (acumulando ~64,7 millones de toneladas de C) gracias a la absorción por bosques intactos (Amazon Conservation. Monitoring the Andes Amazon Program, 2024)

Sin embargo, la tendencia está cambiando. La combinación de deforestación, incendios y degradación está reduciendo la capacidad de absorción y partes de la Amazonía ya emiten más CO₂ del que absorben (Gatti L. V., Basso, Miller, & et al, 2021). La Figura 24 muestra la absorción o emisión de carbono por los biomas amazónicos para sus cuatro grandes regiones. Se aprecia que la región sureste constituye un emisor neto de carbono.

Figura 24. *Flujo de carbono en las diferentes regiones amazónicas*



Nota: En los gráficos de barras, el intercambio neto del bioma (NBE) representa el balance anual promedio de CO₂ absorbido por los bosques para la fotosíntesis en comparación con la cantidad de CO₂ producida por la descomposición de la materia orgánica (los valores negativos de NBE indican que el bosque actúa como un sumidero de carbono); «fire» representa las emisiones promedio de carbono producidas por incendios; y «total» representa la suma de NBE y las emisiones de incendios. Los valores de NBE indican que la mayoría de las regiones de la Amazonia son sumideros de carbono débiles, pero el sureste de la Amazonia es, en realidad, una fuente de carbono. (Denning, 2021).

Cada hectárea de selva amazónica contiene entre 150 y 200 toneladas de carbono en su biomasa (troncos, ramas, raíces), en promedio (Ometto, Aguiar,, & Martinelli, 2011), aunque en bosques primarios no perturbados puede superar las 200 t C/ha (Loarie, Asner, & Field, 2009). Adicionalmente, la conversión de bosques a pastizales y otros usos libera carbono del suelo acumulado durante siglos, y la intervención en zonas de turberas la emisión de carbono será significativa dado que la densidad de carbono es aún mayor (una hectárea de turbera amazónica puede almacenar >1.000 t C en el suelo orgánico) (Daichendt, Janovec, Tobler, & el al, 2025).

Tomando un valor conservador de ~700 toneladas de CO₂ por hectárea perdida (considerando biomasa y una fracción del carbono edáfico) (Alatorre, Caballero, Ferrer, & et al, 2019), la deforestación proyectada de 23,7 Mha implicaría emisiones brutas del orden de 16.000 millones de toneladas de CO₂ (16 GtCO₂) hacia 2030. Para dimensionar esto: es más CO₂ que el emitido anualmente por todo el mundo por la quema de combustibles fósiles (aprox. 34 GtCO₂/año). Vale notar que un informe de WWF ya advirtió que, de no tomarse acciones, hasta ~96 GtCO₂ podrían liberarse por la destrucción de la Amazonía al 2030 (Nepstand, 2007) – lo que subraya el enorme riesgo de seguir el curso actual.

Además de la deforestación total (bosques talados), la degradación parcial por incendios y talas selectivas contribuye a pérdidas adicionales de carbono (*emisiones ocultas*). (Walker, Gorelik, Baccini, , & et al, 2020) indicaron que la degradación representa el 47% de las emisiones amazónicas por cambio de uso de suelo. Aunque nuestras estimaciones se centran en la pérdida de carbono por deforestación, las emisiones por degradación e incendios recurrentes agravarían aún más el balance.

En cuanto a turberas amazónicas, tradicionalmente permanecieron intactas, pero la presión humana creciente empieza a afectarlas. En la Amazonía sur de Perú (Madre de Dios), la minería aurífera artesanal ha destruido más de 550 ha de turberas en los últimos años, liberando entre 0,2 y 0,7 millones de toneladas de carbono (Mt C) a la atmósfera (equivalente a ~0,7–2,6 Mt CO₂) (Daichendt, Janovec, Tobler, & el al, 2025). Alarmanamente, más de la mitad de ese daño ocurrió solo en los últimos 2 años (Daichendt, Janovec, Tobler, & el al, 2025). Se han identificado más de 10.000 ha de turberas en riesgo inmediato por minería en esa región, cuya pérdida podría liberar hasta 14,5 Mt C adicionales (~53 Mt CO₂) (Daichendt, Janovec, Tobler, & el al, 2025). A escala regional, las vastas turberas de la Amazonía baja de Perú (Pastaza-Marañón) aún están mayormente intactas, pero podrían volverse emisoras netas hacia finales de siglo por efecto del cambio climático (Wang, Zhuang, Lähteenoja, & et al, 2018) si no se protegen. Para 2026-2030, se proyectan emisiones significativas de turberas principalmente en Perú (y en menor medida en otros países) si la inacción persiste.

Finalmente, al remover la cobertura vegetal también se libera gradualmente carbono de otros sumideros: materia orgánica de los suelos minerales, biomasa de sotobosque, manglares costeros en la desembocadura amazónica, e incluso el carbono almacenado en sedimentos fluviales y pantanos no turbosos. Si bien su contribución relativa es menor, no es despreciable. Por ejemplo, la conversión de bosques a uso agropecuario puede ocasionar la pérdida de ~25% del carbono del suelo superior en décadas posteriores. En estos cálculos se incluyó una porción (~10%) para reflejar pérdidas de carbono edáfico en el quinquenio analizado. Con base a los datos obtenidos de las fuentes indicadas se estimó el costo de la inacción por país como función de la cantidad de CO₂ durante el periodo 2026 -2030, tal como se indica en Cuadro 19.

Cuadro 19. *Costo de la inacción por país como función de la cantidad de CO₂ durante el periodo 2026 -2030*

País	Bosque (MtCO ₂)	Turberas (MtCO ₂)	Suelos (MtCO ₂)	Otros (MtCO ₂)	Total CO ₂ 2026-30 (Mt)	Costo (mil millones USD) Mínimo	Costo (mil millones USD) Máximo
Brasil	9.705.000	0	1.078.000	0	10783000	53.91	269.55
Perú	2.350.000	55	261	0	2.666.000	13.33	66.65
Bolivia	1.280.000	0	142	0	1.422.000	7.11	35.55
Colombia	1.280.000	0	142	0	1.422.000	7.11	35.55
Venezuela.	149	0	17	0	166	0.83	4.15
Ecuador	80	0	9	0	89	0.44	2.2
Guyana	41.6	0	4.6	0	46.2	0.23	1.15
Surinam	41.6	0	4.6	0	46.2	0.23	1.15
Guayana Francesa	13.9	0	1.5	0	15.4	0.77	3.85
Total Cuenca.	14.892.000	55	1.659.700	(n.e.)	16.607.700	83.96	419.8

Nota: Los valores numéricos son aproximaciones basadas en escenarios de alta deforestación. *Otros* sumideros (p.ej. carbono de manglares, humedales no turbosos, etc.) no se cuantifican explícitamente aquí debido a su contribución relativamente baja en la región (n.e.: no estimado). El costo se calculó multiplicando el CO₂ total emitido por un costo social del carbono de 5 USD/t CO₂ (mínimo) y 25 USD/t CO₂ (máximo).

De acuerdo con (RAISG (Red Amazónica de Información Socioambiental Georeferenciada), 2022) *los bosques amazónicos que al año 2000 cubrían el 73,5% de esta región (6.226.022 km²), se han visto fuertemente impactados por la deforestación. En 20 años, del 2001 al 2020, la Amazonía ha perdido 542.581 km², es decir un 8,7% de la superficie boscosa observada al comienzo del periodo. Con dicha pérdida, al 2020, la Amazonía albergaba una superficie de bosque de 5.683.440 km²*

Brasil es el país que evidencia mayor cantidad anual de área deforestada del bosque amazónico, tal se aprecia en Cuadro 20.

Cuadro 20. *Bosque existente para el 2000 y deforestación en el periodo 2001-2020 en la región Amazónica y los países que la conforman*

País	Bosque al año 2000 (km ²)	Deforestación 2001-2020 (km ²)	% Deforestación con relación al año 2000
Bolivia	469.816	39.239	8,35%
Brasil	4.089.067	440.031	10,76%
Colombia	441.936	23.004	5,21%
Ecuador	101.558	6.232	6,14%
Guyana	188.447	418	0,22%

Guyane française	82.169	237	0,29%
Perú	731.419	29.806	4,08%
Suriname	138.656	689	0,50%
Venezuela	392.856	2.925	0,74%
Amazonía	6.635.924	542.581	8,7%

Fuente: (RAISG (Red Amazónica de Información Socioambiental Georeferenciada), 2022)

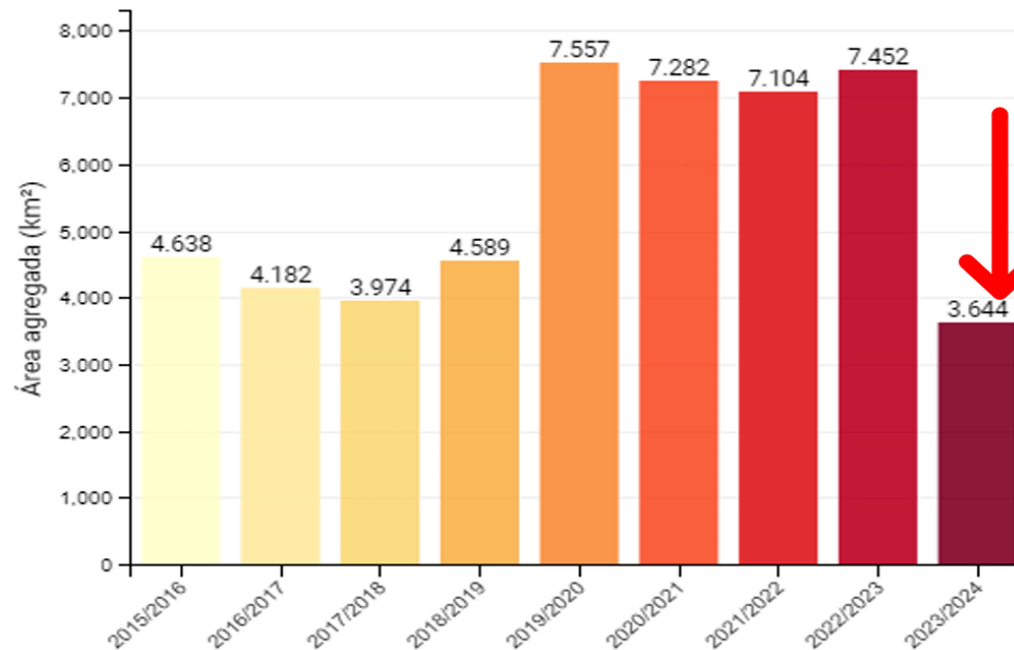
En Cuadro 19 se observa que Brasil domina la mayor proporción de emisiones por inacción y de la deforestación proyectada, con un costo climático de unos 53.915 millones de USD para 2026-2030.

Sin embargo, según la información proporcionada por el *Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais* (INPE) (Brasil. Ministerio de Meio Ambiente e Mudanca do Clima; Ministerio da Ciência, Tecnologia e Inovacao, 2024), relativa al monitoreo de deforestación en la Amazonia durante los últimos 10 años ha mostrado fluctuaciones con una tendencia reciente a la reducción significativa.

En el período de agosto a junio de 2024, el sistema DETER (Detección de Deforestación en Tiempo Real) reportó una caída del 51,1% en la deforestación en la Amazonia en comparación con el mismo período del año anterior, 2023. Esto representa el menor nivel de deforestación desde 2016 para ese lapso. Figura 25.

Figura 25. Deforestación en Amazonía brasileña. Periodos junio – agosto 2016 - 2024

agosto - junho



Fuente: (Brasil. Ministerio de Meio Ambiente e Mudanca do Clima; Ministerio da Ciência, Tecnologia e Inovacao, 2024).

La reducción de la deforestación también se observó en los estados con mayor incidencia: Pará (PA) tuvo una caída del 47,2%, Mato Grosso (MT) del 53,3%, Amazonas (AM) del 55,7% y Rondônia (RO) del 66,7% en el mismo período¹. Comparando con la década pasada, estos datos indican una mejora significativa en la reducción de la deforestación reciente, aunque los niveles históricos han sido altos en años anteriores. (Brasil. Ministerio de Meio Ambiente e Mudanca do Clima; Ministerio da Ciência, Tecnologia e Inovacao, 2024)

Perú, Bolivia y Colombia siguen en contribución, reflejándolo en sus tasas de deforestación recientes (RAISG (Red Amazónica de Información Ambiental Georeferenciada), 2022). En Perú destaca además una contribución no trivial de turberas (~55 Mt CO₂, 2% del total nacional quinquenal) debido a la posible degradación por minería y drenaje de humedales.

Países con menor área amazónica o históricamente menor deforestación (Venezuela, Ecuador, Guyana, Surinam, Guayana Francesa) representan cuotas más pequeñas del costo, aunque un aumento de la actividad minera y agrícola ilegal en ellos podría elevar sus emisiones más de lo previsto. En conjunto, la Amazonía enfrenta un potencial de emisión de ~16.600 Mt CO₂ en cinco años, lo que implicaría costos globales de entre 83 y 419 (mil millones de dólares) asociados a esos gases de efecto invernadero.

Es importante recalcar que estas cifras no incluyen otros costos ambientales (pérdida de biodiversidad, servicios hídricos, impactos locales, etc.), sino únicamente el costo climático global de las emisiones de CO₂ adicionales. Tampoco incluyen plenamente las emisiones por degradación forestal no contabilizada como deforestación, las cuales, de considerarse, aumentarían los totales. Por ello, el costo real de la inacción sería aún mayor que el aquí estimado.

6.5 MONETIZACIÓN DEL IMPACTO CLIMÁTICO

6.5.1 Costo Social del Carbono.

Para convertir las emisiones de CO₂ en costos monetarios, se empleó el concepto de *Costo Social del Carbono (CSC)* que según (Nordhaus W. D., 2017) es un concepto central *para comprender e implementar políticas de cambio climático. Este término representa el costo económico causado por una tonelada adicional de emisiones de dióxido de carbono o su equivalente.* (Nordhaus W. D., 2017) basado en cálculos aplicando el modelo DICE *estima que el CSC es de 31 dólares estadounidenses por tonelada de CO₂ de 2010 para el período 2015. Según sus estimados el CSC real crece a un 3 % anual hasta 2050.*

El CSC como estimación del daño económico causado por la emisión de una tonelada métrica de CO₂ a la atmósfera incluye impactos negativos en la agricultura, la salud, daños por eventos extremos, pérdidas por elevación del nivel del mar, merma de productividad, etc., acumulados a lo largo del tiempo y actualizados a valor presente. En otras palabras, representa el costo para la sociedad (a nivel mundial) de no evitar esa emisión. (Evans, Pidcock, & Yeo, 2017).

Diversos estudios han intentado cuantificar el CSC. Existe incertidumbre y los valores dependen de supuestos (p.ej. tasa de descuento, sensibilidad climática, daños catastróficos) (Evans, Pidcock, & Yeo, 2017) (Committee on Assessing Approaches to Updating the Social Cost of Carbon, NASEM, 2017), (Stern & Stiglitz, 2021). No obstante, hay consenso en que el CSC es significativo y probablemente más alto de lo que antes se pensaba.

El Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) ha destacado que las evaluaciones económicas tradicionales subestiman riesgos graves si permiten altas temperaturas (>3°C) (Stern & Stiglitz, 2021). De hecho, modelos previos utilizados por EE.UU. estimaron un costo social de ~50 USD por tonelada de CO₂ para 2030 (en dólares de 2007) (Stern & Stiglitz, 2021). Ese valor fue criticado por expertos por considerarlo demasiado bajo frente a los daños potenciales. Economistas como Nicholas Stern y Joseph

Stiglitz argumentan que incorporar mejor los riesgos extremos y la equidad intergeneracional llevaría a un CSC *correcto* mucho más alto que en el pasado (Stern & Stiglitz, 2021). posiblemente del orden de 100 USD/t CO₂ o más en la próxima década. Para valorizar los impactos al 2030 valores superiores (~ entre 80 o 100 USD/t CO₂) serían justificables como costo real del daño climático por tonelada.

No obstante, **para este cálculo se adoptaron datos más conservadores como 5 USD/t CO₂ para el mínimo y 25 USD/t CO₂ para el máximo.** Para esta aproximación se consideraron las variaciones en estimación del CSC indicadas en el Cuadro 11. Como puede apreciarse los costos más bajos corresponden a los estimados para Chile (2013) y Perú (2017) correspondiente a \$ 5 y \$ 7, respectivamente. Aplicando la tasa de crecimiento estimada por (Nordhaus W. D., 2017) el costo de emisión de una tonelada de carbono equivalente (expresado como CO₂) sería de \$ 21,92 para 2050, cifra que permitió definir el rango mínimo – máximo adoptado para este estudio.

Cuadro 21.*Estimación del Costo Social del Carbono según diversas fuentes*

Nº	Fuente de información	Precio al Carbono (en dólares 2021/ton CO ₂ e)	Año de cálculo	Experiencia previa en cálculo de PSC	Cuenta con Peer Review
1	Benchmark para un PSC Costa Rica 2022	36	2022	No	No
2	IPCC - AR6 WGIII Chapter 13 2022	40	2022	Si	Si
3	OCDE/IEA & IRENA 2017	23	2017	No	Si
4	CDP & CPLC 2018	24	2018	Si	No
5	High-Level Commission on Carbon Prices 2017	40	2017	No	Si
6	Fondo Monetario Internacional 2021	25	2021	Si	No
7	CEPAL 2019	29	2019	No	No
8	Banco Mundial 2017	40	2017	No	No
9	EU-ETS 2021	54	2021	Si	No
10	Perú 2016	7	2016	No	No
11	Reino Unido 2021	351	2021	Si	No
12	Reino Unido 2009	100	2009	Si	Si
13	Reino Unido 2007	51	2007	No	Si
14	Francia 2020	66	2020	Si	No
15	Francia 2008	43	2008	No	No
16	Estados Unidos 2016	54	2016	Si	Si
17	Estados Unidos 2013	45	2013	Si	No
18	Estados Unidos 2010	27	2010	No	No
19	Alemania 2020	238	2020	Si	Si
20	Alemania 2019	238	2019	Si	Si
21	Alemania 2013	124	2013	No	No
22	Noruega 2012	30	2012	No	Si
23	Noruega 2019	59	2019	Si	No
24	Finlandia 2019	94	2019	Si	No
25	Finlandia 2015	51	2015	No	No
26	Dinamarca 2021	29	2021	No	No
27	Canadá 2016	38	2016	No	No
28	Chile 2013	5	2013	No	No
29	Chile 2015	10	2015	Si	No
30	Chile 2017	30	2017	Si	No
31	Australia 2012	49	2012	No	No
32	Australia 2014	40	2014	Si	No
33	Australia 2020	47	2020	Si	No
34	Países Bajos 2010	111	2010	No	No
35	Países Bajos 2016	63	2016	Si	No
36	Japón 2015	30	2015	No	No
37	Suecia 2016	143	2016	No	No
38	Suecia 2020	855	2020	Si	No

Nota: (Pica, Cid, Ferrer, & et al, 2024)

Cabe enfatizar que esto probablemente subestima el costo real – de usarse, por ejemplo, 100 USD/t, todas las cifras de costo se cuadruplicarían. Aun con este valor conservador, los números son aleccionadores: las emisiones por la pérdida de carbono amazónico en 2026-2030 tendrían un costo social climático que oscilaría entre 83 y 419 mil millones de USD (como se muestra en el Cuadro 10). Es decir, más de 0,4 billones de dólares en daños globales futuros ocasionados por cinco años de inacción en la Amazonía. Dicho de otro modo, cada año de inacción (deforestación continua) en la Amazonía podría acarrear ~16 y 83 mil millones de USD en costos globales adicionales.

