

NOTA TÉCNICA No IDB-TN-03271

Riesgo climático en ecosistemas colombianos: Aportes desde la modelación probabilista

Omar Darío Cardona A.

Gabriel Andrés Bernal G.

Sthefania Grajales N.

Dora Catalina Suárez O.

María del Pilar Pérez R .

Diana Marcela González C.

José Manuel Sandoval

Andrea Acosta

Banco Interamericano de Desarrollo
Cambio Climático y Desarrollo Sostenible

Diciembre 2025



Septiembre 2025
Bogotá D.C.

Autores:

Ingenier Risk Intelligence:

Omar Darío Cardona A.
Director del Proyecto: Experto en gestión del riesgo/adaptación y cambio climático

Gabriel Andrés Bernal G.
Experto en modelación de riesgo catastrófico y cambio climático

Sthefania Grajales N.
Experta en riesgo climático bajo condiciones de alta incertidumbre para la toma de decisiones

Dora Catalina Suárez O.
Experta ambiental con experiencia en formulación de políticas y planes ambientales

María del Pilar Pérez R.
Experta en adaptación, monitoreo y evaluación

Diana Marcela González C.
Experta en riesgo climático bajo condiciones de alta incertidumbre para la toma de decisiones

BID:

José Manuel Sandoval.
Especialista Senior, BID

Andrea Acosta,
Consultora

JEL CODES: Q54, Q57, Q25, Q23, Q51,

<http://www.iadb.org>

Copyright © 2025 Banco Interamericano de Desarrollo (BID). Esta obra se encuentra sujeta a una licencia Creative Commons CC BY 3.0 IGO (<https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/igo/legalcode>). Se deberá cumplir los términos y condiciones señalados en el enlace URL y otorgar el respectivo reconocimiento al BID.

En alcance a la sección 8 de la licencia indicada, cualquier mediación relacionada con disputas que surjan bajo esta licencia será llevada a cabo de conformidad con el Reglamento de Mediación de la OMPI. Cualquier disputa relacionada con el uso de las obras del BID que no pueda resolverse amistosamente se someterá a arbitraje de conformidad con las reglas de la Comisión de las Naciones Unidas para el Derecho Mercantil (CNUDMI). El uso del nombre del BID para cualquier fin distinto al reconocimiento respectivo y el uso del logotipo del BID, no están autorizados por esta licencia y requieren de un acuerdo de licencia adicional.

Note que el enlace URL incluye términos y condiciones que forman parte integral de esta licencia.

Las opiniones expresadas en esta obra son exclusivamente de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista del BID, de su Directorio Ejecutivo ni de los países que representa.



Riesgo climático en ecosistemas colombianos:

Aportes desde la
modelación probabilista



Contenido

Pág.	
7	Resumen Ejecutivo
9	1 Introducción
11	2 Objetivo y alcance
12	Actores institucionales
13	Unidades de análisis territoriales
15	3 Síntesis metodológica
16	Marco conceptual para la evaluación del riesgo climático
17	Modelación probabilista de la amenaza climática
19	Identificación y caracterización de los elementos expuestos
21	Valoración económica de servicios ecosistémicos
28	Modelación de riesgo por tensión climática:
28	Modelación de riesgo por incendios forestales:
29	Cálculo de métricas de riesgo:
29	Integración y agregación territorial:
30	Análisis de escenarios climáticos bajo incertidumbre y validación
30	Manejo de la incertidumbre profunda:
30	Sensibilidad y robustez de resultados:
30	Validación y revisión por expertos:
31	Comunicación de incertidumbre y su consideración en políticas:
33	4 Resultados de modelación y riesgo climático
37	Cuantificación probabilista y económica del riesgo
38	Riesgo por incendios forestales
43	Priorización territorial y enfoque holístico
45	Evaluación del riesgo total
47	5 Medidas de Adaptación: Propuestas Estratégicas para el Sector Ambiente
	6 Conclusiones
53	7 Bibliografía

Listado de acrónimos

- ▶ AR6: Sexto Informe de Evaluación del IPCC
- ▶ BID: Banco Interamericano de Desarrollo
- ▶ CAR: Corporaciones Autónomas Regionales y de Desarrollo Sostenible
- ▶ CHIRPS: Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station Data
- ▶ CMNUCC: Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
- ▶ COP: Peso colombiano
- ▶ DNP: Departamento Nacional de Planeación
- ▶ EIA: Evaluación de Impacto Ambiental
- ▶ ERA5: Fifth Generation ECMWF Atmospheric Reanalysis of the Global Climate
- ▶ E2050: Estrategia Climática de Largo Plazo de Colombia
- ▶ IAvH: Instituto Alexander von Humboldt
- ▶ IDEAM: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
- ▶ IPCC: Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático
- ▶ INVEMAR: Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras
- ▶ MEA: Millennium Ecosystem Assessment
- ▶ MADS: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible
- ▶ NDC: Contribución Determinada a Nivel Nacional
- ▶ PDGRD: Plan Departamental de Gestión del Riesgo de Desastres
- ▶ PGIBSE: Política Nacional para la Gestión Integral de la Biodiversidad y sus Servicios Ecosistémicos
- ▶ PIGCC: Plan Integral de Gestión del Cambio Climático
- ▶ PNACC: Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático
- ▶ PNCC: Política Nacional de Cambio Climático
- ▶ PNNC: Parques Nacionales Naturales de Colombia
- ▶ RCP: Representative Concentration Pathway
- ▶ SIAC: Sistema de Información Ambiental de Colombia
- ▶ SINAP: Sistema Nacional de Áreas Protegidas
- ▶ SSP: Shared Socioeconomic Pathway
- ▶ TEEB: The Economics of Ecosystems and Biodiversity
- ▶ TRM: Tasa Representativa del Mercado
- ▶ UNDRR: United Nations Office for Disaster Risk Reduction
- ▶ UNFCCC: United Nations Framework Convention on Climate Change

Agradecimientos

Esta Nota Técnica fue elaborada por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), a través de la División de Soluciones al Cambio Climático, en colaboración con Ingeniar Risk Intelligence. El estudio fue desarrollado por Ingeniar Risk Intelligence, con el equipo conformado por Omar Darío Cardona A., Gabriel Andrés Bernal G., Sthefania Grajales N., Dora Catalina Suárez O., María del Pilar Pérez R. y Diana Marcela González C. en colaboración con el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia.

Se agradece especialmente el trabajo de revisión y retroalimentación técnica realizado por: Mario Salgado (Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres – UNDRR), Mariana Alfonso (CSD/CCS), Lina Barbosa (CSD/BNC), Hori Tsuneki (CSD/DRM) y otros especialistas quienes aportaron valiosos comentarios y sugerencias que enriquecieron el contenido final. Igualmente, se reconoce la colaboración de las entidades y profesionales que facilitaron datos, información técnica y validación de resultados durante el desarrollo del estudio.

Resumen Ejecutivo

Esta Nota Técnica presenta una evaluación integral del riesgo climático en el sector ambiente de Colombia, centrada en biodiversidad, servicios ecosistémicos y recursos hídricos. Emplea un enfoque holístico que combina modelación probabilista de amenazas climáticas (tensionantes como cambio climático y perturbadoras como incendios forestales) con factores de fragilidad ecológica y relevancia estratégica para estimar el riesgo total. Bajo escenarios de alta emisión (SSP5-RCP8.5), hasta el **33 % de los ecosistemas marinos** podría sufrir una pérdida significativa, mientras que las **pérdidas económicas anuales potenciales** se estiman en hasta **8 billones de pesos colombianos¹**, equivalentes al **0,36 % del PIB de 2022**.

Se identifican como zonas críticas los manglares del Pacífico, páramos andinos, arrecifes coralinos y ecosistemas estratégicos de la Orinoquía y Amazonía, donde la combinación de alta vulnerabilidad y exposición exige intervenciones prioritarias. Las medidas de adaptación propuestas se agrupan

en cuatro categorías: **conservación y protección, restauración, uso sostenible de la tierra y los recursos, y educación y concientización**, con acciones específicas frente a incendios de cobertura vegetal optimizando beneficios costo-efectivos. Asimismo, se recomienda establecer un **Sistema Nacional de Monitoreo de Riesgo Climático**, combinado con estrategias de financiamiento híbridas que incluyan bonos verdes y seguros climáticos.