Estos costos se materializan en diversas formas: mayores gastos en desastres naturales, pérdidas en producción agrícola por cambios de lluvia, afectaciones a la salud por olas de calor, necesidad de inversiones en adaptación costera, etc. Al ser costos difusos y globales, muchas veces no se perciben directamente en los países que emiten (de ahí la *tragedia de los comunes*) (Evans, Pidcock, & Yeo, 2017).

6.5.2 Costos Totales de Inacción.

Los países amazónicos también sufren impactos directos (p.ej. sequías más severas que reducen su PIB agrícola, incendios que afectan la salud y economía local, inundaciones, alteración de lluvias regionales cruciales para la energía hidroeléctrica, etc.). En el Cuadro 20 se consideran los costos adicionales más significativos de modo de asegurar que los costos de inacción estimados representen una cantidad que incluya cualquier aspecto no considerado en la estimación basada en el *Costo Social del Carbón*.

Cuadro 22. Estimación de Costos Totales de Inacción en la Amazonia para el periodo 2026 - 2030

Categoría	Costos Inacción del periodo 2026-2030 en miles de millones de USD				Fuente
	Costo total para el periodo		Costo para cada año del periodo		
	Min	Max	Min.	Max	
Biodiversidad y servicios ecosistémicos	215	490	43	98,00	(Hanusch & Strand, 2023)
Pérdida de carbono almacenado	83	419,8	16,60	83,96	Datos del Cuadro 19

Categoría	Costos Inacción del periodo 2026-2030 en miles de millones de USD				Fuente
	Costo total para el periodo		Costo para cada año del periodo		
	Min	Max	Min.	Max	
Impactos en la agricultura	100		20		(Hanusch ed., 2023)
Costos sanitarios por incendios	5	25	1,00	5,00	(Yao, Shanshan, Rongbin, & et al, 2023)
Daños a la infraestructura	1	6,5	0,20	1,30	(Zurur, 2024) (Galindo, Hoffman, & Vogt-Schilb, 2022)
Costo total anual estimado (2026-2030) en miles de millones de USD:	404	941,3	80,8	188,26	

En el Cuadro 21 se presentan los resultados globales de aplicar los costos unitarios determinados en el análisis a la totalidad de la cuenca del Amazonas, sin discriminación de biomas o regiones en un escenario global *business as usual*.

Las reducciones del daño global debido a la instrumentación de las acciones planteadas en las NDC y los NPA no pudieron ser estimadas debido a la falta de datos de su instrumentación en extensión, naturaleza, permanencia y monto de las inversiones previstas por los países.

El costo total estimado de inacción ante los efectos del cambio climático en la cuenca del Amazonas para el período 2026-2030 asciende a **USD 525-915 mil millones anuales**. Este análisis resalta la importancia de tomar medidas urgentes para mitigar y

adaptarse a los impactos del cambio climático, ya que los costos de inacción son significativos y pueden tener consecuencias irreversibles para la región y el planeta.

Los resultados evidencian que no actuar ante la deforestación y degradación de la Amazonía conlleva costos climáticos astronómicos. Solo en el próximo quinquenio, la inacción podría liberar del orden de 15 a 17 Gt CO₂ de los sumideros amazónicos, lo que implicaría daños valorados en cientos de miles de millones de dólares a lo largo de las próximas décadas por el agravamiento del cambio climático. Brasil, por su extensa área amazónica y altas tasas de deforestación recientes, concentra la mayor parte de estos costos, seguido por Perú, Bolivia y Colombia. No obstante, todos los países amazónicos comparten la responsabilidad y sufrirán consecuencias, ya que el clima no reconoce fronteras.

El análisis con el *Costo Social del Carbono* demuestra económicamente la importancia de la Amazonía en la estabilidad climática global. Cada tonelada de carbono mantenida en los bosques o turberas amazónicas evita un costo significativo a la sociedad. Por el contrario, cada hectárea quemada impone externalidades negativas que no se reflejan en el mercado, pero que pagan todos los habitantes del planeta en forma de un clima menos seguro.

En términos de política, evitar estos costos de inacción sería muchísimo más barato que enfrentarlos después. Se estima que, con inversiones mucho menores en conservación, monitoreo, desarrollo sostenible y cumplimiento de la ley, se podría frenar la deforestación. Por ejemplo, la protección efectiva de territorios indígenas y áreas protegidas –que cubren ~47% de la Amazonía (PROVITA, 2023)– es una estrategia costo-efectiva para mantener los bosques en pie. Adicionalmente, mecanismos financieros como el pago por resultados de carbono (REDD+), la valorización de servicios ecosistémicos y un posible precio explícito al carbono podrían alinear incentivos económicos locales con ese enorme beneficio global de conservar el carbono.

En conclusión, la Amazonía representa un *seguro climático* natural de valor incalculable, cuya pérdida tendría consecuencias económicas y ambientales irreversibles. Utilizando el SCC del IPCC como guía, se cuantifico en dólares el altísimo costo de la inacción. Este ejercicio busca informar a los tomadores de decisión y a la sociedad sobre la urgencia de actuar ahora: invertir en la conservación y manejo sostenible de la Amazonía es no solo una obligación ambiental y moral, sino también la opción económicamente racional para evitar daños climáticos que superarían con creces los costos de proteger el mayor bosque tropical del mundo.

6.6 ESTRATEGIAS PROPUESTAS PARA MEJORAR LAS ESTIMACIONES DE LOS COSTOS DE INACCION PARA LA AMAZONIA

A partir de la consideración de la información disponible y el procedimiento seguido para la estimación de los costos de inacción se presentan un conjunto de estrategias en relación con aspectos que se consideran claves para el proceso.

6.6.1 Incertidumbre en las estimaciones.

- *Descripción:* Muchas de las estimaciones de costos están sujetas a incertidumbre debido a la complejidad del cambio climático, la variabilidad de los datos y las proyecciones futuras. Por ejemplo, los costos de escenarios catastróficos o los impactos en la salud mental son difíciles de cuantificar con precisión.
- *Impacto:* La incertidumbre puede sesgar los resultados, ya sea sobreestimando o subestimando los costos totales. Esto podría llevar a decisiones políticas o de inversión inadecuadas.
- Estrategias para mejorar la estimación:
 - Estrategia 1: Utilizar intervalos de confianza en las estimaciones para reflejar la incertidumbre. Por ejemplo, en lugar de un valor fijo, proporcionar un rango de costos (por ejemplo, USD 100-200 millones para escenarios catastróficos).
 - Estrategia 2: Realizar análisis de sensibilidad para evaluar cómo los cambios en las variables clave (como la tasa de deforestación o los precios del carbono) afectan los costos totales.

6.6.2 Falta de datos específicos regionales.

- *Descripción:* Algunas variables, como los impactos en la pesca y la biodiversidad acuática, carecen de datos específicos para la cuenca del Amazonas. Los estudios regionales utilizados son generales y podrían no considerar las dinámicas locales.
- *Impacto:* Los costos estimados podrían no reflejar con precisión las condiciones específicas de la región, lo que podría afectar la relevancia del análisis.
- Estrategias para mejorar la estimación:
 - Estrategia 1: Realizar estudios locales o regionales específicos para la cuenca del Amazonas. Esto podría incluir encuestas a comunidades indígenas, análisis de datos hidrológicos y evaluaciones de biodiversidad.
 - Estrategia 2: Colaborar con organizaciones locales y expertos regionales para obtener datos más precisos y actualizados.

6.6.3 Subestimación de los costos intangibles.

- *Descripción:* Algunos costos, como la pérdida de patrimonio cultural o el valor del conocimiento indígena, son difíciles de cuantificar en términos económicos. Estos costos intangibles no están completamente reflejados en el análisis.
- *Impacto:* La subestimación de los costos intangibles puede hacer que el análisis parezca menos grave de lo que realmente es, lo que podría disminuir la prioridad política.
- Estrategias para mejorar la estimación:
 - Estrategia 1: Utilizar estudios de preferencias declaradas⁶³ para estimar el valor económico de los bienes intangibles.
 - Estrategia 2: Incluir una sección dedicada a los costos intangibles en el informe, destacando su importancia social y cultural, aunque no se puedan cuantificar con precisión.

6.6.4 Falta de análisis de superposición de costos.

- *Descripción:* Algunos costos podrían estar duplicados entre categorías. Por ejemplo, las medidas de adaptación podrían estar parcialmente incluidas en otras categorías como infraestructura o agricultura.
- *Impacto:* La superposición de costos podría llevar a una sobreestimación del costo total, lo que podría afectar la credibilidad del análisis.
- Estrategias para mejorar la estimación:
 - Estrategia 1: Realizar un análisis de superposición detallado para identificar y ajustar los costos que se solapan entre categorías.
 - Estrategia 2: Utilizar un enfoque de contabilidad por separado para cada categoría, asegurándose de que los costos no se cuenten más de una vez.

⁶³ Estudios destinados a conocer que prefiere la gente sobre algo que aún no existe o sobre diferentes opciones que podrían implementarse. En lugar de observar lo que la gente hace (que sería un estudio de *preferencias reveladas*), se le pregunta directamente qué prefieren. Es una técnica de investigación que busca comprender y cuantificar las valoraciones y elecciones de los individuos frente a diferentes escenarios hipotéticos, productos, servicios o políticas. La clave es la palabra *declaradas*. Los datos no se obtienen de comportamientos reales observados en el mercado, sino de las respuestas que los individuos dan a preguntas específicas sobre sus preferencias.

6.6.5 Falta de enfoque en las externalidades positivas.

- *Descripción:* El análisis se centra en los costos de inacción, pero no considera las externalidades positivas de la acción, como los beneficios económicos de la conservación de la Amazonía.
- *Impacto:* El enfoque exclusivo en los costos puede sesgar la percepción de los beneficios de la acción, lo que podría desincentivar las políticas de conservación.
- Estrategias para mejorar la estimación:
 - Estrategia 1: Incluir una sección en el informe que evalúe los beneficios económicos de la acción, como la reducción de emisiones de carbono o el aumento del turismo sostenible.
 - Estrategia 2: Realizar un análisis costo-beneficio completo que compare los costos de inacción con los beneficios de la acción.

6.6.6 Falta de consideración de los efectos a largo plazo.

- *Descripción:* El análisis se centra en el período 2026-2030, pero no considera los efectos a largo plazo del cambio climático en la Amazonía, como los posibles escenarios de colapso del ecosistema.
- *Impacto:* La falta de análisis a largo plazo puede subestimar los costos totales y no reflejar la gravedad de los riesgos futuros.
- Estrategias para mejorar la estimación:
 - Estrategia 1: Extender el análisis a un horizonte temporal más largo (por ejemplo, 2100) utilizando modelos de proyección climática y económica.
 - Estrategia 2: Incluir un análisis de escenarios de colapso del ecosistema amazónico y sus costos económicos a largo plazo.

Las estrategias propuestas mejorarán la robustez del análisis y proporcionarán una base más sólida para la toma de decisiones.

7 REFLEXIONES Y ANÁLISIS FINAL

El análisis final de la información obtenida en este estudio tiene como objetivo aportar consideraciones asociadas con la temática de pérdidas y daños que está en desarrollo dentro de las discusiones de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) y que se ha centrado en abordar las consecuencias negativas del cambio climático en los países más vulnerables.

En la COP27, se acordó la creación de un fondo específico para ayudar a los países en desarrollo a enfrentar las pérdidas y daños económicos y no económicos asociados al cambio climático. Se espera que este estudio contribuya al dimensionamiento y criterios para esta agenda contribuyendo rigurosidad metodológica y científica. Los aportes que se consideran notorios son:

7.1 OPORTUNIDADES PARA FORTALECER LA VOLUNTAD POLÍTICA Y LA APROPIACIÓN SOCIAL DE LOS HALLAZGOS DEL ESTUDIO

El estudio ha evidenciado que la inacción frente al cambio climático en la cuenca amazónica genera costos anuales que oscilan entre a los US\$ 404 - 941 mil millones, afectando desde la productividad local hasta la estabilidad climática global. Esta magnitud de impactos económicos representa una oportunidad para movilizar la voluntad política a través de una narrativa económica convincente: *invertir hoy en resiliencia y mitigación es menos costoso que afrontar las consecuencias futuras*. Asimismo, el involucramiento de la sociedad civil y los actores territoriales puede fortalecerse mediante campañas de comunicación basadas en evidencia, que conecten las pérdidas locales (agua, salud, energía, cultura) con los beneficios de conservar y restaurar el ecosistema amazónico. Entre otras acciones se recomiendan:

7.1.1 Participación inclusiva.

Los hallazgos destacan la necesidad de vincular a comunidades indígenas, líderes locales y jóvenes en la toma de decisiones para generar legitimidad y compromiso. Ejemplo: mecanismos de consulta vinculante en políticas forestales.

7.1.2 Campañas de sensibilización.

Usar datos sobre pérdidas económicas por deforestación (ej. USD 3-5 mil millones anuales en servicios ecosistémicos) para movilizar apoyo público y político.

7.1.3 Alianzas multisectoriales.

Cooperación entre gobiernos, ONGs y empresas para financiar proyectos con impacto visible (ej. pagos por servicios ambientales).

7.2 OPORTUNIDADES PARA FORTALECER METAS CLIMÁTICAS (NACIONALES/REGIONALES), POLÍTICAS Y MEDIDAS SECTORIALES

Los hallazgos respaldan la necesidad de fortalecer los objetivos de mitigación y adaptación en las Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDCs), especialmente en sectores como bosques, agricultura, energía, transporte y seguridad hídrica. La evidencia de pérdidas en generación hidroeléctrica, productividad agrícola y transporte fluvial sugiere que deben priorizarse políticas de restauración ecológica, agroforestería resiliente, eficiencia hídrica, y electrificación rural sostenible.

También se recomienda incorporar instrumentos económicos (como bonos climáticos o seguros paramétricos⁶⁴) para incentivar las medidas sectoriales. Adicionalmente se pueden considerar:

7.2.1 Sector forestal.

Ampliar metas de deforestación neta cero al 2030 con incentivos a cadenas libres de deforestación (ej. certificación de productos agrícolas).

- Agricultura: Transición a agroforestería regenerativa y sistemas silvopastoriles, apoyada por subsidios condicionados.
- Energía: Acelerar inversión en hidrógeno verde y solar en zonas aisladas, reduciendo dependencia de combustibles fósiles.
- Agua: Integrar seguridad hídrica en planes nacionales con infraestructura natural (restauración de humedales) y tecnología de riego eficiente

7.2.2 Alineación con marcos existentes y nuevas oportunidades de cooperación regional.

⁶⁴ Un seguro paramétrico en lugar de pagar por las pérdidas reales sufridas paga una cantidad preestablecida si se cumple un parámetro o un evento específico, previamente acordado en la póliza. ¿Cómo funciona esto en la práctica? (i) Se define un parámetro o índice: Este puede ser la intensidad de un terremoto (magnitud), la cantidad de lluvia acumulada en un periodo, la velocidad del viento, el nivel de un río o similar. (ii) Se establece un umbral de activación: Se acuerda un valor específico para ese parámetro que, al ser alcanzado o superado, activa el pago del seguro. Por ejemplo, si la lluvia acumulada en 24 horas supera los 100 mm. (iii) Se fija una suma asegurada: Se determina una cantidad de dinero que se pagará si el umbral del parámetro se cumple. Esta cantidad es acordada previamente y no depende de las pérdidas reales del asegurado. (iv) Se utiliza una fuente de datos independiente para verificar si el parámetro se ha cumplido. El pago se realiza rápidamente: Una vez que la fuente de datos confirma que el umbral se ha superado, el pago se efectúa de manera ágil, sin necesidad de un proceso de ajuste de pérdidas.

Existen avances valiosos como el Organización del Tratado de Cooperación Amazónica (OTCA), la Iniciativa de la Amazonía por parte de los ocho países de la cuenca, y la Plataforma Científica Panamazónica, que pueden articularse con instrumentos de cooperación técnica como EUROCLIMA+ o similares. La evidencia de costos comunes (por ejemplo, por alteración de lluvias transfronterizas) refuerza la necesidad de mecanismos de gobernanza compartida que integren ciencia, financiamiento y diplomacia climática.

- Sinergias con el Pacto de Leticia⁶⁵: Armonizar metas de conservación y adaptación entre países amazónicos, usando plataformas como OTCA.
- Casos exitosos: Replicar modelos como el programa Bosques Sostenibles de Perú (combinación de drones y conocimiento ancestral para monitoreo).
- Nuevos mecanismos: Crear un fondo regional para resiliencia climática financiado por impuestos a sectores extractivos y cooperación internacional.

7.2.3 Escenario tendencial (business as usual).

Si se mantiene la inacción bajo el escenario *business as usual* los costos anuales por pérdida de servicios ecosistémicos, productividad, salud, seguridad y patrimonio podrían oscilar entre los US\$ 404 - 914 mil millones por año en la región incluyendo costos indirectos a nivel global. El Producto Interno Bruto (PIB) combinado de los países que integran la cuenca (Brasil, Perú, Colombia, Bolivia, Venezuela, Ecuador, Guyana, Surinam) podría estimarse en 2848 mil millones de USD. Por lo tanto, el costo potencial de la inacción –es decir, si no se implementan acciones de adaptación– podría oscilar entre el 14% y 33% del PIB anual de los países de la cuenca.

⁶⁵ El Pacto de Leticia es un acuerdo internacional no vinculante firmado en 2019 por siete países amazónicos (Bolivia, Brasil, Colombia, Ecuador, Guyana, Perú y Surinam) para fortalecer la cooperación en la protección de la Amazonía. El pacto busca abordar la deforestación, los delitos ambientales y la conservación de la biodiversidad en la región.

Aspectos Clave:

- Monitoreo conjunto de la deforestación y degradación de los ecosistemas.
- Estrategias para combatir la deforestación y los delitos ambientales.
- Conservación y uso sostenible de los recursos naturales.
- Mecanismos de cooperación y intercambio de experiencias.

Sinergias:

El pacto reconoce la importancia de las sinergias con otros convenios y tratados internacionales y regionales, como el Convenio de Diversidad Biológica y el Convenio Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.

Este escenario representa no solo una amenaza para el desarrollo sostenible, sino también una señal para redirigir inversiones hacia soluciones basadas en la naturaleza, infraestructura resiliente, salud pública adaptada al clima, energías renovables y cadenas de valor climáticamente inteligentes. Entre las inversiones prioritarias se identifican:

- Bioeconomía: Desarrollo de cadenas de valor no maderables (ej. açai, cáñamo) con potencial de generar 2 millones de empleos.
- Infraestructura resiliente: Carreteras verdes y sistemas de alerta temprana ante inundaciones (ROI⁶⁶ estimado: 1:4).
- Seguros climáticos: Modelos público-privados para pequeños agricultores.