Este estudio demuestra que la adaptación basada en ecosistemas ofrece la mejor relación costo-beneficio y puede reducir hasta en **40 % las pérdidas económicas proyectadas hacia 2100**, al tiempo que promueve resiliencia y desarrollo sostenible.

Palabras clave: Riesgo climático, Servicios ecosistémicos, Fragilidad ecológica, Modelación probabilista, Adaptación basada en ecosistemas, Conservación, Restauración, Incendios forestales, Resiliencia, Monitoreo climático.

¹ El estudio fue realizado en mayo de 2022. Durante este mes, el valor promedio del dólar estadounidense (USD) frente al peso colombiano (COP) fue de 3.981,57 COP por USD (Fuente: Banco de la República de Colombia).

Abstract

This Technical Note presents a comprehensive climate risk assessment for Colombia's environmental sector, focusing on biodiversity, ecosystem services, and water resources. It applies a holistic approach that combines probabilistic modelling of climate-related threats (both stressors such as climate change and disturbances such as wildfires) with ecological fragility and strategic relevance to estimate total risk. Under high-emission scenarios (SSP5-RCP8.5), up to **33% of marine ecosystems** could experience significant loss, while **annual potential economic losses** are estimated at **COP 8 trillion**, equivalent to **0.36% of Colombia's 2022 GDP**.

Critical hotspots include Pacific mangroves, Andean páramos, coral reefs, and strategic ecosystems in the Orinoquía and Amazon regions, where the combination of high vulnerability and exposure demands priority interventions. Proposed adaptation measures fall into four main categories: **conservation and protection, restoration, sustainable**

land and resource use, and education and awareness, with targeted actions for vegetation-cover fires designed to maximize cost-effectiveness. The report also recommends establishing a **National Climate Risk Monitoring System**, supported by hybrid financing strategies that include green bonds and climate insurance.

The study demonstrates that ecosystem-based adaptation offers the highest cost-effectiveness, potentially reducing projected economic losses by up to **40% by 2100**, while fostering resilience and sustainable development.

Keywords: Climate risk, ecosystem services, ecological fragility, probabilistic modelling, ecosystem-based adaptation, conservation, restoration, wildfires, resilience, climate monitoring



1

Introducción

La gestión del cambio climático constituye una prioridad estratégica en la agenda nacional de Colombia, situando al sector ambiente como un actor central en la definición e implementación de acciones de adaptación, la protección de la biodiversidad y la sostenibilidad de los servicios ecosistémicos. El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MinAmbiente), por medio de la Dirección de Cambio Climático y Gestión del Riesgo (DCCGR), lidera la consolidación de políticas, estrategias y acciones orientadas a fortalecer la resiliencia del territorio colombiano frente a los crecientes desafíos climáticos.

El marco normativo e institucional vigente está conformado por instrumentos como el Sistema Nacional de Cambio Climático (SISCLIMA), la Política Nacional de Cambio Climático (PNCC, 2017), la Ley 1931 de 2018, La ley de acción climática 2169 de 2021, el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC) y la Ley 1844 de 2017 que aprueba el Acuerdo de París, así como por la actualización de la NDC al 2030 y la Estrategia Climática de Largo Plazo (E2050). Estos instrumentos proporcionan las bases legales y estratégicas para la integración de la gestión del riesgo climático en la toma de decisiones sectoriales, territoriales y comunitarias.

En este contexto, el análisis de riesgo climático para el sector ambiente resulta esencial para identificar y priorizar amenazas, vulnerabilidades y elementos expuestos críticos, facilitando la formulación de políticas y la articulación de acciones institucionales y territoriales. A pesar de que tradicionalmente

la adaptación al cambio climático ha estado orientada principalmente a los sectores productivos, la creciente evidencia sobre los impactos en la biodiversidad, el recurso hídrico y los servicios ecosistémicos resalta la urgencia de fortalecer el enfoque ambiental y ecosistémico.