7.2.4 Oportunidades para apoyo técnico integrado y cooperación en temas comunes.

Las amenazas compartidas por los países amazónicos abren la posibilidad de desarrollar centros regionales de excelencia en observación climática, programas comunes de monitoreo de biodiversidad, sistemas de alerta temprana y redes de capacitación para el manejo adaptativo de recursos. Asimismo, se identifican sinergias para cooperación técnica Sur-Sur, por ejemplo, en restauración de suelos degradados, agroecología en sabanas amazónicas, y gestión integrada de cuencas transfronterizas. Adicionalmente se pueden considerar:

- Plataforma de datos unificada: Sistema regional de monitoreo de carbono y biodiversidad, con apoyo de IA y satélites (ej. colaboración con *Amazon Sustainability Data Initiative*).
- Asistencia transfronteriza: Brigadas técnicas conjuntas para combatir incendios y minería ilegal (ej. Brasil-Colombia).

⁶⁶ ROI aplicado al consumo energético permite evaluar la rentabilidad de las inversiones que realizas para reducir tu gasto de energía. En este contexto, la inversión sería el costo de implementar medidas de eficiencia energética o de adquirir tecnologías más eficientes, y el retorno serán los ahorros que obtengas en las facturas de consumo de energía a lo largo del tiempo.

- Costo de la Inversión: Es el gasto inicial para implementar la medida de eficiencia energética. Esto podría incluir la compra e instalación de nuevos equipos (como bombillas LED, electrodomésticos eficientes, paneles solares), mejoras en el aislamiento, sistemas de gestión energética, etc.
- Ahorro Total de Energía: Es la cantidad de energía que se espera ahorrar gracias a la inversión, generalmente medida en kWh (kilovatios-hora) durante un período específico (por ejemplo, un año o la vida útil del equipo).
- Costo de la Energía por Unidad: Es el precio que pagas por cada unidad de energía (por ejemplo, el costo por kWh de electricidad).
- Ahorro Total de Energía × Costo de la Energía por Unidad: Esto te da el ahorro económico total que generará la inversión durante el período considerado.

- Diálogo sectorial: Mesas de trabajo entre ministerios de ambiente y economía para integrar criterios climáticos en presupuestos.

7.2.5 Amenazas y oportunidades relacionadas con derechos humanos y grupos vulnerables.

Las comunidades vulnerables en la Amazonía como las más expuestas a los efectos del cambio climático deben inventariadas, bajo un registro estándar y llevado a un sistema de información geográfica. Invertir en salvaguardas de derechos, titulación de territorios ancestrales, educación climática y participación efectiva permite fortalecer la gobernanza local y reducir vulnerabilidades. Los resultados de la revisión de información realizada resaltan ejemplos positivos de iniciativas lideradas por mujeres y jóvenes en agricultura sostenible, monitoreo comunitario de lluvias, y turismo ecológico. Se proponen entre otras:

- Pueblos indígenas: Formalizar títulos de tierra (30% del Amazonas está en disputa) y garantizar su participación en REDD+.
- Mujeres y jóvenes: Programas de crédito verde con enfoque de género y educación climática en lenguas locales.
- Protección social: Incluir criterios de vulnerabilidad en fondos de adaptación (ej. subsidios a comunidades ribereñas ante sequías).

7.2.6 Necesidades de conocimiento y oportunidades para cooperación entre países.

El estudio confirma brechas importantes en el conocimiento local sobre riesgos climáticos, particularmente en zonas rurales e indígenas. Existe la oportunidad de promover currículos educativos adaptados, plataformas compartidas de datos climáticos, becas binacionales y redes de investigación aplicadas a soluciones locales (ej. bancos de semillas resistentes al calor, bioeconomía amazónica). El intercambio de experiencias sobre estrategias de resiliencia entre subcuencas andinas y amazónicas puede generar innovaciones sociales replicables. Se pueden considerar entre otras propuestas:

- Redes académicas: Consorcio de universidades amazónicas para investigación aplicada en restauración y tecnologías limpias.
- Intercambio de experiencias: Plataforma de buenas prácticas en manejo forestal (ej. lecciones de Bolivia en manejo de incendios).
- Capacitación local: Escuelas técnicas en bioeconomía para jóvenes, con pasantías internacionales.

7.2.7 Oportunidades identificadas para la revisión 2024–2025 de las NDCs y negociaciones COP30.

Los hallazgos de este estudio pueden informar la revisión de las NDCs 2024–2025, integrando estimaciones de costos de inacción como base para mayor ambición climática. Además, COP30 (a celebrarse en Brasil) representa una oportunidad histórica para que los países amazónicos presenten una agenda coordinada que articule:

- a) Financiamiento para la conservación de la selva como sumidero global,
- b) Mecanismos de pérdidas y daños aplicables a la Amazonía, y
- c) Cooperación regional sobre derechos climáticos.

Las cifras aquí estimadas pueden servir como evidencia cuantitativa para acceder a fondos climáticos multilaterales y para impulsar una narrativa positiva de la Amazonía como motor de soluciones globales. Podrían considerarse entre otras acciones:

- NDCs 2024-2025:
 - Incorporar metas cuantificables en restauración de 12 millones de hectáreas y reducción del 50% de emisiones por agricultura.
 - Incluir indicadores de justicia climática (ej. % de fondos asignados a grupos vulnerables).
- COP30 (Belém 2025):
 - Posicionar la Amazonía como eje central de la agenda, promoviendo un "Acuerdo de Belém" para movilizar USD 100 mil millones hasta 2030.
 - Abogar por mecanismos de canje de deuda por acción climática (*debt-for-nature swaps*) en países de la cuenca.

7.3 ACCIONES PARA EVITAR PUNTOS DE NO RETORNO EN EL AMAZONAS.

7.3.1 De carácter permanente.

- Voluntad política reforzada por datos económicos contundentes,

- Integración de conocimiento académico y saberes locales
- Cooperación regional con enfoque de justicia climática.

La próxima revisión de NDCs y la COP30 son hitos críticos para escalar soluciones probadas y evitar costos catastróficos de la inacción.

7.3.2 De carácter urgente.

- El documento subraya la urgencia de actuar frente al cambio climático en la cuenca del Amazonas. La inacción no solo tendría consecuencias devastadoras para la región, sino que también podría desestabilizar el clima global.
- Asumir la complejidad de los desafíos: Los impactos del cambio climático en la Amazonía son multifacéticos y están interconectados. Abordar estos desafíos requiere un enfoque integral que combine la conservación de la biodiversidad, la gestión sostenible de los recursos hídricos y la inclusión de las comunidades locales en la toma de decisiones.
- Mantener la investigación continua: El documento destaca la necesidad de más investigación para comprender mejor los impactos del cambio climático y desarrollar estrategias efectivas de adaptación y mitigación. La revisión sistemática de literatura es un paso importante en esta dirección, pero se necesitan más estudios para llenar los vacíos de información y mejorar las proyecciones climáticas.

LISTA DE CUADROS Y FIGURAS

Cuadro	Título	
Cuadro 1.	Comparación entre transporte fluvial y aéreo	81
Cuadro 2.	Problemas asociados con la deforestación del Amazonas y sus impactos en enfermedades infecciosas	84
Cuadro 3.	Resumen de impactos del cambio climático en los Páramos de la cuenca del Amazonas	87
Cuadro 4.	Resumen afectación hídrica en los páramos de la cuenca del Amazonas	88
Cuadro 5.	Impactos en el clima amazónico según modelos de simulación	115
Cuadro 6.	Medidas de adaptación enunciadas para la Amazonia boliviana en la Comunicación Nacionalmente Acordada (NDC 2022) y en el PND 2021-2025	118
Cuadro 7.	Medidas de adaptación enunciadas para la Amazonia brasilera en la Comunicación Nacionalmente Acordada (NDC 2023), el PPCDAm (2023-2027), en el Plan para el Control de la Deforestación Ilegal y la Recuperación de Vegetación Nativa (2019) y en el Plan Nacional de Adaptación 2023 (*)	121
Cuadro 8.	Medidas de adaptación enunciadas para la Amazonia colombiana en la Comunicación Nacionalmente Acordada (NDC 2021) y Plan Nacional de Adaptación (2018)	123
Cuadro 9.	Medidas de adaptación enunciadas para la Amazonia ecuatoriana, en la Comunicación Nacionalmente Acordada (NDC 2021)	124
Cuadro 10.	Medidas de adaptación enunciadas para la Amazonia ecuatoriana, en el Plan de Adaptación (2023-2027)	125

Cuadro 11. Medidas de adaptación relacionadas con la Amazonia guyanesa, enunciadas en la Comunicación Nacionalmente Acordada (NDC 2016), en la Política Nacional de cambio Climático y Plan de Acción (2020-2030, y en el Plan Nacional de Adaptación (2024).	127
Cuadro 12. Medidas de adaptación relacionadas con la Amazonia peruana, enunciadas en la Comunicación Nacionalmente Acordada (NDC 2021) y en el Plan Nacional de Adaptación (2021)	130
Cuadro 13. Medidas de adaptación relacionadas con la Amazonia se Suriname, enunciadas en la Comunicación Nacionalmente Acordada (NDC 2020) y en el Plan Nacional de Adaptación (2019)	132
Cuadro 14. Medidas de adaptación relacionadas con la Amazonia venezolana, enunciadas en la Comunicación Nacionalmente Acordada (NDC 2021).	134
Cuadro 15. Variables analizadas y fuentes de información para el análisis del costo económico de la inacción a mediados de siglo y fin de siglo XXI	143
Cuadro 16. Resumen de debilidades identificadas por actor y estrategia para superarla	150
Cuadro 17. <i>Valores de la Amazonía brasileña, con evaluación mínima de los valores de protección. Cifras en miles de millones de dólares anuales</i>	155
Cuadro 18. <i>Estudios sobre el impacto del cambio climático en la agricultura de América Latina</i>	157
Cuadro 19. Costo de la inacción por país como función de la cantidad de CO ₂ durante el periodo 2026 -2030	162
Cuadro 20. Bosque existente para el 2000 y deforestación en el periodo 2001-2020 en la región Amazónica y los países que la conforman	163
Cuadro 21. Estimación del Costo Social del Carbono según diversas fuentes	166
Cuadro 22. Estimación de Costos Totales de Inacción en la Amazonia para el periodo 2026 - 2030	167

Figura

Título

Figura 1. Región Amazónica. Se observa la red hidrográfica principal de la cuenca	9
Figura 2. Paramos de la cordillera de Los Andes	10
Figura 3. Localización de la ocurrencia de eventos de inflexión local	13
Figura 4. Riesgo de inflexión y elementos de inflexión en interacción	14
Figura 5. Mapa mundial con conexiones mostradas para cinco elementos de inflexión	15
Figura 6. Factores particulares de estrés climático en la Amazonía	16
Figura 7. Sequias sin precedentes en el bosque lluvioso (tropical) amazónico.	26
Figura 8. Distribución espacial de tierras degradadas/no degradadas localizadas en el noreste de la cuenca del Amazonas	29
Figura 9. Desacoplamiento de humedad	31
Figura 10. Porcentaje de área quemada en áreas de conservación (tierras indígenas (IL) y unidades de conservación (CU) y otras áreas en cada país de la cuenca del Amazonas	33
Figura 11. Representación general de la cuenca del Amazonas durante el período 2001-2019, incluyendo (a) la productividad primaria bruta promedio del período de estudio (PIB, kg C m ²); (b) la suma de cada año índice de precipitación estandarizado (SPI); y (c) la suma de las áreas quemadas (trimestres, T1-T4)	34
Figura 12. Igapó	35
Figura 13. Mortalidad de peces debido a la falta de oxígeno durante la estación	39
Figura 14. Carbono forestal en todo el bioma amazónico	48
Figura 15. El bioma amazónico como un sumidero de carbono durante el periodo 2013-2022	50
Figura 16. Áreas de mayor ganancia y pérdida de carbono en la cuenca del Amazonas, durante el período 2013-2022	50

Figura 17. <i>Cuenca y Subcuencas del río Amazonas</i>	54
Figura 18. Resumen de los cambios climáticos observados y proyectados en la Amazonía.	55
Figura 19. Cuenca del río Tapajós	68
Figura 20. Contribución de los afluentes y movilización de los sedimentos transportados por el río Amazonas	70
Figura 21. <i>Amazonía Legal</i>	78
Figura 22. Cuenca del río Tapajós	80
Figura 23. Esquema de Flujos del Modelo DICE	136
Figura 24. Flujo de carbono en las diferentes regiones amazónicas	161
Figura 25. Deforestación en Amazonía brasileña. Periodos junio – agosto 2016 - 2024	164

BIBLIOGRAFÍA

(s.f.).

- Brasil. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. (2023). *Plano de Ação para a Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal (PPCDAm) : 5ª fase (2023 a 2027)*. Brasília: Subcomissão Executiva do PPCDAm. Obtenido de https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/combate-ao-desmatamento-queimadas-e-ordenamento-ambiental-territorial/controlado-desmatamento-1/amazonia-ppcdam-1/ppcdam_5_en.pdf
- Ometto, J. P., Aguiar,, A. P., & Martinelli, L. (2011). Amazon deforestation in Brazil: effects, drivers and challenges. . *Carbon Management*, 2(5), 575-585. doi: <https://doi.org/10.4155/cmt.11.48>
- The World Bank Group. (2023). *Country Climate and Development Report: Brazil*. Washington (D.C.): The World Bank Group. Obtenido de <https://openknowledge.worldbank.org/entities/publication/a713713d-0b47-4eb3-a162-be9a383c341b>
- Von Randow, R. C., Rodriguez, D., Tomasella, J., & et al. (2018). Response of the river discharge in the Tocantins River Basin, Brazil, to environmental changes and the associated effects on the energy potential. *Regional Environmental Change*, 19, 193-204. doi: <https://doi.org/10.1007/s10113-018-1396-5>.
- Abe , C., Lobo , F., Dibike , Y., & et al. (2018). Modelling the effects of historical and future land cover changes on the hydrology of an Amazonian basin. *Water*, 10. doi:<https://doi.org/10.3390/W10070932>
- Abe, C., Lobo, F., Novo, E., & et al. (2019). Modeling the effects of land cover change on sediment concentrations in a gold-mined Amazonian basin. *Regional Environmental Change*, 1-13. doi:<https://doi.org/10.1007/s10113-019-01513-8>.
- Alatorre, J. E., Caballero, K., Ferrer, J., & et al. (2019). *El costo social del carbono: una visión agregado desde América Latina*. Santiago de Chile: CEPAL. Obtenido de <https://www.cepal.org/es/publicaciones/44423-costo-social-carbono-vision-agregada-america-latina>
- Albert, J. C., Carnaval, A. C., Flantua, S. G., & et al. (2023). Human impacts outpace natural processes in the Amazon. *Science*, 379(6630). doi:<https://doi.org/10.1126/science.abo5003>

- Amazon Conservation . (30 de octubre de 2024). *Nuevo informe de MAAP cubre casos clave de pérdida y ganancia de carbono en la Amazonía*. Obtenido de Amazon Conservation :
<https://www.amazonconservation.org/new-maap-report-covers-key-cases-of-carbon-loss-gain-in-the-amazon/>
- Amazon Conservation. Monitoring the Andes Amazon Program . (9 de agosto de 2024). *Una mirada sin precedentes al carbono en la Amazonía (Parte 1)*. Obtenido de MAAP#215:
<https://www.maaprogram.org/es/maap-215-una-mirada-sin-precedentes-al-carbono-en-la-amazonia-parte-1/#:~:text=Principales%20Resultados-,Carbono%20en%20la%20Amazon%C3%ADa,en%20todo%20el%20bioma%20amaz%C3%B3nico.>
- Amazon Conservation. Monitoring the Andes Amazon Program. (28 de octubre de 2024). *Carbono en la Amazonía (parte 3): Casos clave de pérdida y ganancia de carbono*. Obtenido de MAAP # 220:
<https://maaproject.kinsta.cloud/?html2pdf=https://www.maaprogram.org/es/amazonia-perdida-ganancia-carbono/&media=print>
- Amorrotu, F. J. (2011). *Pendientes del Amazonas*. Obtenido de <http://www.alestuariodelplata.com.ar/pendientes2.html>
- Andrade , C., Montenegro , S., Montenegro, A., & et al. (2020). Climate change impact assessment on water resources under RCP scenarios: A case study in Mundaú River Basin, Northeastern Brazil. *International Journal of Climatology*, 41, E1045-E1061.
- Anisimov, A., & Vallejo, L. (2023). Defining climate vulnerability in the context of Loss & Damage: a scientific, legal and political question. *Study N° 02/23, IDSRI*, 14. Obtenido de www.iddri.org
- Arias, M., Farinosi, F., Lee, E., & et al. (2020). Impacts of climate change and deforestation on hydropower planning in the Brazilian Amazon. *Nature Sustainability*, 3, 430-436. doi: <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0492-y>.
- Armenteras, D. (2024). Fuego y agua: cambio global, resiliencia de los bosques y riesgo del punto de no retorno para la Amazonía. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 48(187), 438 - 444. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.2645>
- Armijos, E., Crave, A., Vauchel, P., & et al. (2013). Suspended sediment dynamics in the Amazon River of Peru. *Journal of South American Earth Sciences*, 44, 75-84. doi:<https://doi.org/10.1016/J.JSAMES.2012.09.002>

- Armijos, E., Figueroa, M., Espinoza, J., & et al. (11 de agosto de 2021). *Crecidas repentinas "repiquetes" que afectan los cultivos ribereños en la Amazonia peruana. Origen y características*. Obtenido de Ambiente Amdino - Amazónico frente al Cambio Climático:
<https://andes-amazonia.ird.fr/hidrologia/crecidas-repentinas-repiquetes-que-afectan-los-cultivos-riberenos-en-la-amazonia-peruana-origen-y-caracteristicas/>
- Arotoma-Rojas, I., Berrang-Ford, L., Zavaleta-Cortijo, C., & et al. (2022). Indigenous Peoples' Perceptions of Their Food System in the Context of Climate Change: A Case Study of Shawi Men in the Peruvian Amazon. *Sustainability*, 14(16502). doi:<https://doi.org/10.3390/su142416502>.
- Arvor, D., Funatsu, B., Michot, V., & et al. (2017). Monitoring Rainfall Patterns in the Southern Amazon with PERSIANN-CDR Data: Long-Term Characteristics and Trends. *Remote. Sens.*, 9(889). doi:
<https://doi.org/10.3390/rs9090889>
- Ayala, L., Van Eupen, M., Zhang, G., & et al. (2016). Impact of agricultural expansion on water footprint in the Amazon under climate change scenarios. *The Science of the total environment*, 569-570, 1159-1173.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.06.191>
- Ayala, L., Van Eupen, M., Zhang, G., & et al. (2020). Impact of agricultural expansion on water footprint in the Amazon under climate change scenarios. *The Science of the total environment*, 569-570, 1159-1173.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.06.191>.
- Bagheri, O., Pokhrel, Y., Moore, N., & al, e. (2024). Grounwater dominates terrestrial hydrological processes in the Amazon at the basin and sabbasin scales. *Journal of Hydrology*. doi:10.1016/j.jhydrol.2023.130312
- Baker, J., Garcia-Carreras, L., Gloor, M., & et al . (2021). Evapotranspiration in the Amazon: spatial patterns, seasonality, and recent trends in observations, reanalysis, and climate models. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25, 2279-2300. doi:<https://doi.org/10.5194/HESS-25-2279-2021>.
- Baker, J., Garcia-Carreras, L., Buermann, W., & et al. (2021). Robust Amazon precipitation projections in climate models that capture realistic land–atmosphere interactions. *Environmental Research Letters*, 16.
doi:<https://doi.org/10.1088/1748-9326/abfb2e>.

- Banerjee, O., Cicowiez, M., Macedo, M., & et al. (2022). Can we avert an Amazon tipping point?. the economic and environmental costs. *Environmental Research Letters*, 17(12), 125005. doi:<https://doi.org/10.1088/1748-9326/aca3b8>
- Barichivich, J., Gloor, E., Peylin, P., & et al. (2018). Recent intensification of Amazon flooding extremes driven by strengthened Walker circulation. *Science Advances*, 4(eaat8785). doi:<https://doi.org/10.1126/sciadv.aat8785>
- Barthem, R. B., Goulding, M., Leite, R. G., & et al. (2017). Goliath catfish spawning in the far western Amazon confirmed by the distribution of mature adults, drifting larvae and migrating juveniles. *Sci Rep* (7), 1-13. doi:<https://doi.org/10.1038/srep41784>
- Basso, L. S., Wilson, C., Chipperfield, M. P., & et al. (2023). Atmospheric CO2 inversion reveals the Amazon as a minor carbon source caused by fire emissions, with forest uptake offsetting about half of these emissions. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 23(17), 9685-9723. doi:10.5194/acp-23-9685-2023
- Bauch, S., Birkenbach, A., Pattanayak, S., & et al. (2015). Public health impacts of ecosystem change in the Brazilian Amazon. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(24), 7414-7419. doi:<https://doi.org/10.1073/pnas.1406495111>.
- Baudena, M., Tuinenburg, O. A., Ferdinand, P. A., & et al. (2021). Effects of land use change in the Amazon on precipitation are likely underestimated. *Global Change Biology*, 27(21), 5580-5587. doi:<https://doi.org/10.1111/gcb.15810>
- Bauer, T., De Jong, W., & Ingram, V. (2022). Perception matters: an Indigenous perspective on climate change and its effects on forest-based livelihoods in the Amazon. *Ecology and Society*, 27(1), 17. doi:<https://doi.org/10.5751/es-12837-270117>
- Becerra Romero, A., & Poveda, G. (2006). Variabilidad anual, interanual y escalamiento temporal de los incendios forestales en la Amazonía. *Meteorología Colombiana*, 10, 121 - 131.
- Béliveau, A., Lucotte, M., Davindson, R., & et al. (2017). Reduction of soil erosion and mercury losses in agroforestry systems compared to forests and cultivated fields in the Brazilian Amazon. *Journal of Environmental Management*, 203(1), 522-532. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.07.037>

- Beltrán-Tolosa, L. M., Navarro-Racines, C., Pradhan, P., & et al. (2020). Action needed for staple crops in the Andean-Amazon foothills because of climate change. *Mitig Adapt Strateg Glob Change*, 25, 1103-1127. doi:<https://doi.org/10.1007/s11027-020-09923-4>
- Beltrán-Tolosa, L. M., Navarro-Racines, C., Pradhan, P., & et al. (2020). Action needed for staple crops in the Andean-Amazon foothills because of climate change. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. 25, 1103-1124. doi:<https://doi.org/10.1007/s11027-020-09923-4>
- Bennett, A. C., Rodrigues de Sousa, T., Monteagudo-Mendoza, A., & et al. (2023). Sensitivity of South American tropical forest to an extreme climate anomaly. *Nat. Clim. Chang*, 13, 967-974. doi:10.1038/s41558-023-01176-4
- Berenguer, E., Lennox, G. D., Ferreira, J., & et al. (2021). Tracking the impacts of The Niño drought and fire in human-modified Amazonian forest. *Proceedings of the National Academic Science of the United States of America*, 118(30), e2019377118. doi:10.1073/pnas.2019377118
- Berlinck, C. N., Lima, L. H., Pereira, A. M., & et al. (2021). The Pantanal is on fire and only a sustainable agenda can save the largest wetland in the world. *Brazilian Journal of Biology [Revista Brasileira de Biología]*, 82(e244200). doi:10.1590/1519-6984.244200
- Bilbao, B. A., Millán, A., Matany Luque, M., & et al. (2022). Una visión intercultural del manejo integral del fuego en Venezuela. En *TropicalForestIssues61, Hacia la construcción de paisajes a prueba de incendios* (págs. 43-51). doi:10.55515/GMGD1515
- Bodmer, R. T., P.E. Puertas, M. Antúnez, & et al. (2014). Cambio climático y fauna silvestre en la Amazonía peruana. En: Impacto de la sequía e inundaciones intensas en la Reserva Nacional Pacaya Samiria. *Fundación Latinoamericana para el Trópico Amazónico-Fundamazonia*(DL N° 2014-07109). Obtenido de www.fundamazonia.org
- Bodmer, R., Mayor, P., Antúnez, M., & et al. (2020). Wild Meat Species, Climate Change, and Indigenous Amazonians. *Journal of Ethnobiology*, 40, 218-233. doi:<https://doi.org/10.2993/0278-0771-40.2.218>
- Bofill, P. (2022). *Aumento de la ambición en la adaptación al cambio climático en América Latina. Necesidad de métricas comunes*. Documentos de Proyectos (LC/TS.2022/7), Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), Santiago. Obtenido de <https://repositorio.cepal.org/server/api/bitstreams/b73f8d1b-b3e2-4b01-b030-86a208a5977d/content>

- Borini Alves, D. (2018). *Series multitemporales landsat/modis en el análisis de áreas quemadas en ambientes de sabana tropical de la amazonia meridional brasileña*. Zaragoza (España) : Universidad de Zaragoza.
- Borma, L., & et al. (2013). Response of the Amazon tropical forests to deforestation, climate, and extremes, and the occurrence of drought and fire. Vulnerability of Food Resources to Climate. (P. R, Ed.) *Climate Vulnerability*, 2, 153-163.
- Boston Consulting Group. (9 de septiembre de 2024). The Cost of Climate Inaction Can Spur Collective Action. Obtenido de <https://www.bcg.com/capabilities/social-impact/collective-call-to-action/expert-insights/cost-of-climate-inaction-can-spur-collective-action>
- Boulton, C. A., Lenton, T. M., & Boers, N. (2022). Pronounced loss of Amazon rainforest resilience since the early 2000s. *Nat. Clim. Chang.*, 12, 271 - 278. doi:<https://doi.org/10.1038/s41558-022-01287-8>
- Brandão, D., Barata, L., & Nobre, C. (2022). The Effects of Environmental Changes on Plant Species and Forest Dependent Communities in the Amazon Region. *Forest*, 13(466). doi:<https://doi.org/10.3390/f13030466>
- Brasil. Ministerio de Meio Ambiente e Mudanca do Clima; Ministerio da Ciência, Tecnologia e Inovacao. (28 de junho de 2024). Dinâmica atual do desmatamento no Brasil. Brasília, D.F. Obtenido de <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/noticias/inpe-aponta-queda-do-desmatamento-na-amazonia-e-no-cerrado-no-semester/ApresentacaoInpe3dejulho.pdf>
- Brazil. Ministry of Enviroment. (2016 a). *National Adaptation Plan to Climate Change. Volume 1: General Strategy*. Brasilia: Ministry of Environment. Obtenido de https://unfccc.int/sites/default/files/resource/NAP_Brazil_2016_EN.pdf
- Brazil. Ministry of Enviroment. (2016 b). *National Adaptation Plan to Climate Change : volume 2 : sectoral and thematic strategies / Ministry of Environment*. Brasília: Ministry of Environment. Obtenido de https://www4.unfccc.int/sites/NAPC/Documents/Parties/English_PNA_Part2%20v4.pdf
- Brazil. Ministry of Environment and Climate Change. (2024). *BRAZIL'S NDC National determination to contribute and transform*. Brasilia: Ministry of Environment and Climate Change. Obtenido de https://unfccc.int/sites/default/files/2024-11/Brazil_Second%20Nationally%20Determined%20Contribution%20%28NDC%29_November2024.pdf

- Braz-Mota, S., & Val, A. L. (2024). Fish mortality in the Amazonian drought of 2023: the role of experimental biology in our response to climate change. *Journal of Experimental Biology*(227). doi:10.1242/jeb.247255
- Bueno, R., Herzfeld, C., Stanton, E. A., & Ackerman, F. (2008). *El Caribe y el Cambio Climático. Los costos de la inacción*. Medford, Massachusetts, USA: Stockholm Environment Institute; US Center Global Development and Environment Institute, Tufts University. Obtenido de <https://mediamanager.sei.org/documents/Publications/Climate/inaction-caribbean-full-span-lowres.pdf>
- Buytaert, W., Cuesta-Camacho, F., & et al. (2011). Potential impacts of climate change on the hydrological regime of the páramo. *Climatic Change*, 10(3-4), 679-713. doi:<https://doi.org/10.1007/s10584-010-9877-5>
- Buytaert, Wouter & Céleri, Rolando & De Bièvre, & et al. (2006). Human impact on the hydrology of the Andean páramos. *Earth-Science Reviews*, 79, 53-72. doi:<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.06.002>
- Buytaert, W., Sevink, J., & Cuesta, F. (2014). Cambio climático: la nueva amenaza para los páramos. En F. Cuesta, J. Sevink, L. D. Llambí, & et al (eds) , *Avances en investigación para la conservación de los páramos andinos* (págs. 505 - 526). Lima: Editorial Condesan. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/262675438_Cambio_climatico_la_nueva_amenaza_para_los_paramos
- Caesar, L., Sakschewski, L., Andersen, S., & et al . (2024). *Planetary Health Check Report 2024*. Potsdam (Germany): Potsdam Institute for Climate Impact Research. Obtenido de https://www.planetaryhealthcheck.org/storyblok-cdn/f/301438/x/a4efc3f6d5/planetaryhealthcheck2024_report.pdf
- Caldas, B., Thieme, M. L., & et al. (2023). Identifying the current and future status of freshwater. *Conservation Science and Practice*. , 5, e12853.
- Cano, I. M., Shevliakova, E., Malyshev, S., & et al . (2022). Abrupt loss and uncertain recovery from fires of Amazon forests under low climate mitigation scenarios. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119(52), e2203200119. doi:10.1073/pnas.2203200119.
- Cardenas, S. M., Cohen, M. C., Ruiz, D. P., & et al. (2022). Death and Regeneration of an Amazonian Mangrove Forest by Anthropogenic and Natural Forces". *Remote Sensing*, 14(24-6197). doi:<https://doi.org/10.3390/rs14246197>
- Cardoso da Silva, J., Fernandes B., L. C., Topf, J., & et al. (2022). Minimum Cost to Conserve 80% of the Brazilian Amazon. *Perspectives in Ecology and Conservation*, 20, 216-222. doi:<https://doi.org/10.1016/j.pecon.2022.03.007>

- Carvalho Freitas, C. E., Rivas, F., Pereira, A. A., & et al. (2012). The Potential Impacts of Global Climatic Changes and Dams on Amazonian Fish and Their Fisheries. *InTech*. doi:10.5772/54549
- Carvalho, S., Oliveira, A., Pedersen, J. S., & et al. (2020). A changing Amazon rainforest: Historical trends and future projections under post-Paris climate scenarios. *Global and Planetary Change*. doi:https://doi.org/10.1016/J.GLOPLACHA.2020.103328
- Carvalho, S., Oliveira, A., Pedersen, J. S., & et al. (s.f.). A changing Amazon rainforest: Historical trends and future projections under post-Paris climate scenarios. *Global and Planetary Change*. doi:https://doi.org/10.1016/J.GLOPLACHA.2020.103328
- Carvalho, T. C., Wittmann, F., Piedade, M. F., & et al. (2021). Fires in Amazonian BlackwaterFloodplain Forests: Causes, Human Dimension, and Implications for Conservation. *Frontiers in Forests and Global Change*, 4. doi:https://doi.org/10.3389/ffgc.2021.755441
- Castanho, A., Coe, M., Brando, P., & et al. (2020). Potencial shifts in the aboveground biomass and physiognomy of a seasonally dry tropical forest in a changing climate. *Environmental Research Letters*(034053). doi:https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab7394
- Castaño Arboleda, N. (2009). La Amazonía frente al Cambio Climático. *Revista Colombia Amazónica*, 65 - 75.
- Castello, L., & Macedo, M. (2016). Large-scale degradation of Amazonian freshwater ecosystems. *Global Change Biology*, 22. doi:https://doi.org/10.1111/gcb.13173
- Castro, M., Baeza, A., Codeço, C., & et al. (2019). Development, environmental degradation, and disease spread in the Brazilian Amazon. *PLoS Biol* , 17(11: e3000526.). doi:https://doi.org/10.1371/ journal.pbio.3000526
- CEPAL. (2010). La economía del cambio climático en América Latina y el Caribe. División de Desarrollo Sostenible y Asentamientos Humanos/Unidad de Cambio Climático/Asuntos Ambientales. LC/G.2474 113p. Santiago, Chile.
- CEPAL. (13 y 14 de Noviembre de 2016). Agricultura y cambio climático: Economía y modelación. Memoria del cuarto Seminario Regional de Agricultura y Cambio Climático. ISSN 1680-9033 LC/L.3996 81p. Santiago, Chile.
- CEPAL. (2018). La economía del cambio climático en América Latina y El Caribe: Una visión gráfica. LC/TS.2017/84/Rev.1 59.

- CEPAL. (2023). Estudio Económico de América Latina y El Caribe. Capítulo II: Crecimiento y consecuencias fiscales de los choques climáticos en las economías de América LATina y el Caribe. 153-221pp.
- Chagas , V., & Chaffe, P. (2016). Climatic and Physical Controls on the Hydrological Regimes of Southern Brazil : An Analysis of the 1975-2010 Period. Obtenido de <https://consensus.app/papers/climatic-and-physical-controls-on-the-hydrological-chagas-chaffe/a3ac282d733c557fa1ec0879cf302f4b/>
- Chan Chou, S., & Correia Silva, F. W. (2023). *DROUGHT AND FLOOD PREDICTION SYSTEM TO SUPPORT THE MANAGEMENT OF THE MADEIRA RIVER SUSTAINABLE DEVELOPMENT RESERVE*. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais; Universidade do Estado do Amazonas. Obtenido de https://www.researchgate.net/profile/Sin-Chan-Chou/publication/367330225_SISTEMA_DE_PREVISAO_DE_SECAS_E_ENCHENTES_EM_APOIO_A_GESTAO_DA_RESERVA_DE_DESENVOLVIMENTO_SUSTENTAVEL_DO_RIO_MADEIRA/links/652859a52e1ba453041cc848/SISTEMA-DE-PREVISAO-DE-SECAS-E-ENCH
- Chaudhari, S., Pokhrel, Y., Moran, E., & et al. (2019). Multi-decadal hydrologic change and variability in the Amazon River basin: understanding terrestrial water storage variations and drought characteristics. *Hydrology and Earth System Sciences*. doi:<https://doi.org/10.5194/HESS-23-2841-2019>.
- Chaves, J., Neill, C., Germer, S., & et al. (2008). Land management impacts on runoff sources in small Amazon watersheds. *Hydrological Processes*, 22. doi:<https://doi.org/10.1002/hyp.6803>.
- Chirinos, R. G. (2021). *Efectos económicos del cambio climático en el Perú*. Lima: Banco Central de Reserva de Perú. Obtenido de <https://www.bcrp.gob.pe/docs/Publicaciones/Documentos-de-Trabajo/2021/documento-de-trabajo-009-2021.pdf>
- Chisary, O., J.A., M., & S.J., M. (2012). Manual sobre Modelos de equilibrio General Computado para Economías de LAC con Énfasis en el Análisis Económico del Cambio Climático. Notas técnicas # IDB-TN-445 Banco Interamericano de Desarrollo.
- Clarke, J. J., Huntingford, C., Ritchie, P. D., & et al. (2023). Seeking more robust early warning signals for climate tipping points: the ratio of spectra mothod (ROSA). *Environmental Research Letters*, 18(3). doi:[035006https://doi.org/10.1088/1748-9326/abcc8d](https://doi.org/10.1088/1748-9326/abcc8d)

- Cochrane, M., & Barber, C. (2009). Climate change, human land use, and future fires in the Amazon. *Global Change Biology*, 15. Obtenido de <https://consensus.app/papers/climate-change-land-future-fires-amazon-cochrane/e23cd6edb21f53128eb4f13c563d38bc/>
- Cohen, M. C., Souza, A. V., Rossetti, D. F., & et al. (2018). Decadal-scale dynamics of an Amazonian mangrove caused by climate and sea level changes: Inferences from spatial–temporal analysis and digital elevation models,. *Earth Surface Processes and Landforms*, 43 (14): 2876-2888 <https://doi.org/10.1002/esp.4440>, 43(14), 2876-2888. doi:<https://doi.org/10.1002/esp.4440>
- Colombia. Comisión Intersectorial de Cambio Climático. (2020). *Actualización de la Contribución Determinada a Nivel Nacional de Colombia (NDC)*. Bogotá. Obtenido de <https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022-06/NDC%20actualizada%20de%20Colombia.pdf>
- Colombia: DNP, IDEAM, MinAmbiente y UNGRD. (2018). *PNACC. Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático. ABC: Adaptación Bases Conceptuales. Marco Conceptual y Lineamientos del PNACC*. Bogotá. Obtenido de https://unfccc.int/sites/default/files/resource/NAP_Colombia_2018.pdf
- Commar, L. S., Abrahao, G. M., & Costa, M. H. (2023). A possible deforestation-induced synoptic-scale circulation that delays the rainy season onset in Amazonia. *Environmental Research Letters*, 18(044041). doi:<https://doi.org/10.1088/1748-9326/acc95f>
- Committee on Assessing Approaches to Updating the Social Cost of Carbon, NASEM. (2017). *Valuing Climate Damages. Updating of the Social Cost of Carbon Dioxide*. Washington, DC: The National Academic Press. Obtenido de www.nap.edu
- Correa, A., Ochoa-Tocachi, B. F., Birkel, C., & et al. (2020). A concerted research effort to advance the hydrological understanding of tropical páramos. *Hydrological Process*, 34(24), 4609-4627. doi:<https://doi.org/10.1002/hyp.13904>
- Costa, D. C., Blanco, C., & -Jún, D. (2021a). Impact of climate change in the flow regimes of the Upper and Middle Amazon River. *Climatic Change*. 166. doi:<https://doi.org/10.1007/s10584-021-03141-w>.
- Costa, F. R., Marengo, J. A., Albernaz, A. M., & et al. (2024). *Sequías en la Amazonía. Policy Brief*. Science Panel for the Amazon. Obtenido de <https://www.laamazoniaquequeremos.org/wp-content/uploads/2024/09/PB-SEQUIAS-SPA.pdf>