Esta nota técnica, responde a la necesidad de contar con un diagnóstico actualizado y robusto del riesgo climático en el sector ambiente en Colombia, integrando enfoques metodológicos innovadores como la modelación probabilista bajo escenarios climáticos internacionales (IPCC AR6), la valoración económica de servicios ecosistémicos, el análisis multiescalar y multiamenaza, y la incorporación de la incertidumbre profunda en la toma de decisiones. El estudio se elaboró mediante un proceso participativo y consultivo, involucrando a instituciones nacionales como el MinAmbiente, el IDEAM, los institutos de investigación ambiental, Parques Nacionales Naturales de Colombia y las 33 Corporaciones Autónomas Regionales y de Desarrollo Sostenible (CAR), así como a entidades territoriales, nodos regionales de cambio climático y representantes de comunidades locales, sociedad civil y academia.

El presente documento constituye un insumo clave para la toma de decisiones informada, la actualización y focalización de instrumentos de política pública y la articulación interinstitucional, contribuyendo al fortalecimiento de la resiliencia y la adaptación del sector ambiente colombiano frente al cambio climático



2 Objetivo y alcance

El objetivo general de esta nota técnica es presentar la metodología y resultados de la evaluación el riesgo climático en el sector ambiente colombiano, donde se han cuantificado amenazas, vulnerabilidades y potenciales impactos sobre los ecosistemas, los servicios ecosistémicos y los recursos hídricos, y donde a partir de los resultados se proponen medidas estratégicas de adaptación al cambio climático y de fortalecimiento de la gobernanza ambiental.

El enfoque adoptado reconoce que la adaptación efectiva del sector ambiente requiere información técnica de calidad que articule el conocimiento climático, ecológico e institucional. En ese sentido, este estudio incorpora elementos clave para integrar la biodiversidad, los servicios ecosistémicos y el recurso hídrico en la toma de decisiones, bajo un modelo de evaluación del riesgo que combina cambio climático como tensionante de largo plazo e incendios forestales como perturbación antrópica recurrente.

Para el desarrollo del análisis, se definieron tres componentes principales de delimitación sectorial:

Actores institucionales

Se identificaron los actores clave en dos categorías funcionales:

- **Proveedores de información e insumos técnicos:** incluyen entidades del SINA como el IDEAM, el Instituto Humboldt, el SINCHI, el IAvH, INVEMAR, Parques Nacionales Naturales de Colombia (PNNC) y las 33 Corporaciones Autónomas Regionales y de Desarrollo Sostenible (CAR), que proveen datos esenciales sobre clima, ecosistemas y recursos naturales.
- **Usuarios de los resultados de la modelación:** clasificados en:
 - ▶ **Usuarios directos,** como CAR, PNNC, y los institutos de investigación, que pueden aplicar los resultados en sus instrumentos de planificación y proyectos.

- ▶ **Tomadores de decisiones directos,** como MinAmbiente y otras entidades rectoras del SISCLIMA y el SNGRD, que pueden incorporar esta información en políticas, estrategias y planes nacionales.
- ▶ **Tomadores de decisiones indirectos,** como alcaldías, gobernaciones, y otros sectores afines que reciben lineamientos para incorporar la gestión del riesgo climático en sus competencias.

Unidades de análisis territoriales

Con el objetivo de garantizar la aplicabilidad institucional de los resultados, se definieron cuatro conjuntos de unidades de análisis sobre los cuales se agregan los resultados de riesgo climático:

- **Jurisdicción de las 33 CAR:** permite la lectura a escala regional, considerando su papel legal en la administración del ambiente y los recursos naturales renovables, así como su responsabilidad en la implementación de los PIGCC territoriales y los Planes de Gestión Ambiental Regional (PGAR).
- **Departamentos y Distrito Capital (32 + 1):** esta unidad político-administrativa posibilita la visualización de las métricas de riesgo desde una perspectiva institucional, fortaleciendo la articulación entre entidades del orden nacional y subnacional. A su vez, facilita la integración de los resultados en los PIGCC territoriales, los Planes Departamentales de Gestión del Riesgo de Desastres (PDGRD) y la labor de los Nodos Regionales de Cambio Climático.
- **Áreas protegidas:** en estas zonas se concentra gran parte de la biodiversidad y servicios ecosistémicos del país, así como los mayores esfuerzos de conservación. Bajo el liderazgo del PNNC, estas unidades incluyen categorías como el Sistema de Parques Nacionales, Reservas Forestales Protectoras, Parques Nacionales Regionales, Distritos de Manejo Integrado, Distritos de

Conservación de Suelos, Áreas de Recreación y Reservas Naturales de la Sociedad Civil. La desagregación por categoría permite articular los resultados de riesgo con los planes de manejo de cada área, beneficiando a actores como el PNNC, las CAR, los institutos de investigación (IAvH, IIPA, SINCHI, INVEMAR) y las autoridades locales.

■ **Subzonas hidrográficas (394 unidades):** representan espacios funcionales para la gestión del recurso hídrico, y son clave para integrar los resultados en Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCAS) y en futuras actualizaciones del Estudio Nacional del Agua (ENA).





3

Síntesis metodológica

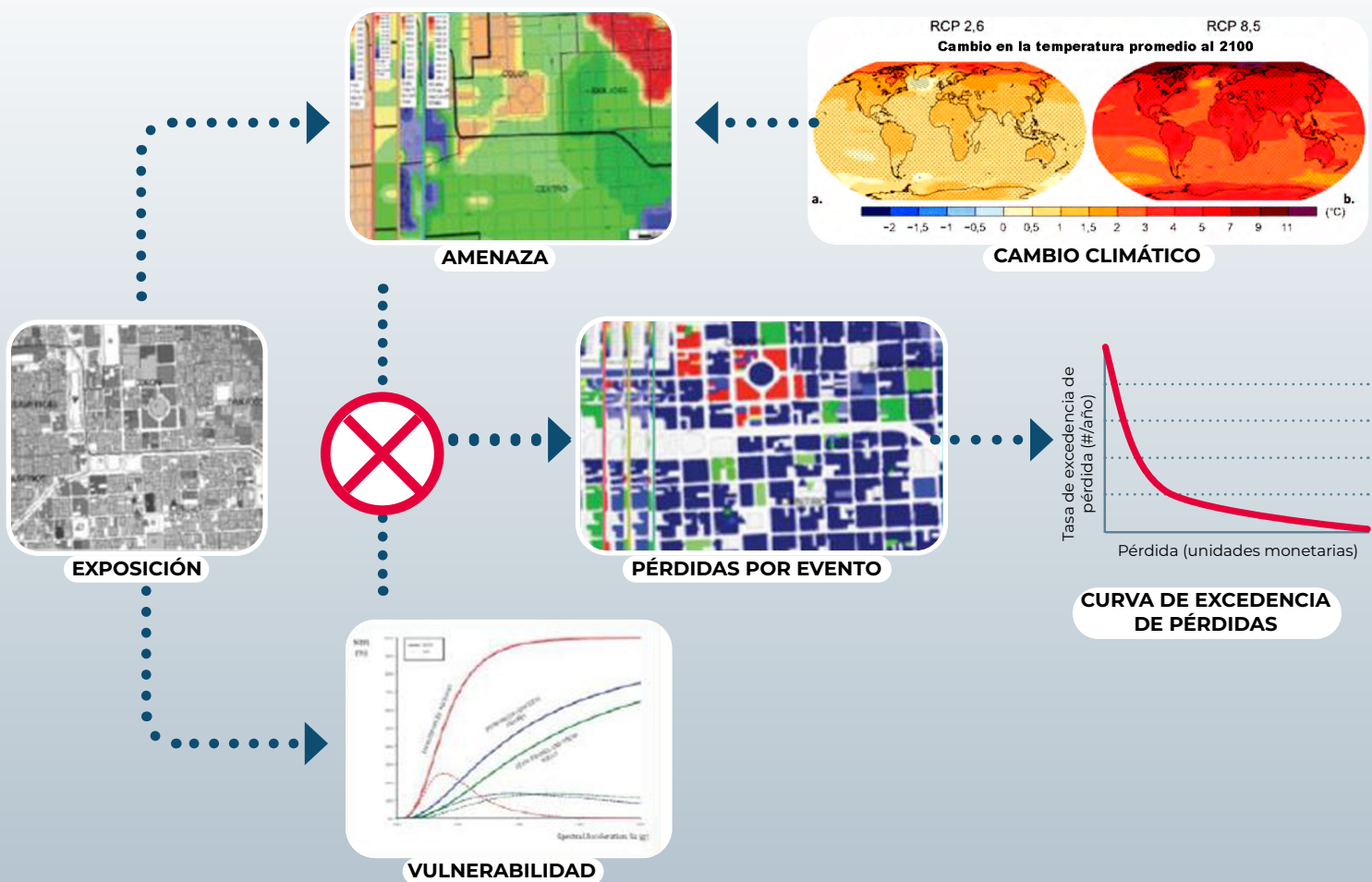
Marco conceptual para la evaluación del riesgo climático