- Costa, F., & Marengo, J. (07 de 12 de 2023). *Declaración sobre la sequía amazonica de 2023 y sus consecuencias inesperadas*. Obtenido de Panel Científico por la Amazonia:
https://www.laamazoniaquequeremos.org/wp-content/uploads/2023/12/231207-AMAZON-DROUGHT-STATEMENT_Espanol.pdf
- Costa, F., & Marengo, J. (2024). *Statement on the 2023 Amazon drought and its unforeseen consequences*. Obtenido de The Amazon we want. Science Panel for the Amazon :
https://www.theamazonwewant.org/wp-content/uploads/2023/12/231207-AMAZON-DROUGHT-STATEMENT_ENGLISH.pdf
- Costa, M. H., Borma, L. S., Espinosa, J. C., & et al. (2021). El Sistema Físico Hidroclimático de la Amazonía . En P. C. Amazonia, *Informe de Evaluación de Amazonía 2021. Tomo I (3 tomos)* (pág. Capítulo 5). New York (USA) : United Nations Sustainable Development Solutions Network.
- Crespo, O. F., Marengo, J. A., & Rodriguez, D. A. (2022). Climate change impacts on agriculture in Latin America and the Caribbean. *Climatic Change*, 169(1-2).
- Da Silva, J. G., Rubiaro, C. F., & Filho, J. (2017). Livestock intensification as a climate policy: Lessons from the Brazilian case. *Land Use Policy*, 62, 232-245. doi:<https://doi.org/10.1016/J.LANDUSEPOL.2016.12.025>
- Da Silva, J., Ruviaro, C., & Filho, J. (2017). Livestock intensification as a clima policy: Lessons from the Brazilian case. *Land Use Policy*, 62, 232-245. doi:<https://doi.org/10.1016/J.LANDUSEPOL.2016.12.025>
- Daichendt, N., Janovec, J. P., Tobler, M. W., & el al. (2025). Surge of peatland destruction by advancing front of artisanal gold mining in Amazonia. *Environ. Res. Lett.*, 20, 044001. doi: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/adb868>
- Dalagnol, R., Borma, L., Mateus, P., & et al. (2017). Assessment of climate change impacts on water resources of the Purus Basin in the southwestern Amazon. *Acta Amazonica*, 47, 213 - 226.
doi:<https://doi.org/10.1590/1809-4392201601993>.
- Dalagnol, R., Borma, L., Mateus, P., & et al. (2017). Assessment of climate change impacts on water resources of the Purus Basin in the southwestern Amazon. *Acta Amazonica*, 47, 213-226.
doi:<https://doi.org/10.1590/1809-4392201601993>

- Davidson, E., Araújo, A., Artaxo, P., & et al. (2012). The Amazon basin in transition. *Nature*, 481, 321-328. doi:<https://doi.org/10.1038/nature10717>
- Davidson, E., Araújo, A., Artaxo, P., & et al. (2012). The Amazon basin in transition *Nature*. 481(7381), 321-328. doi:<https://doi.org/10.1038/nature10717>
- Davidson, E., Araújo, A., Artaxo, P., & et al. (2012). The Amazon basin in transition. *Nature*, 481, 321-328. doi:<https://doi.org/10.1038/nature10717>
- De Brito Gomes, W., Correia, F., Capistrano, V., & et al. (2020). Water budget changes in the Amazon basin under RCP 8.5 and deforestation scenarios. *Climate Research*, 80, 105-120. doi:<https://doi.org/10.3354/cr01597>.
- De Castro, A., Cuartas, L., Coe, M., & et al. (2018). Coupling the terrestrial hydrology model with biogeochemistry to the integrated LAND surface model: Amazon Basin applications. *Hydrological Sciences Journal*, 63, 1954-1966. doi:<https://doi.org/10.1080/02626667.2018.1538592>
- De Faria, B. L., Marano, G., Piponiot, C., & et al. (2021). Model-Based Estimation of Amazonian Forests Recovery Time after Drought and Fire Events. *Forest*, 12(1). doi:<https://doi.org/10.3390/f12010008>
- Denning, S. (2021). Southeast Amazonia is no longer a carbon sink. *Nature*, 595(7867), 354-355. doi:[10.1038/d41586-021-01871-6](https://doi.org/10.1038/d41586-021-01871-6)
- Dias, L., Macedo, M., Costa, M., & et al. (2015). Effects of land cover change on evapotranspiration and streamflow of small catchments in the Upper Xingu River Basin, Central Brazil. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 4, 108-122. doi:<https://doi.org/10.1016/J.EJRH.2015.05.010>.
- Diazgranados, M., Tovar, C., Etherington, T., & et al. (2021). Ecosystem services show variable responses to future climate conditions in the Colombian páramos. *PeerJ*, 9. doi:<https://doi.org/10.7717/peerj.11370>.
- Diodato, N., Filizola, N., Borrelli, P., & et al. (2020). The Rise of Climate-Driven Sediment Discharge in the Amazonian River Basin. *Atmosphere*, 11(206). doi:[10.3390/atmos11020208](https://doi.org/10.3390/atmos11020208)
- Docherty, E., Gloor, M., Sponchiado, D., & et al. (2023). Long-term drought effects on the thermal sensitivity of Amazon forest trees. *Plant, Cell & Environment*, 46(1), 185-198. doi:[10.1111/pce.14465](https://doi.org/10.1111/pce.14465)

- Doughty, C., Metcalfe, D., Girardin, C., & et al. (2015). Drought impact on forest carbon dynamics and fluxes in Amazonia. *Nature*, 519, 78-82. doi:<https://doi.org/10.1038/nature14213>.
- Drumond, A., Marengo, J., Ambrizzi, T., & et al. (2014). The role of Amazon Basin moisture on the almospheric branch of the hydrological cycle: a Lagrangian analysis. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11, 1023-1046. Obtenido de <https://hess.copernicus.org/preprints/11/1023/2014/hessd-11-1023-2014.pdf>
- Dubos, N., Lenormand, M., Castello, L., & et al. (2022). Protection gaps in Amazon floodplains will increase with climate change: Insight from the world's largest scaled freshwater fish. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystem*, 32(11), 1830-1841. doi:10.1002/aqc.3877
- Dubreuil, V., Funatsu, B., Michot, V., & et al. (2017). Local rainfall trends and their perceptions by Amazonian communities. *Climatic Change*, 143, 461-472. doi:<https://doi.org/10.1007/s10584-017-2006-0>
- Duffy, P. B., Brando, P., Asner, G. P., & et al. (2015). Projections of future meteorological drought and wet periods in the Amazon. *PNAS. Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences*, 112(43), 13172-13177. doi:<https://doi.org/10.1073/pnas.1421010112>
- Duran, R., & T. Carvalho. (2024). La Amazonía: ¿Un dilema entre desarrollo y sustentabilidad? *Blog Tecnológico Monterrey*. Obtenido de https://__egobiernoytp.tec.mx_es_blog_amazonia-es
- Ecuador. (2019). *Primera Contribución Determinada a Nivel Nacional para el Acuerdo de Paris bajo la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático*. Quito. Obtenido de <https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022-06/Primera%20NDC%20Ecuador.pdf>.
- Ecuador. Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica. (2023). *Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático del Ecuador (2023-2021)*. Quito: Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica. Obtenido de <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/PLAN-NACIONAL-DE-ADAPTACION-2.pdf>
- Eghdami, M., & Barros, A. P. (2020). Deforestation Impacts on Orographic Precipitation in the Tropical Andes. *Frontiers in Enviromental Science*, 8. doi:<https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.580159>
- Ellwanger, J. H., Kulmann-Leal, B., Kaminski, V. L., & et al. (2020). *Beyond diversity loss and climate change: Impacts of Amazon deforestation on infectious diseases and public health*. *Anais da Academia Brasileira de Ciencias*, 92. doi:<https://doi.org/10.1590/0001-3765202020191375>

- Ellwanger, J., Kulmann-Leal, B., Kaminski, V., & et al. (2020). Beyond diversity loss and climate change: Impacts of Amazon deforestation on infectious diseases and public health. *Anais da Academia Brasileira de Ciencias*, 92(1), e20191375. doi:<https://doi.org/10.1590/0001-3765202020191375>
- Espinoza, J. C., Ronchail, J., Guimbertau, M., & et al. (2014). Eventos hidrológicos extremos en la cuenca amazonica peruana: presente y futuro. En S. González Molina, J.-J. Vacher, & (eds), *El Perú frente al cambio climático* (págs. 47-57). Paris: IRD Éditions. doi:10.4000/books.irdeditions.19580
- Esquivel-Muelbert, A., Baker, T. R., Dexter, K. G., & et al. (2019). Compositional response of Amazon forests to climate change. *Global Change Biology*, 25, 39-56. doi:<https://doi.org/10.1111/gcb.14413>
- Esteban, E. J., Castilho, C. V., Melgaço, K. L., & al, e. (2021). The other side of droughts: wet extremes and topography as buffers of negative drought effects in an Amazonian forest. *The New Phytologist*, 229(4), 1995 - 2006. doi:10.1111/nph.17005
- Esteves, A. B., Capistrán, R., Arcuschin, H., & et al. (4 de diciembre de 2024). *Ríos de oportunidades: las vías fluviales del Amazonas, clave para el crecimiento económico y la inclusión social*. Obtenido de Moviliblog. Ideas de Transporte y Movilidad para América Latina y El Caribe: [https://blogs.iadb.org/transporte/es/rios-de-oportunidades-las-vias-fluviales-del-amazonas-clave-para-el-crecimient o-economico-y-la-inclusion-social/](https://blogs.iadb.org/transporte/es/rios-de-oportunidades-las-vias-fluviales-del-amazonas-clave-para-el-crecimient-o-economico-y-la-inclusion-social/)
- Evans, S., Pidcock, R., & Yeo, S. (14 de 2 de 2017). *The Social Cost of Carbon*. Obtenido de CarbonBrief. Clear on Climate: <https://www.carbonbrief.org/qa-social-cost-carbon/#:~:text=One%20way%20to%20get%20a,the%20costs%20of%20cutting%20emissions>
- Farinosi, F., Arias, M., Lee, E., & et al. (2019). Future Climate and Land Use Change Impacts on River Flows in the Tapajós Basin in the Brazilian Amazon. *Earth's Future*, 7, 993 - 1017. doi:<https://doi.org/10.1029/2019EF001198>
- Fassoni-Andrade, A. C., Fleischmann, A. S., Papa, F., & et al. (2021). Amazon Hydrology From Space: Scientific Advances and Futures Challenges. *Reviews of Geophysics*, 59, e2020RG000728. Obtenido de <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1029/2020RG000728>

- Fearnside, P. M. (2012). La vulnerabilidad de la selva amazónica frente a los cambios climáticos . *II Seminario Internacional sobre la cuenca del río Santiago. Cambio Climático* . Guadalajara (México) : Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de Ciencias Económico Administrativas. .
- Fearnside, P. M., & Imbrozio Barboza, R. (1998). Soil carbon changes from conversion of forest to pasture in Brazilian Amazonia. *Forest Ecology and Management*, 108(1-2), 147-166.
doi:[https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(98\)00222-9](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(98)00222-9)
- Feldpausch, T., Phillips, O., Brien, R., & et al. (2016). Amazon forest response to repeated droughts. *Global Biogeochemical Cycles*, 30, 964-982. doi:<https://doi.org/10.1002/2015GB005133>
- Feng, D., Raoufi, R., Beighley, E., & et al. (2020). Future climate impacts on the hydrology of headwater streams in the Amazon River Basin: Implications for migratory goliath catfishes. *Hydrological Processes*, 34, 5402-5416.
doi:<https://doi.org/10.1002/hyp.13952>
- Finer, M., & Jenkins, C. (2012). Proliferation of Hydroelectric Dams in the Andean Amazon and Implications for Andes-Amazon Connectivity. *PLoS ONE*, 7. doi:<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0035126>.
- Fiocruz & WWF Brazil. (30 de abril de 2021). *Wildfires in the Amazon increases respiratory diseases*. Obtenido de WWF: <https://www.wwf.org.br/?78351/Wildfires-in-the-Amazon-increases-respiratory-diseases#:~:text=Brasil%20www,Brazil>
- Fisher, R., Williams, M., Vale, R., & et al. (2006). Evidence from Amazonian forests is consistent with isohydric control of leaf water potential. *Plant, cell & environment*, 29(2), 151-156.
doi:<https://doi.org/10.1111/J.1365-3040.2005.01407.X>
- Fisher, R., Williams, M., Costa, A., & et al. (2007). The response of an Eastern Amazonian rain forest to drought stress: results and modelling analyses from a throughfall exclusion experiment. *Global Change Biology*, 13.
doi:<https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01417.x>
- Flach, R., Abrahão, G., Bryant, B., & et al. (2021). Conserving the Cerrado and Amazon biomes of Brazil protects the soy economy from damaging warming. *World Development*, 146, 105582. doi:<https://doi.org/10.1016/J.WORLDDEV.2021.105582>

- Fleischmann, A., Papa, F., Halminton, S. K., & al, e. (2023). Increased floodplain inundation in the Amazon since 1980. *Environmental Research Letter*, 18(3), 034024. doi:10.188/1748-9326/acb9a7
- Flores, B. M., Montoya, E., Sakschewski, B., & et al. (2024). Critical transitions in the Amazon forest system. *Nature*, 626, 555–564. doi:https://doi.org/10.1038/s41586-023-06970-0
- Fonseca, M. G., Alves, L. M., Aguiar, A. P., & et al. (2019). Effects of climate and land-use change scenarios on fire probability during the 21st century in the Brazilian Amazon. *Glob Chang Biol*, 25, 2931-2946. doi:10.1111/gcb.14709.
- Frappart, F., Papa, F., Da Silva, S., & et al. (2012). Surface freshwater storage and dynamics in the Amazon basin during the 2005 exceptional drought. *Environmental Research Letters*, 7. doi:https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/4/044010.
- Frappart, F., Papa, F., Güntner, A., & et al. (2019). The spatio-temporal variability of groundwater storage in the Amazon River Basin. *Advances in Water Resources*. doi:https://doi.org/10.1016/J.ADVWATRES.2018.12.005
- Freire, S., MacManus, K., Pesaresi, M., & et al. (2016). Development of new open and free multi-temporal global population grids at 250 m resolution. In Geospatial Data in a Changing World; Association of Geographic Information Laboratories in Europe (AGILE). *Geospatial Data in a Changing World; Association of Geographic Information Laboratories in Europe (AGILE)*.
- Freitas, C., Siqueira-Souza, F., Humston, R., & et al. (2013). An initial assessment of drought sensitivity in Amazonian fish communities. *Hydrobiologia*, 705, 159-171. doi:https://doi.org/10.1007/s10750-012-1394-4.
- Freund, M. B., Henley, B. J., Karoly, D. J., & et al. (2019). Higher frequency of Central Pacific El Niño events in recent decades relative to past centuries. *Natural Geosciences*, 12, 450-455. doi:https://doi.org/10.1038/s41561-019-0353-3
- Friedlingstein , P., & et al. (2024). *Global Carbon Budget 2024*. Earth System. Science Data. doi:https://doi.org/10.5194/essd-2024-519
- Friedman, A., Bollasina, M., Gastineau, G., & et al. (2021). Increased Amazon Basin wet-season precipitation and river discharge since the early 1990s driven by tropical Pacific variability. *Environmental Research Letters*, 16. doi:https://doi.org/10.1088/1748-9326/abd587

- Funatsu, B., Dubreuil, V., Racapé, A., & et al. (2019). Perceptions of climate and climate change by Amazonian communities. *Global Environmental Change*, 57. doi:<https://doi.org/10.1016/J.GLOENVCHA.2019.05.007>.
- Galindo, L. M., Hoffman, B., & Vogt-Schilb, A. (2022). *¿Cuánto costará lograr los objetivos del cambio climático en América Latina y El Caribe?* Washington, DC: Banco Interamericano de Desarrollo. División de Cambio Climático. Obtenido de <https://publications.iadb.org/es/cuanto-costara-lograr-los-objetivos-del-cambio-climatico-en-america-latina-y-el-caribe>
- Gatti, L. V., Basso, L. S., Miller, J. B., & et al. (2021). Amazonia as a carbon source linked to deforestation and climate change. *Nature*, 595, 388-393. doi:<https://doi.org/10.1038/s41586-021-03629-6>
- Gatti, L., Basso, L., Miller, J. B., & al, e. (2021). Amazonia as a carbon source linked to deforestation and climate change. *Nature*, 595, 388-393. doi:10.1038/s41586-021-03629-6
- Gatti, L., Basso, L., Miller, J., & et al. (Julio de 2021). Amazonia as a carbon source linked to deforestation and climate change. *Nature*, 595(7867), 388-393.
- Gloor, M., Brienen, R., Gabor, D., & et al. (2013). Intensification of the Amazon hydrological cycle over the last two decades. *Geophysical Research Letters*, 40, 1729 -1733. doi:<https://doi.org/10.1002/grl.50377>
- Granato - Souza, D., & Stahle, D. w. (2023). Drought and Flood Extremes on the Amazon River and in Northeast Brazil,. *Journal of Climate*, 36(20), 1790-1900. doi:10.1175/JCLI-D-23-0146.1
- Granato-Souza, D., Stahle, W., Torbenson, C. A., & et al. (2020). Multi-decadal changes in wet season precipitation totals over the eastern Amazon. *Geophys. Res. Lett.*, 47,(e2020GL087478,). doi:<https://doi.org/10.1029/2020GL087478>.
- Gray, C., & Bilsborrow, R. (2020). Stability and Change within Indigenous Land Use in the Ecuadorian Amazon. *Global environmental change : human and policy dimensions*, 63(102116). doi:<https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2020.102116>.
- Guayasamin, J., Ribas, C., Carnaval, A., & et al. (2021). Chapter 2. Evolution of Amazonian Biodiversity. *United Nations Sustainable Development Solitions Network*. doi:10.55161/CZWN4679

- Guimberteau, M., Ronchail, J., Espinoza, J., & et al. (2013). Future changes in precipitation and impacts on extreme streamflow over Amazonian sub-basins. *Environmental Research Letters*, 8. doi: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/1/014035>.
- Gutierrez-Villareal, R. A., J.C., Espinoza, W. Lavado-Casimiro, & et al. (2024). The 2022-23 drought in the South American Altiplano: Enso effects on moisture flux in the western Amazon during the pre-wet season. *Weather and Climate Extremes*, 45, 100710. doi:10.1016/j.wace.2024.100710
- Guyana. (2016). *Guyana's Revised Intended Nationally Determined Contribution*. Georgetown. Obtenido de <https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022-06/Guyana%27s%20revised%20NDC%20-%20Final.pdf>
- Guyana, Cooperative Republic of. (2018). *National Adaptation Plan Guyana*. Georgetown: Japan Caribbean Climate Change Partnership (j-CCCP). Obtenido de https://procurement-notice.undp.org/view_file.cfm?doc_id=131467
- Guyana, Cooperative Republic of. Guyana Lands and Surveys Commission. (2020). *Guyana's National Drought Mitigation and Adaptation Plan. United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD). Drought Initiative*. Georgetown: Global Mechanism United Nations Convention to Combat Desertification. Obtenido de <https://lands.glsc.gov.gy/projects/unccd/Ndmap>
- Haghtalab, N., Moore, N., & Nejadhashemi, P. (2020). Would Forest Regrowth Compensate for Climate Change in the Amazon Basin? *Applied Science*, 12(14), 7052. doi:10.3390/app12147052
- Haghtalab, N., Moore, N., & Nejadhashemi, P. (2022). Would Forest Regrowth Compensate for Climate Change in the Amazon Basin? *Applied Sciences*, 12(14). doi:<https://doi.org/10.3390/app12147052>
- Haghtalab, N., Moore, N., Heerspink, B., & et al. (2020). Evaluating spatial patterns in precipitation trends across the Amazon basin driven by land cover and global scale forcings. *Theoretical and Applied Climatology*, 140, 411-427. doi:<https://doi.org/10.1007/s00704-019-03085-3>.
- Hampf, A., Stella, T., Berg-Mohnicke, M., & et al. (2020). Future yields of double-cropping systems in the Southern Amazon, Brazil, under climate change and technological development. *Agricultural Systems*, 177(102707). doi:<https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.102707>

- Hampf, A., Stella, T., Berg-Mohnicke, M., & et al. (2020). Future yields of double-cropping systems in the Southern Amazon, Brazil, under climate change and technological development. *Agricultural Systems. Science Direct*, 177. doi:<https://doi.org/10.1016/j.agry.2019.102707>
- Hanusch ed., M. (2023). *A Balancing Act for Brazil's Amazonian States: An Economic Memorandum. International Development in Focus*. Washington, DC: World Bank. doi:[doi:10.1596/978-1-4648-1909-4](https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1909-4)
- Hanusch, M., & Strand, J. (8 de junio de 2023). *¿Cuándo debemos pagar para preservar la Amazonia brasileña?*. Obtenido de Banco Mundial Blogs : <https://blogs.worldbank.org/es/latinamerica/cuanto-debemos-pagar-para-preservar-la-amazon-a-brasileña>
- Harper, A., Baker, I., Denning, A., & et al. (2014). Impact of Evapotranspiration on Dry Season Climate in the Amazon Forest. *Journal of Climate*, 27, 574-591. doi:<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00074.1>
- Harris, I., Jones, P. D., Osborn, T. J., & et al. (2014a). Updated high resolution grids of monthly climatic observations - the CRU TS3.10 Dataset. *International Journal of Climatology* 34, 623-642. doi:<https://doi.org/10.1002/joc.3711>
- Hastie, A., Honorio Coronado, E. N., Reyna, J., & et al. (2022). Risks to carbon storage from land-use change revealed by peat thickness maps of Peru. *Nat. Geoscience*, 15, 369-374. doi:<https://doi.org/10.1038/s41561-022-00923-4>
- Helmer, E. H., Gerson, E. A., Baggett, L. S., & et al. (2019). Neotropical cloud forests and páramo to contract and dry from declines in cloud immersion and frost. *PLoS ONE*, 14(4), e0213155. doi:<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0213155>
- Hirota, M., Nobre, C., Alencar, A., & et al. (2022). Policy Brief: A call for global action to move the Amazon rainforest system away from tipping points. doi:<https://doi.org/10.55161/jvyw3199>
- Hoorn, C., & Wesselingh, F. P. (2010). *Amazonia: landscape and species evolution. A look into the past*. Wiley - Blackwell.
- Hope, C., & Castilla-Rubio, J. (2008). *A first cost benefit analysis of action to reduce deforestation*. Working paper, Cambridge University, Cambridge, UK. Obtenido de digital.library.unt.edu/ask/67531/metadc13708/
- Hubau, W., Lewis, S., Phillips, O. L., & et al. (2020). Asynchronous Carbon Sink Saturation in African and Amazonian Tropical Forests. *Nature*, 579, 80-87. doi:<https://doi.org/10.1038/s41586-020-2035-0>

- Huntingford, C., Zelazowski, P., Galbraith, D., & et al . (2012). Simulated resilience of tropical rainforests to CO2-induced climate change. *Nature Geoscience*, 6, 268-273. doi:10.1038/ngeo1741
- IDEAM. (2020). *Evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos de Colombia*. Bogota: IDEAM.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. Obtenido de <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.). (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report*. Geneva, Switzerland,: IPCC. doi:10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.
- Ivanova, Y. (2022). Impact of changes in average temperature and land cover on components of the water balance in the Teatinos River basin, Páramo Rabanal, Colombia. *Nature Conservation Research.*, 7(4), 42-54. doi:<https://doi.org/10.24189/ncr.2022.035>.
- Jimenez, J. C., Marengo, J. A., Alves, L. M., & et al. (2021). *The role of ENSO flavours and TNA on recent droughts over Amazon forestand the Northeast Brazil region*. International Journal of Climatology. Special Edition. IV ENSO Conference .
- Junior Siqueira de, J. L., Tomasella, J., Rodríguez , D. A., & et al . (2013). Mudancas Climáticas Globais e sus Impactos sobre o Regime Hidrologico na bacia rio Madera. En A. B. Hídricos (Ed.), *Anais XX Simposio Brasileiro de Recursos Hídricos ISSN 2318 - 0358*. Bento Goncalves (Brasil) . Obtenido de https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/66/SBRH2013__PAP012669.pdf
- Júnior, J. L., Tomasella, J., & Rodriguez, D. (2015). Impacts of future climatic and land cover changes on the hydrological regime of the Madeira River basin. *Climatic Change*, 129, 117-129. doi:<https://doi.org/10.1007/s10584-015-1338-x>
- Kahn, M. E., Mohaddes, K., Ryan, N. N., & et al. (2019). *Long-Term Macroeconomic Effects of Climate Change: A Cross-Country Analysis*. International Monetary Fund. Obtenido de <https://www.imf.org/en/Publications/WP/Issues/2019/10/11/Long-Term-Macroeconomic-Effects-of-Climate-Change-A-Cross-Country-Analysis-48691>

- Labandeira, X., León, C. J., & Vázquez, M. X. (2007). *Economía Ambiental*. Madrid: Pearson Printice Hall. doi:ISBN 10: 84-205-3651-2 ISBN 13: 978-84-205-3651-4
- Lagarde, C. (25 de January de 2021). Climate Change and Central Banking. *ILF Conference on Green Banking and Green Central Banking*. Frankfurt, Germany: Bank for International Settlements. Central Bankers Speeches. Obtenido de <https://www.bis.org/review/r210127d.pdf>
- Langerwisch, F., Rost, S., Gerten, D., & et al. (2012). Potential effects of climate change on inundation patterns in the Amazon Basin. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17, 2247-2262. doi:<https://doi.org/10.5194/HESS-17-2247-2013>
- Lapola, D. M., Pinho, P., Barlow, J., & et al. (2023). The drivers and impacts of Amazon forest degradation. *Science*, 379(6630). doi:<https://doi.org/10.1126/science.abp8622>
- Lapola, D., Schaldach, M., & Alcamo, J. (2011). Impacts of Climate Change and the End of Deforestation on Land Use in the Brazilian Legal Amazon. *Earth Interactions*, 15, 1-29. doi:<https://doi.org/10.1175/2010EI333.1>
- Lavado-Casimiro, W. S., Labat, D., Guyot, J. L., & et al. (2011). Assessment of climate change impacts on the hydrology of the Peruvian Amazon–Andes basin. *Hydrological Processes*, 25(11), 3721-3734. doi:<https://doi.org/10.1002/hyp.8097>
- Leão, C. F., Ribeiro, M. S., Moraes, K., & et al. (2023). Climates changes and carnivores: shifts in the distribution and effectiveness of protected areas in the Amazon. *Peer J*, 11. doi:10.7717/peerj.15887
- Leite-Filho, A. T., Soares-Filho, B. S., Davis, J. L., & et al. (2021). Deforestation reduces rainfall and agricultural revenues in the Brazilian Amazon. *Nature Communications*, 12(2591). doi:<https://doi.org/10.1038/s41467-021-22840-7>
- Lense, G., Avanzi, J., Parreiras, T., & et al. (2020). Effects of deforestation on water erosion rates in the Amazon region. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, 15(4), 1-7. doi:<https://doi.org/10.5039/agraria.v15i4a8500>
- Liang, Y., Lo, M., Lan, C., & et al. (2020). Amplified seasonal cycle in hydroclimate over the Amazon river basin and its plume region. *Nature Communications*, 11. doi:<https://doi.org/10.1038/s41467-020-18187-0>
- Liao, P., Lan, C., Liang, Y., & et al. (2024). Exploring the Factors Controlling the Annual Range of Amazon Precipitation. *Journal of Climate*. doi:<https://doi.org/10.1175/jcli-d-23-0130.1>

- Lilleskov, E. (c. 2023). *Turberas, Carbono y Clima de América Latina*. Sustainable Wetlands Adaptation and Mitigation Program. Obtenido de www.canr.msu.edu/fccp/FCCP-ORL/Resources-in-Spanish/Turberas,%20Carbono,%20y%20Clima%20de%20América%20Latina%20final.pdf#:~:text=en%20los%20bosques%20del%20Perú
- Lima , L., Coe , M., Filho, B., & et al. (2014). Feedbacks between deforestation, climate, and hydrology in the Southwestern Amazon: implications for the provision of ecosystem services. *Landscape Ecology*, 29, 261-274. doi:<https://doi.org/10.1007/s10980-013-9962-1>
- Lima Filho, J. A. (2017). *Estruturação longitudinal de assembleia de peixes do Rio Madeira*. Manaus (Brasil): Universidade Federal do Amazonas. Obtenido de <https://tede.ufam.edu.br/handle/tede/6547>
- Lima, V. R. (2012). *Caracterización biogeográfica del bioma Caatinga en el sector semiarido fr la cuenca de río Paraíba - Nordeste de Brasil*. Sevilla (España): Universidad de Sevilla.
- Llopart, M., Coppola, E., Giorgi, F., & et al. (2014). Climate change impact on precipitation for the Amazon and La Plata basins. *Climatic Change*, 125, 111-125. doi:<https://doi.org/10.1007/s10584-014-1140-1>
- Llopart, M., Reboita, M. S., Coppola, E., & et al. (2018). Land Use Change over the Amazon Forest and Its Impact on the Local Climate. *Water*, 10(2), 149. doi:<https://doi.org/10.3390/w10020149>
- Llopart, M., Reboita, M., & Da Rocha, P. (2019). Assessment of multi-model climate projections of water resources over South America CORDEX domain. *Climate Dynamics*, 54, 99-116. doi:<https://doi.org/10.1007/s00382-019-04990-z>
- Loarie, S. R., Asner, G. P., & Field, C. B. (2009). Boosted carbon emissions from Amazon deforestation . *Geophys. Res. Lett.*, 36(L14810). doi: [doi:10.1029/2009GL037526](https://doi.org/10.1029/2009GL037526).
- Longo, M., Saatchi, S., Keller, M., & et al. (2020). Impacts of Degradation on Water, Energy and Carbon Cycling of Amazon Tropical Forest. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences.*, 125(8), e2020JG005677. doi:[10.129/2020JG005677](https://doi.org/10.129/2020JG005677)
- Lopes, T., Zolin, C., Mingoti, R., & et al. (2021). Hydrological regime, water availability and land use/land cover change impact on the water balance in a large agriculture basin in the Southern Brazilian Amazon. *Journal of South American Earth Sciences*, 108(103224). doi:<https://doi.org/10.1016/J.JSAMES.2021.103224>

- López Feldman, A., & Hernández Cortéz, D. (2016). Cambio climático y agricultura: una revisión de la literatura con énfasis en América Latina. *El trimestre económico*, 83(332), 459-496. doi:<https://doi.org/10.20430/ete.v83i332.231>
- Lovejoy, T. E., & Nobre, C. (2019). Amazon tipping point: Last chance for action. *Science Advances*, 5, eaba2949. doi:<https://doi.org/10.1126/sciadv.aba2949>
- Lucas , E., Silva, F., De Assis Salviano De Souza, F., & et al. (2022). Regionalization of Climate Change Simulations for the Assessment of Impacts on Precipitation, Flow Rate and Electricity Generation in the Xingu River Basin in the Brazilian Amazon. *Energies.*, 15(7698). doi:<https://doi.org/10.3390/en15207698>
- Machado, M. S., Berenguer, E., Brando, P. M., & et al . (2024). Emergency policies not enough to resolve Amazonia's fire crisis. *Communn Earth Environment*, 5(204). doi:10.1030/s4347-024-01344-4
- Machado-Silva, F., Peres, L., Gouveia, C., & et al . (2021). Drought resilience debt drives NPP decline in the Amazon forest. *Global Biogeochemical Cycles*, 35. doi:10.1029/2021GB007004
- Majarrés Hernández , A. (2021). *Analisis de la distribución de peces de agua dulce a diferentes escalas espaciales y temporales*. Leticia (Colombia): Universidad Nacional de Colombia. Sede Amazonía. Obtenido de <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/79990/36724817.2021Manjarres.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- Maldonado, M., del Pino, M., & Ochoa, V. (2018). Impacts of climate change on páramo water resources in Ecuador. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 17, 40-54. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2018.03.002>
- Malhi , Y., Wood, D., Baker, T. R., & et al. (2006). The Regional Variation of Aboveground Live Biomass in Old-Growth Amazonian Forests. *Global Change Biology*, 7, 1107 - 1138. doi:<https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01120.x>
- MAPBiomás. (11 de 11 de 2024). *Plataforma Amazonía*. Obtenido de <https://amazonia.mapbiomas.org/>
- Marca-Zeballos, M., Moulatlet, G., Sousa, T., & et al. (2022). Local hydrological conditions influence tree diversity and composition across the Amazon basin. *Ecography*, 2022(11). doi:<https://doi.org/10.1111/ecog.06125>
- Marek, H., & Strand, J. (8 de Junio de 2023). ¿Cuánto debemos pagar para preservar la Amazonía brasileña? Obtenido de <https://blogs.worldbank.org/es/latinamerica/cuanto-debemos-pagar-para-preservar-la-amazon-a-brasilena>

- Marengo, J., Nobre, C., Sampaio, G., & et al. (2011). Climate change in the Amazon Basin: Tipping points, changes in extremes, and impacts on natural and human systems. In: Bush, M., Flenley, J., Gosling, W. (eds) *Tropical Rainforest Responses to Climatic Change* Springer Praxis Books. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-642-05383-2_9
- Marengo, J. A., Espinosa, J. C., Fu, R., & et al. (2021). Capítulo 22: Variabilidad a largo plazo, extremos y cambios de temperatura e hidrometeorología en la región amazónica. En C. Nobre, A. Encalada, E. Anderson, & et al (eds), *.Informe de Evaluación de la Amazonía 2021*. Panel Científico por la Amazonia. doi:10.55161/YMTH3678
- Marengo, J., & et al. (2012). Extreme climatic events in the Amazon basin Climatological and hydrological context of recent floods. *Theor Appl Climatol*, 107(1-2), 73-85.
- Marengo, J., Chou, S., Kay, G., & et al. (2012). Development of regional future climate change scenarios in South America using the Eta CPTec/HadCM3 climate change projections: climatology and regional analyses for the Amazon, São Francisco and the Paraná River basins. *Climate Dynamics*, 38, 1829-1848. doi:<https://doi.org/10.1007/s00382-011-1155-5>.
- Marengo, J., Espinoza, J.-C., R.FU, & et al. (2024).
- Markewitz, D., Devine, S., Davidson, E., & et al. (2010). Soil moisture depletion under simulated drought in the Amazon: impacts on deep root uptake. *The New phytologist*, 187(3), 592-607. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2010.03391.x>
- Mejia Silva, C., & et al. (2021). *Vulnerabilidad Climática de America Latina y el Caribe en un contexto de pandemia*. Lima : Latidadd.
- Melo, Ó., Samaniego, J., Ferrer Carbonell, J., & et al, (. (2023). *Costos asociados a la inacción frente al cambio climático en Chile. Síntesis*. Santiago de Chile: Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). Obtenido de <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/0828cba2-a6b8-44f3-8606-1db4971bcf2a/content>
- Mendes, C. A., Beluco, A., & Canales, F. A. (2017). Some important uncertainties related to climate change in projections for the Brazilian hydropower expansion in the Amazon. *Energy*, 141, 123-138. doi:<https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2017.09.071>.