La evaluación del riesgo climático aplicada en este estudio sigue un marco conceptual robusto que muestra la Figura 1 basado en la combinación de métodos probabilistas con enfoques integrados de análisis de amenazas, exposición y vulnerabilidad, en coherencia con los estándares internacionales del IPCC AR6 y UNDRR, y con el marco normativo nacional (SISCLIMA, PNCC, Ley 1931, PNACC, Estrategia 2050, NDC).

En este marco, se diferencia entre:

- ▶ **Amenazas tensionantes o crónicas:** Procesos continuos, progresivos y acumulativos derivados de cambios permanentes en las condiciones climáticas promedio (ej. incrementos de temperatura, variaciones de precipitación, acidificación), que inducen transiciones ecosistémicas a largo plazo y potencial desplazamiento de zonas de vida.
- ▶ **Amenazas perturbadoras o episódicas:** Eventos súbitos, generalmente intensos y de origen antrópico, como incendios forestales, que generan alteraciones inmediatas y severas sobre biodiversidad, estructura del suelo y procesos hidrológicos locales.

Figura 1 Componentes de la modelación del riesgo y su interrelación



Modelación probabilista de la amenaza climática

La modelación de la amenaza climática parte de los escenarios representativos del IPCC AR6 (SSP2-4.5 y SSP5-8.5), adaptados para Colombia mediante procesos de reducción estadística de escala (*downscaling*) y validación cruzada con datos del IDEAM, bases CHIRPS, ERA5 y productos satelitales. Se modelaron variables clave como la precipitación, temperatura media y extrema, evapotranspiración potencial, pH del suelo, nivel del mar y temperatura superficial marina, con alta resolución espacial (hasta de 1 km en áreas críticas) y escalas temporales diarias y mensuales. La selección de variables respondió a un proceso técnico que combinó tres criterios principales: (i) la sensibilidad y respuesta documentada de los ecosistemas colombianos frente a dichas variables, considerando evidencia científica nacional e internacional; (ii) la disponibilidad y calidad de series históricas y proyecciones climáticas de alta resolución, que permitieran modelaciones robustas; y (iii) la relevancia en términos de impacto esperado sobre la estructura, función y servicios ecosistémicos.

La modelación de la amenaza se fundamenta en la construcción de series históricas y estocásticas de actividad climática, a partir de registros observados entre 1980 y 2010 (definido como clima base).² Esto permite generar colecciones de eventos extremos, representativos del comportamiento climático nacional, incluyendo eventos no necesariamente ocurridos en el pasado pero plausibles bajo las condiciones observadas y proyectadas. La amenaza se representa entonces como un conjunto de eventos simulados bajo un modelo estocástico, colectivamente exhaustivos y mutuamente excluyentes, cuya frecuencia se modela según leyes de recurrencia natural. Este enfoque permite describir la amenaza

como la probabilidad de ocurrencia de eventos climáticos de diversa magnitud, intensidad y duración.