- MiAMBIENTE (Panamá); UNOPS; ICAT; Fundación NATURA . (2022). *Sistema de Monitoreo y Evaluación de la Adaptación al Cambio Climático en Panamá. Metodología para Evaluar las Perdidas y Daños Productos del Cambio Climático en Panamá*. Ciudad de Panamá: United Nations Office for Project Services (UNOPS).
- Ministerio de Medio Ambiente y Agua. Autoridad Plurinacional de la Madre Tierra. (2021). *Contribución Nacionalmente Determinada del Estado Plurinacional de Bolivia. Actualización de las CND para el periodo 2021-2030 en el marco del Acuerdo de París*. La Paz (Bolivia). Obtenido de <https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022-06/CND%20Bolivia%202021-2030.pdf>
- Mohor, G., Rodriguez, D., Tomasella, J., & et al. (2015). Exploratory analyses for the assessment of climate change impacts on the energy production in an Amazon run-of-river hydropower plant. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 4, 41-59. doi:<https://doi.org/10.1016/J.EJRH.2015.04.003>
- Molina Carpio , J. (2007). *Análisis de los Estudios de Impacto Ambiental del Complejo Hidroeléctrico del Río Madera Hidrología y Sedimentos*. La Paz (Bolivia): FOBOMADE - Foro Boliviano sobre Medio Ambiente y Desarrollo. Obtenido de <https://documentoskoha.s3.amazonaws.com/7031.pdf>
- Molina-Carpio, J., Espinoza, J., Vauchel, P., & et al. (2017). Hydroclimatology of the Upper Madeira River basin: spatio-temporal variability and trends. *Hydrological Sciences Journal*, 62, 911-927. doi:<https://doi.org/10.1080/02626667.2016.1267861>
- Molinier, M., Guyot, J. L., de Oliveira, E., & et al. (1994). Hidrologia da Bacia do rio Amazonas. *A Água em Revista*, 2(3), 31-36.
- Möller, T., Högner, A. E., Schleussner, C., & et al. (2024). Achieving net zero greenhouse gas emissions critical to limit climate tipping risks. *Nat Commun*, 15(6192). doi:<https://doi.org/10.1038/s41467-024-49863-0>
- Monitoring of Andes Amazon Program (MAAP) . (2022 de octubre de 2024). *MAAP # 220 Carbon across the Amazon (part 3): Key cases of carbon loss & gain*. Obtenido de Monitoring of Andes Amazon Program (MAAP) : <https://www.maaproject.org/amazon-carbon-loss-gain/>
- Monitoring of Andes Amazon Program (MAAP). (28 de octubre de 2024). *MAAP #220: Carbon across the Amazon (part 3):*. Obtenido de Monitoring of Andes Amazon Program (MAAP): <https://maaproject.kinsta.cloud/?html2pdf=https://www.maaprogram.org/amazon-carbon-loss-gain/&media=print>

- Moraes , R., Correa, S., Doria, C., & et al. (2021). Chapter 4 Amazonian ecosystems and their ecological functions. In: Amazon Assessment Report 2021. *United Nations Sustainable Development Solutions Network*. doi:10.55161/IKRT9380
- Moraes, K., Santos, M., Goncalves, G., & et al. (2020). Climate change and bird extinctions in the Amazon. *PLOS ONE*, 15(7). doi:<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0236103>
- Naciones Unidas. (10 de ener de 2025). *El 2024 fue el año más caliente jamás registrado, superando por 1,5°C el nivel preindustrial*. Obtenido de Noticias ONU: [https://news.un.org/es/story/2025/01/1535626#:~:text=clim%C3%A1tica%E2%80%9D%2C%20enfatisa.,El%2024%20fue%20el%20a%C3%B1o%20m%C3%A1s%20caliente%20que%20se%20haya,Organizaci%C3%B3n%20Meteorol%C3%B3gica%20Mundial%20\(OMM\)](https://news.un.org/es/story/2025/01/1535626#:~:text=clim%C3%A1tica%E2%80%9D%2C%20enfatisa.,El%2024%20fue%20el%20a%C3%B1o%20m%C3%A1s%20caliente%20que%20se%20haya,Organizaci%C3%B3n%20Meteorol%C3%B3gica%20Mundial%20(OMM)).
- Naffaa, S., Beek, L. v., Dunn, F. E., & et al. (2020). Modeling the changing sediment yield of the Amazon under climate change and deforestation scenarios and the possible impacts on the Guiana coast. *22nd EGU General Assembly, held online 4-8 May, 2020, id.18621*. doi:doi:10.5194/egusphere-egu2020-18621
- Nagy, G. J., Caffera, R. M., Aparicio, M., & et al . (2006). *Understanding Potential Impacts og Climate Change and Variability in Latin America and the Caribbean* . London (UK) : Stern Review .
- NASA Earth Observatory . (11 de October de 2023). *Drought Fuels Wildfires in the Amazon*. Obtenido de NASA Earth Observatory: <https://earthobservatory.nasa.gov/images/151965/drought-fuels-wildfires-in-the-amazon>
- National Oceanic and Atmospheric Administration. (14 de july de 2021). *Deforestation, warming flip part of Amazon forest from carbon sink to source*. Obtenido de NOAA Resarch: <https://research.noaa.gov/deforestation-warming-flip-part-of-amazon-forest-from-carbon-sink-to-source/?form=MG0AV3&form=MG0AV3>
- Nepstad, D., Lefebvre, P., Da Silva, U., & et al. (2004). Amazon drought and its implications for forest flammability and tree growth: a basin-wide analysis. *Global Change Biology*, 10. doi:<https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2003.00772.x>.
- Nepstand, D. C. (2007). *The Amazon´s Vicious Cycles*. World Wide Fund for Nature (WWF). Obtenido de https://wwfeu.awsassets.panda.org/downloads/amazonas_eng_04_12b_web.pdf

- Nijssen, B., O'Donnell, G., Hamlet, A., & et al. (2001). Hydrologic Sensitivity of Global Rivers to Climate Change. *Hydrologic Sensitivity of Global Rivers to Climate Change.*, 50, 143-175.
doi:<https://doi.org/10.1023/A:1010616428763>
- Noble, I. R., S., H., Y.A., A., & et al. (2014). *Adaptation needs and options. In: Climate Change 2014. Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, New York, USA.
- Nobre, C. A., Sampaio, G., Borma, L. S., & et al. (2016). Land use and climate change risks in the Amazon and the need of a novel sustainable development paradigm. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 113,10759-10768. doi:<https://doi.org/10.1073/pnas.16055161113>
- Nobre, C., & Arieria, J. (20 de diciembre de 2023). *La Amazonía esta cerca de un punto de inflexión: necesitamos urgentemente soluciones basadas en la naturaleza.* Obtenido de World Ecocomic Forum. Foro Institucional : <https://es.weforum.org/stories/2023/12/la-amazonia-esta-cerca-de-un-punto-de-inflexion-necesitamos-urgente-soluciones-basadas-en-la-naturaleza-wef24/>
- Nordhaus, W. (2018). Projections and Uncertainties about Climate Change in an Era of Minimal Climate Policies. *American Economic Journal: Economic Policy*, 10(3), 333 - 360. doi:<https://doi.org/10.1257/pol.20170046>
- Nordhaus, W. D. (2017). *Projections and Uncertainties about Climate Change in an era of minimal climate policies.* Cambridge (Mass, USA): National Bureau of Economics Research. Obtenido de <http://www.nber.org/papers/w22933>
- Nordhaus, W. D. (2017). Revisiting the social cost of carbon. *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*, 114(7), 1518-1523. doi:www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1609244114
- Numata, I., Khand, K., Kjaersgaard, J., & et al. (2021). Forest evapotranspiration dynamics over a fragmented forest landscape under drought in southwestern Amazonia. *Agricultural and Forest Meteorology*, 306(108446). doi:<https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMET.2021.108446>.
- Oberdorff T., J. C., Campero, M., Carajal-Vallejos, F., & et al. (2014). Peces Amazónicos y Cambio Climático. En S. González Molina, J. Joinville Vacher, & (eds), *El Peru frente al Cambio Climático* (págs. 87 -98). Paris : IRD Éditions.

- Olaya López, D. F. (06 de junio de 2022). La Amazonía colombiana como sujeto de derechos. Un caso de justicia ambiental. *Revista IUS*, 16(49), 223-251. doi:<https://doi.org/10.35487/rius.v16i49.2022.719>
- Oliveira Da Cruz, C. (s.f.). *Igapó*. Obtenido de InfoEscola: <https://www.infoescola.com/biomas/igapo/>
- Oliveira, B. F., Bottino, M., Nobre, P., & et al. (2021). Deforestation and climate change are projected to increase heat stress risk in the Brazilian Amazon. *Communications Earth & Environment*, 2. doi: <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00275-8>.
- Oliveira, B. F., Bottino, M., Nobre, P., & et al. (2021). Deforestation and climate change are projected to increase heat stress risk in the Brazilian Amazon. *Communications Earth & Environment*, 2(207). doi:<https://doi.org/10.1038/s43247-021-00275-8>.
- Oliveira, G. L., Viana-Junior, A. B., Trindade, P. H., & et al. (2023). Wild canids and the ecological traps facing the climate change and deforestation in Amazon Forest. *Ecology and Evolution*, 13(6), e10150. doi:10.1002/ece3.10150
- Oliveira, W., Medeiros, M., Moser, P., & et al. (2021). Mega-dams and extreme rainfall: Disentangling the drivers of extensive impacts of a large flooding event on Amazon Forests. *PLoS ONE*, 16. doi:<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0245991>.
- Organizacion del Tratado de Cooperación Amazónica (OTCA). (2021). *Nuestra Amazonía*. Obtenido de OTCA: <https://otca.org/la-amazonia/>
- OTCA. Organización del Tratado de Cooperación Amazonica. (2021). *Atlas de Vulnerabilidad Hidroclimática de la Región Amazónica*. Brasilia: Organización del Tratado de Cooperación Amazónica y Centro Internacional para la Investigación del Fenómeno de El Niño.
- Pabón Caicedo, J. D., & Montealegre Bocanegra, J. E. (2017). *Los fenómenos El Niño y La Niña su efecto climático e impactos socioeconómicos*. Bogotá: Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.
- Paca, V. H., Espinoza-Dávalos, G. E., Hessels, T., & et al. (2019). The spatial variability of actual evapotranspiration across the Amazon River Basin based on remote sensing products validated with flux towers. *Ecological Processes*, 8, 1-20. doi: <https://doi.org/10.1186/s13717-019-0158-8>.

- Paiva, R., Buarque, D., Clarke, R., & et al. (2011). Reduced precipitation over large water bodies in the Brazilian Amazon shown from TRMM data. *Geophysical Research Letters*, 38. doi:<https://doi.org/10.1029/2010GL045277>.
- Panel Científico por la Amazonía (SPA) . (2023). *¿A qué amenazas se enfrenta la Amazonía?* Obtenido de Panel Científico por la Amazonía . La Amazonía que queremos. : <https://www.sp-amazon.org/es/sobre-la-amazonia>
- Panel de Ciencia por la Amazonía. (2021). *Informe de Evaluación de Amazonía (3 tomos)* . New York: United Nations Sustainable Solutions Network.
- Panel de Ciencia por la Amazonia. (2021). *Informe de Evaluación de Amazonia 2021 (3 Tomos)*. New York (USA): United Nations Sustainable Development Solutions Network,.
- Papastefanou , P., Zang, , C. S., Angelov, Z., & et al. (2022). Recent extreme drought events in the Amazon rainforest: assessment of different precipitation and evapotranspiration datasets and drought indicators. *Biogeosciences*, 19(16), 3843-3861. doi:10.5194/bg-19-3843-2022
- Paredes-Trejo, F., Barbosa, H., Giovannettone, J., & et al. (2022). Drought variability and land degradation in the Amazon River basin. *Frontiers in Earth Science*, 10. doi:<https://doi.org/10.3389/feart.2022.939908>
- Parry, I. M., Ritchie, P. D., & Cox, P. M. (2022). . Evidence of localised Amazon rainforest dieback in CMIP6 models. *Earth System Dynamics*, 13(4), 1667–1675. doi:<https://doi.org/10.5194/esd-13-1667-2022>
- Pereira, F. F. (2017). Technical note: A hydrological routing scheme for the Ecosystem Demography model (ED2+R) tested in the Tapajós River basin in the Brazilian Amazon. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21, 4629-4648. doi:<https://doi.org/10.5194/HESS-21-4629-2017>.
- Pereira, F., Farinosi, F., Arias, M., & et al. (21). Technical note: A hydrological routing scheme for the Ecosystem Demography model (ED2+R) tested in the Tapajós River basin in the Brazilian Amazon. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21, 4629-4648. doi: <https://doi.org/10.5194/HESS-21-4629-2017>.
- Pereira, G., Silva, V., Camara, R., & et al. (2020). Artificial flooding changes soil chemistry and carbon dynamics in upland forests next to hydropower plant in Amazon basin. *Environment, Development and Sustainability*, 23, 7537 - 7549. doi:<https://doi.org/10.1007/s10668-020-00931-7>
- Perú. Comisión de Alto Nivel de Cambio Climático. . (2020). *Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional. Reporte de actualización periodo 2021-2030* . Obtenido de

<https://www.gob.pe/institucion/minam/informes-publicaciones/1682641-reporte-de-actualizacion-de-las-ndc-del-peru-al-2030>

Perú. Ministerio del Ambiente. (2021). *Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático del Perú: un insumo para para la actualización de la Estrategia Nacional ante el Cambio Climático*. Lima (Perú): Ministerio del Ambiente. Obtenido de <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/NAP-Peru-2021.pdf>

Peyre, G. (2022). What does the future hold for páramo plants? *Frontiers in Ecology and Evolution*. doi:<https://doi.org/10.3389/fevo.2022.896387>

Phillips, O., Aragão, L., Lewis, S., & et al. (2009). Drought Sensitivity of the Amazon Rainforest. *Science*, 323, 1344-1347. doi:<https://doi.org/10.1126/science.1164033>.

Pica, A., Cid, F., Ferrer, J., & et al. (2024). *Estimación del precio social del carbono para la evaluación de la inversión pública en Costa Rica*. Santiago de Chile: Comisión Económica para América Latina y el Caribe. Obtenido de <https://www.cepal.org/es/publicaciones/69074-estimacion-precio-social-carbono-la-evaluacion-la-inversion-publica-costa-rica#:~:text=Los%20resultados%20del%20estudio%20recomiendan,d%C3%B3lares%20de%202021%20por%20tonelada>.

Pimentel , E. T., & Hamza, V. M. (2011). Indications of an Underground River beneath the Amazon River: Inferences from Results of Geothermal Studies. *12th International Congress of the Brazilian Geophysical Society & EXPOGEF*, (págs. 745 - 750). Rio de Janeiro.

Pontet Ubal, N. (2017). Hacia una estimacion del costo de la inacción en la gestión. En Ó. A. Díaz Becerra, J. C. Dextre Flores, & (eds), *Ciencia contable: visión y perspectiva* (págs. 161 - 165). Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, Fondo Editorial. doi:ISBN 978-612-317-308-1

PROVITA. (21 de marzo de 2023). *Deforestación en la Amazonía: pasado, presente y futuro*. Obtenido de PROVITA: <https://www.provita.org.ve/2023/03/21/deforestacion-en-la-amazonia-pasado-presente-y-futuro/#:~:text=Para%20detener%20el%20avance%20de,y%20experimentan%20una%20presi%C3%B3n%20constante>

Quesada, C., Phillips, O., Schwarz, M., & et al. (2012). Basin-wide variations in Amazon forest structure and function are mediated by both soils and climate. *Biogeosciences*, 9, 2203-2246. doi:<https://doi.org/10.5194/BG-9-2203-2012>

- Rabadán Travesí , B. (2018). *Estudio de Sostenibilidad sobre el acceso universal a la energía y el agua*. Madrid: Universidad Pontificia Comillas, Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Máster en Ingeniería Industrial .
- RAISG (Red Amazónica de Información Ambiental Georeferenciada). (19 de septiembre de 2022). *Brasil, Bolivia y Perú, los países con más índices de deforestación en selva Amazónica*. Obtenido de RAISG: <https://www.raisg.org/en/radar/brasil-bolivia-y-peru-los-paises-con-mas-indices-de-deforestacion-en-selva-amazonica/#:~:text=En%20Bolivia%20se%20perdieron%20m%C3%A1s,%C3%A1rea%20total%20de%20esa%20zona>
- RAISG (Red Amazónica de Información Socioambiental Georeferenciada). (2022). *Deforestación en la Amazonia al 2025*. Santa Cruz (Bolivia): RAISG. Obtenido de https://infoamazonia.org/wp-content/uploads/2023/03/DEFORESTACION-AMAZONIA-2025_21032023.pdf
- Ranasinghe, R., Ruane, A. C., Vautard, R., & et al. (2021). Climate Change Information for Regional Impact and for Risk Assessment. En V. Masson-Delmonte, P. Zhai, & A. Pirani, *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of Intergovernmental Panel on Climate Change* (págs. 1767 - 1926). Cambridge (UK) & New York (USA) : Camdrige University Press .
- Republiek Suriname. (2015). *Final National Climate Change Policy, Strategy and Action Plan for Suriname 2014-2021*. Belmopan, Belize: Caribbean Community Climate Change Centre. Obtenido de https://dondru.sr/media/1047/sr_climate_change_policy_strategy_action_plan_2014_2021.pdf
- Ribeiro, C., Mohanty, B., Rotunno Filho, O., & et al. (2023). Water Balance and the Moist Planetary Boundary Layer Driven by Land Use and Land Cover Change across the Amazon Basin. *Water*, 15(23), 4052. doi:<https://doi.org/10.3390/w15234052>
- Rocha, D. G., & Sollmann, R. (2023). Habitat patterns suggest that climate-driven vegetation changes will negatively impact mammal communities in the Amazon.3. *Animal Conservation*, 26(5), 663-674. doi:10.1111/acv.1285
- Rodríguez , D. A., Lopes Garofolo, L., Carriello, F., & et al. (2017). Extreme Flood Forescast In Sazonal And Short And Medium Range In The Madeira Basin. Study Case: The Flood Of March 30, 2014 In Porto Velho. *Revista Brasileira de Cartografia*, 69(4), 827 -836. Obtenido de https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/84098793/23419-libre.pdf?1649895755=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DPrevisoes_De_Cheias_Extremas_Nos_Horizon.pdf&Expires=1746851452&Signature=DWwTFMpHdrnFIMKghOIKm6KkmcAT4pHyJb48NhZ4PsCM6U34Mg3nk99V

- Rosan, T. M., Sitch, S., Mercado, L. M., & et al. (2022). Fragmentation-Driven Divergent Trends in Burned Area in Amazonia and Cerrado. *Frontiers in Forests and Global Change*, 5(801408). doi:10.3389/ffgc.2022.801408
- Rufino, P., Gücker, B., Faramarzi, M., & et al. (2023). Evaluation of the SWAT Model for the Simulation of Flow and Water Balance Based on Orbital Data in a Poorly Monitored Basin in the Brazilian Amazon. *Geographies*, 3, 1-18. doi:https://doi.org/10.3390/geographies3010001.
- Ruiz Velasco, M. (2017). *Análisis del funcionamiento del modelo DICE y su aplicación a la economía del cambio climático*. Santander (España) : Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Cantabria .
- Ruiz-Vásquez , M., Arias, P. A., Martínez, J. A., & et al. (2020). Effects of Amazon basin deforestation on regional atmospheric circulation and water vapor transport towards tropical South America. *Climate Dynamics*, 54, 4169-4189. doi:https://doi.org/10.1007/s00382-020-05223-4
- Sales, L. P., Galetti, M., & Pires, M. M. (2020). Climate and land-use change will lead to a faunal “savannization” on tropical rainforests. *Glob. Chang. Biol*, 26, 7036-7044. doi:DOI:10.1111/gcb.15374
- Sampaio, G., Borma, L., Cardoso, M., & et al. (2018). Assessing the Possible Impacts of a 4 °C or Higher Warming in Amazonia. *Climate Change Risks in Brazil*. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-92881-4_8.
- Sanderson , B., & O'Neill, B. (2020). Evaluación de los costos de la inacción histórica sobre el cambio climático. *Sci Rep*, 10, 9173. doi:https://doi.org/10.1038/s41598-020-66275-4
- Santini, W., Martinez, J. M., Espinoza-Villar, R., & et al. (2015). Sediment budget in the Ucayali River basin. *PIAHS*, 367, 320-325. doi:https://doi.org/10.5194/PIAHS-367-320-2015
- Santos, J., Montenegro, S., Silva, R., & et al . (2021). Modeling the impacts of future LULC and climate change on runoff and sediment yield in a strategic basin in the Caatinga/Atlantic forest ecotone of Brazil. *Catena*, 203(105308). doi:https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2021.105308
- Satizábal-Alarcón, D. A., Suhogusoff, A., & Ferrari, L. C. (2024). Characterization of groundwater storage changes in the Amazon River Basin based on downscaling of GRACE/GRACE-FO data with machine learning models. *Sci Total Environ.*, 912(168958). doi:doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.168958.

- Schaeffer, R., Barrantes, R., Klautau, A., & et al. (2023). Una nueva infraestructura para la Amazonía. *Science Panel for the Amazon*, Policy Brief. doi:10.55161/ROYG4225
- Schiavina, M., Freire, S., Carioli, A., & et al. (2023a). GHS-POP R2023A - GHS population grid multitemporal (1975-2030). European Commission, Joint Research Centre (JRC). Obtenido de <http://data.europa.eu/89h/2ff68a52-5b5b-4a22-8f40-c41da8332cfe>
- Schietti, J., Emílio, T., Rennó, C., & et al. (2014). Vertical distance from drainage drives floristic composition changes in an Amazonian rainforest. *Plant Ecology & Diversity*, 7, 241-253. doi:<https://doi.org/10.1080/17550874.2013.783642>.
- Secretaría del Panel Científico por la Amazonía (SPA). (2024). *Amazonía en llamas: : Perspectivas del Panel Científico por la Amazonía (SPA) sobre la emergencia de incendios forestales de 2024*. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmninnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.laamazoniaquequeremos.org/wp-content/uploads/2024/10/241003-FIRE-STATEMENT_SPA_.pdf
- Sena , J., De Deus , L., Freitas, M., & et al. (2012). Extreme Events of Droughts and Floods in Amazonia: 2005 and 2009. *Water Resources Management*. 26, 1665-1676. doi:<https://doi.org/10.1007/s11269-012-9978-3>
- Sena, J., Beser de Deus, L. A., & Freitas, M. A. (2012). Extreme Events of Droughts and Floods in Amazonia: 2005 and 2009. *Water Resources Management*, 26, 1665-1676. Obtenido de <https://doi.org/10.1007/s11269-012-9978-3>
- Silva Junior, C. A., Lima, M., Teodoro, P. E., & et al. (2022). Fires Drive Long-Term Environmental Degradation in the Amazon Basin. *Remote Sensing*, 14(2), 338. doi:<https://doi.org/10.3390/rs14020338>
- Silva, J. L., Capistrano, V. B., Veiga, J. A., & et al. (2023). Regional climate modeling in the Amazon basin to evaluate fire risk. *ACTA* <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4392202201881> *AMAZONICA*, 53, 166-176. doi:<http://dx.doi.org/10.1590/1809-4392202201881>
- Smith, C. C., Healey, J. R., Berenguer, E., & et al. (2021). Old-growth forest loss and secondary forest recovery across Amazonian countries. *Environmental Research Letters*, 16(8). doi:<https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac1701>
- Soares-Filho, B., Nepstad, D. C., Curran, L. M., & et al. (2020). Modelling conservation in the Amazon basin. *Nature*, 440(7083), 520-523. doi:<https://doi.org/10.1038/nature04389>

- Soito, J. L., & Freitas, M. A. (2011). Amazon and the expansion of hydropower in Brazil: Vulnerability, impacts and possibilities for adaptation to global climate change. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*(15), 3165-3177. doi:<https://doi.org/10.1016/J.RSER.2011.04.006>.
- Song, X.-P., Huang, C., Saatchi, S. S., & et al. (2015). Annual Carbon Emissions from Deforestation in the Amazon Basin between 2000 and 2010. *PLoS ONE*, 10(5), e0126754. doi:10.1371/journal.pone.0126754
- Sorribas, M., Paiva, R., Melack, J., & et al. (2016). Projections of climate change effects on discharge and inundation in the Amazon basin. *Climatic Change*, 136, 555-570. doi:<https://doi.org/10.1007/s10584-016-1640-2>.
- Sotta, E., Veldkamp, E., Schwendenmann, L., & et al. (2009). Effects of an induced drought on soil carbon dioxide (CO₂) efflux and soil CO₂ production in an Eastern Amazonian rainforest, Brazil. *Global Change Biology*, 13. doi:<https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01416.x>.
- Souza Jr, C. M., Marengo, J., Ferreira, B., & al, e. (2024). Amazon severe drought in 2023 triggered surface water loss. *Environmental Research Climate*, 3. doi:10.1088/2752-5295/ad7c71
- Souza, C. M., Oliveira, L. A., de Souza Filho, J. S., & et al. (2023). Landsat sub-pixel land cover dynamics in the Brazilian Amazon. *Frontiers in Forests and Global. Change*, 6. doi:<https://doi.org/10.3389/ffgc.2023.1294552>
- Spracklen, D. V., & Garia-Carreras, L. (2015). The impact of Amazonian deforestation. *Geophysical Research Letters*, 42, 9546–9552. doi:10.1002/2015GL066063
- Staal, A., Flores, B. M., D Aguiar, A. P., & et al. (2020). Feed back between drought and deforestation in the Amazon. *Environmental Research Letters*, 15(044024). doi:<https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab738e>
- Staal, A., Tuinenburg, O., Bosmans, J., & et al. (2018). Forest-rainfall cascades buffer against drought across the Amazon. *Nature Climate Change*, 8, 539-543. doi:<https://doi.org/10.1038/s41558-018-0177-y>.
- Stahle, D. W., Barbosa, A. C., Granato-Souza, D., & et al. (2019). Tree rings and rainfall in the equatorial Amazon. *Climate Dynamics*, 52, 3-4. doi:[doi:doi.org/10.1007/s00382-018-4227-](https://doi.org/10.1007/s00382-018-4227-)
- Stahle, D. W., Torbenson, M. C., Howard, I. M., & et al. (2020). Pan American interactions of Amazon precipitation, streamflow and tree growth extremes. *Environmental Research Letters* , 15(10 - 104092). doi:10.1088/1748-9326/ababc6

- Stanton, E. A., & Ackerman, F. (2007). *Florida and Climate Chance*. Medford, Massachusetts, USA.: Tufts University. Obtenido de https://www.bu.edu/eci/files/2019/11/Florida_hr.pdf
- Stern, N. (2006). *La economía del cambio climático: Stern Review*. Cambridge University Press.
- Stern, N. (2007). *The economics of climate change: the Stern review*. London (UK) : HM Treasury.
- Stern, N., & Stiglitz, J. E. (15 de Feb. de 2021). Cómo establecer bien el costo social del carbono. *Project Syndicate The World's Opinion Page*. Obtenido de <https://www.project-syndicate.org/commentary/biden-administration-climate-change-higher-carbon-price-by-nicholas-stern-and-joseph-e-stiglitz-2021-02/spanish#:~:text=El%20incremento%20de%20temperatura%20de,en%20mat%20de%20acci%C3%B3n%20clim%C3%A1tica>
- Strand, J., Soares-Filho, B., Costa, M. H., & et al. (2018). Spatially explicit valuation of the Brazilian Amazon Forest's Ecosystem Services. *Nature Sustainability*, 1, 657–664. doi:<https://doi.org/10.1038/s41893-018-0175-0>
- Sun, L., Baker, J., Gloor, E., & et al. (2019). Seasonal and Inter-annual Variation of Evapotranspiration in Amazonia Based on Precipitation, River Discharge and Gravity Anomaly Data. *Frontiers in Earth Science*. doi:<https://doi.org/10.3389/feart.2019.00032>.
- Surinam, Cabinet of the President of. (2019). *Nationally Determined Contribution 2020*. Paramaribo. Obtenido de <https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022-06/Suriname%20Second%20NDC.pdf>
- Surinam, Government of. (2019). *Surinam National Adaptation Plan*. Paramariba: Japan-Caribbean Climate Change Partnership (UNDP-JCCCP). Obtenido de <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/NAP-Suriname-2020.pdf>
- Swann, A., & Koven, C. (2017). A Direct Estimate of the Seasonal Cycle of Evapotranspiration over the Amazon Basin. *Journal of Hydrometeorology*, 18, 2173 - 2185. doi: <https://doi.org/10.1175/JHM-D-17-0004.1>.
- Sy, S., & Quesada, B. (2020). Anthropogenic land cover change impact on climate extremes during the 21st century. *Environmental Research Letters*, 15(3), 034002. doi: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab702c>
- Tanure, D. T., Miyajima, D., Magalhães, A., & et al. (2020). The Impacts of Climate Change on Agricultural Production, Land Use and Economy of the Legal Amazon Region Between 2030 and 2049. *Economica*, 21, 73-90. doi:<https://doi.org/10.1016/j.econ.2020.04.001>

- Taylor, J. E., Dyer, G. A., & Yúnez-Naude, A. (2012). Disaggregated Rural Economywide Models for Policy Analysis. *World Development* 33, 1671-1688. doi:<https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2005.05.003>
- The Nature Conservancy (TNC). (2022). Proteger la cuenca del Amazonas para la naturaleza y las personas. Obtenido de <https://www.nature.org/es-us/que-hacemos/nuestras-prioridades/proteger-la-tierra-y-el-agua/proteger-cuenca-amazonas/#:~:text=M%C3%A1s%20all%C3%A1%20de%20hogar>
- Tietenberg, T., & Lewis, L. (2019). *Environmental Economics. The Essentials*. New York: Routledge. doi:<https://doi.org/10.4324/9780429299292>
- Timpe, K., & Kaplan, D. (2017). The changing hydrology of a dammed Amazon. *Science Advances*, 3(e1700611). doi:<https://doi.org/10.1126/sciadv.1700611>.
- Tingting, Y., Rongbin, X., Xu, Y., & et al. (2022). Short-term exposure to wildfire-related PM_{2.5} increases mortality risks and burdens in Brazil. *Nature Communications*, 7651. doi:<https://doi.org/10.1038/s41467-022-35326-x>
- Torres-Amaral, C., Anjos, L. J., Vieira, I. C., & et al. (2023). The climatic risk of Amazonian protected areas is driven by climate velocity until 2050. *PLoS ONE*, 18(6), e0286457. doi:<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0286457>
- Torres-Slimming, P., Wright, C., Lancha, G., & et al. (2020). Climatic Changes, Water Systems, and Adaptation Challenges in Shawi Communities in the Peruvian Amazon. *Sustainability*, 12(3422). doi:<https://doi.org/10.3390/su12083422>
- Towner, J., Cloke, H., Zsoter, E., & et al. (2019). Assessing the performance of global hydrological models for capturing peak river flows in the Amazon basin. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(7), 3057-3080. doi:<https://doi.org/10.5194/HESS-23-3057-2019>.
- UNFCCC. (2019). *Compendium on comprehensive risk management approaches, Executive Committee of the Warsaw International Mechanism for Loss and Damage, UNFCCC, Bonn, Germany*. Obtenido de https://unfccc.int/sites/default/files/resource/FINAL_AA3_Compendium
- United Nations. Climate Change . (noviembre de 2024). *2024 NDC Synthesis Report*. Obtenido de United Nations. Climate Change:

<https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/nationally-determined-contributions-ndcs/2024-ndc-synthesis-report>

- United Nations. Framework Convention on Climate Change. (2024). *Nationally determined contributions under the Paris*. Baku: Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to the Paris Agreement. Sixth session. Obtenido de <https://unfccc.int/documents/641792>
- Val, L. A., & Wood, C. M. (2022a). Global change and physiological challenges for fish of the Amazon today and in the near future. *Journal of Experimental Biology*, 225(10), jeb216440. doi:<https://doi.org/10.1242/jeb.216440>
- Val, P., Figueiredo, J., Melo, G., & et al. (2021). Chapter 1: Geological History and Geodiversity of the Amazon. (C. Nobre, A. Encalada, E. Anderson, F. Roca Alcazar, M. Bustamante, C. Mena, . . . et al, Edits.) *Amazon Assessment Report 2021. United Nations Sustainable Development Solutions Network*. doi:10.55161/POFE6241
- Valencia, J., Mesa, J., León, J., & et al. (2020). Climate Vulnerability Assessment of the Espeletia Complex on Páramo Sky Islands in the Northern Andes. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 8(565708). doi:<https://doi.org/10.3389/fevo.2020.565708>.
- Valois, L., & Cartaxo, E. (2022). Amazon cities and climate change. *International Journal for Innovation Education and Research*, 10(11), 189-207. doi:<https://doi.org/10.31686/ijer.vol10.iss11.3994>.
- Van Passel, J., de Keersmaecker, W., Bernardino, P. N., & et al. (2022). climatic legacy effects on the drought response of the Amazon rainforest. *Global Change Biology*, 28(19), 5808-5819. doi:<https://doi.org/10.1111/gcb.16336>
- Vasconcelos, M., Pereira, H., Lopes, M., & et al. (2022). Impacts of Climate Change on the Lives of Riverine Farmers on the Lower Rio Negro, Amazon. *Atmosphere*. doi:<https://doi.org/10.3390/atmos13111906>.
- Vasconcelos Alves de, M., Pereira Santos dos, H., Lopes, M., & et al. (2022). Impacts of Climate Change on the Lives of Riverine Farmers on the Lower Rio Negro, Amazon. *Atmosphere*, 13, 1906. doi:<https://doi.org/10.3390/atmos13111906>
- Veilleux, J., & Anderson, E. (2016). 2015 Snapshot of Water Security in the Nile, Mekong, and Amazon River Basins. *Limnology and Oceanography Bulletin*, 25. doi:<https://doi.org/10.1002/lob.10085>.
- Vélez Upegui, J. J. (2022). La crisis climática. *Boletín Ambiental*(191), 3 - 26.

- Venezuela, República Bolivariana de; Ministerio del Poder Popular para el Ecosocialismo. (2021). *Actualización de la Contribución Nacionalmente Determinada de la República Bolivariana de Venezuela para la lucha contra el Cambio Climático y sus efectos*. Caracas: Ministerio del Poder Popular para el Ecosocialismo. Obtenido de <https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022-06/Actualizacion%20NDC%20Venezuela.pdf>
- Vergara, A., Arias, M., Gachet, B., & et al. (2022). *Informe Amazonia Viva 2022*. Quito (Ecuador): WWF. Obtenido de <https://www.worldwildlife.org/publications/living-amazon-report-2022>
- Villar, R. (21 de october de 2021). *The health impacts of the smoke from the fires in the Amazon*. Obtenido de Greenpeace: <https://www.greenpeace.org/international/story/50047/smoke-fires-deforestation-amazon-brazil-health-impact/#:~:text=Amazon%20www,as%20well%20due%20to>
- Vuille, M., Mark, &., Christian & Buytaert, & et al. (2018). Rapid decline of snow and ice in the tropical Andes-Impacts, uncertainties and challenges ahead. *Earth-Science Reviews*, 176, 195-2013.
- Walker, W. S., Gorelik, S. R., Baccini, , A., & et al. (2020). The role of forest conversion, degradation, and disturbance in the carbon dynamics of Amazon indigenous territories and protected areas. *Proceedings of the National Academic Sciences (PNAS)*, 117(6), 3015-3025. doi:<https://doi.org/10.1073/pnas.1913321117>
- Wang, S., Zhuang, Q., Lähteenoja, O., & et al. (2018). Potential shift from a carbon sink to a source in Amazonian peatlands under a changing climate. *Proceedings of the National Academic Sciences (PNAS)*, 115(49), 12407-12412. doi:<https://doi.org/10.1073/pnas.1801317115>
- Wang, X.-Y., Li, X., Zhu, J., & et al. (2018). The strengthening of Amazonian precipitation during the wet season driven by tropical sea surface temperature forcing. *Environmental Research Letters*, 13(094015). doi:DOI 10.1088/1748-9326/aadbb9
- Warner, K., & Weisberg, M. (19 de January de 2023). A funding mosaic for loss and damage. *Science*, 399(6629), 219. doi:10.1126/science.adg5740
- Watson, C., & Schalateck, L. (2019). *Reseña temática sobre el financiamiento del clima*. Washington (D.C.): Climate Funds Update. Obtenido de Climate Funds Update : <https://climatefundsupdate.org/publications/climate-finance-thematic-briefing-adaptation-finance-2/>

- Whittaker, R. H. (1972). Evolution and Measurement of Species Diversity. *Taxon*, 213-251. doi:10.2307/1218190
- WHRC. (2020). *Amazon Dry Season length from 1961-2100*. Woods Hole research Center, Falmouth, MA.
- World Bank. (2010). *Economics of Adaptation to Climate Change. Synthesis Report* . Washington : The World Bank.
- Wu, M., Schurgers, G., Ahlström, A., & et al. (2017). Impacts of land use on climate and ecosystem productivity over the Amazon and the South American continent. *Environmental Research Letters*, 12. doi:https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa6fd6.
- Wu, Y., Miao, C., Sun, Y., & et al. (2021). Global Observations and CMIP6 Simulations of Compound Extremes of Monthly Temperature and Precipitation. *GeoHealth*, 5(5), e2021GH000390. doi:https://doi.org/10.1029/2021GH000390
- Wunderling, N., Donges, J. F., Kurths, J., & et al. (2021). Interacting tipping elements increase risk of climate domino effects under global warming. *Earth Syst. Dynam.*(12), 601-619. doi:https://doi.org/10.5194/esd-12-201-2021
- Wunderling, N., Gelbrecht, M., Winkelmann, R., & et al. (2020). Basin stability and limit cycles in a conceptual model for climate tipping cascades. *New Journal of Physics*, 22(12). doi:123031.https://doi.org/10.1088/1367-2630/abc98a
- Wunderling, N., Staal, A., Sakschewski, B., & et al. (2022). Recurrent droughts increase risk of cascading tipping events by outpacing adaptive capacities in the Amazon rainforest. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119(32). doi:e2120777119. https://doi.org/10.1073/pnas.2120777119
- Xiao-Peng Song, Chengquan, H., Sassan , S., & et al. (7 de mayo de 2015). Annual Carbon Emissions from Deforestation in the Amazon Basin between 2000 and 2010. *Townshend Published*. doi:https://doi.org/10.1371/journal.pone.0126754
- Xu, X., Zhang, X., Riley, W. J., & et al. (2022). Deforestation triggering irreversible transition in Amazon hydrological cycle. *Environmental Research Letters*, 17(3), 034037. doi:https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac4c1d
- Yao, W., Shanshan, L., Rongbin, X., & et al. (2023). Wildfire-related PM2.5 and health economic loss of mortality in Brazil. *Environment International*, 107906. Obtenido de journal homepage: www.elsevier.com/locate/envint
- Yoon, J., & Zeng,, N. (2010). An Atlantic influence on Amazon rainfall. *Climate Dynamics*, 34, 249-264. doi:https://doi.org/10.1007/S00382-009-0551-6.

- Zavaleta, C., Berrang-Ford, L., Ford, J., & et al. (s.f.). Multiple non-climatic drivers of food insecurity reinforce climate change maladaptation trajectories among Peruvian Indigenous Shawi in the Amazon. *PLoS ONE*, 13(10): e0205714). doi:<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0205714>.
- Zhu, L., Li, W., Ciais, P., & et al. (2023). Comparable biophysical and biogeochemical feedbacks on warming from tropical moist forest degradation. *Nat. Geosci*, 16, 244-249. doi:<https://doi.org/10.1038/s41561-023-01137-y>
- Ziesler, R., & Ardizzone, G. D. (!979). *COPESCAL, Doc. Téc./COPESCAL Tech.Pap., (1): 171 p.* Roma: COPESCAL.
- Zitoum, R., Marcinek, S., Hatje, V., & et al. (2024). Climate change driven effects on transport, fate an biogeochemistry of trace elements contaminants in coastal marine ecosystems. *Commun Earth Environment*, 5(560). doi:10.1030/s43247-024-01679-y
- Zulkafli, Z., Buytaert, W., Manz, B., & et al. (2016). Projected increases in the annual flood pulse of the Western Amazon. *Environmental Research Letters*, 11. doi:<https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/1/014013>
- Zurur, C. (19 de december de 2024). *Amazon drought disrupts river transportation, raises manufacturing costs*. Obtenido de Valor International Business: <https://valorinternational.globo.com/business/news/2024/12/19/amazon-drought-disrupts-river-transportation-raises-manufacturing-costs.ghtml>