Las amenazas modeladas para el sector ambiente se asocian principalmente a la capacidad de los fenómenos climáticos para inducir cambios permanentes en los ecosistemas, alterando su equilibrio y generando afectaciones que pueden ser irreversibles. Se distinguen dos grandes categorías de impulsores de cambio: los tensionantes y las perturbaciones. Los tensionantes corresponden a condiciones de largo plazo, como el cambio climático, que inducen transformaciones persistentes en los ecosistemas (por ejemplo, transición fuera de su zona de vida, Cardona et al., 2023). Las pérdidas económicas asociadas a estas transiciones se cuantifican mediante métricas probabilistas (por ejemplo, Pérdida Esperada Anual –PEA–, Pérdida Máxima Probable –PMP– y distribución de pérdidas por periodos de retorno), propias de la modelación de riesgo catastrófico.

Las perturbaciones corresponden a eventos individuales y localizados, de corta duración, pero alta intensidad, que pueden modificar la estructura y funcionalidad de los ecosistemas. Entre estas, los incendios forestales constituyen la principal amenaza perturbadora, evaluada a partir del potencial de ocurrencia, propagación y extinción de miles de eventos simulados con base en variables climáticas históricas y proyecciones futuras, incorporando la influencia del cambio climático (Scott et al., 2001).

La modelación integra la interacción de variables meteorológicas clave —precipitación, temperatura del aire, evapotranspiración, viento y biotemperatura— que, en conjunto, pueden generar condiciones favorables para la ocurrencia de perturbaciones. En el caso de ecosistemas marinos, se incluyen la temperatura superficial del mar, el nivel del mar y el

2 El año 2010 se adoptó como año de corte debido a que corresponde al cierre de la década con información climática, socioeconómica y ecosistémica completa y homogénea, utilizada como línea base en el análisis. Este año coincide además con la disponibilidad de insumos validados en el marco de inventarios nacionales y bases de datos internacionales, facilitando la comparación y consistencia metodológica con estudios previos.

pH, factores que inciden directamente en su salud y resiliencia, y cuyo cambio sostenido puede inducir transiciones entre zonas de vida con impactos significativos en la funcionalidad ecosistémica. La simulación de variables meteorológicas utiliza registros históricos como insumo para construir series de múltiples realizaciones, reflejando la variabilidad climática bajo el clima base (1980-2010).

Posteriormente, estas series se ajustan mediante proyecciones de modelos climáticos globales, integrando el efecto del cambio climático. Para la evaluación de riesgos por tensionantes, se priorizan variables como la precipitación anual, biotemperatura

media anual y pH superficial oceánico; mientras que, para perturbaciones como incendios, se simulan precipitación diaria, temperaturas máximas y mínimas diarias, y viento (dirección y velocidad) a escala horaria. La Tabla 1 muestra las variables meteorológicas simuladas, su escala de simulación y su uso en la evaluación de riesgo por tensionantes y perturbaciones.

La información se obtiene de fuentes observacionales y de teledetección, como las descritas abajo, priorizando la uniformidad espacial y temporal en todo el territorio nacional. Las series históricas se comparan y ajustan con datos de estaciones in situ y pruebas estadísticas para asegurar su representatividad.

Tabla 1 Variables meteorológicas para simular.

Variable	Escala de simulación	Escala requerida	
		Tensionante	Perturbación
Precipitación	Diaria	Anual	Diaria
Temperatura	Diaria	Anual	Diaria
Viento	Horaria	-	Horaria
Temperatura del mar	Diaria	Anual	-
pH	Mensual	Anual	-
Nivel del mar	Diaria	Anual	-
Volumen de agua en cuencas y afluentes	Mensual	Anual	-

Para cada una de las variables meteorológicas seleccionadas para la simulación se emplean métodos particulares descritos a continuación:

- ▶ **Precipitación:** Se emplea la base de datos CHIRPS, que proporciona registros diarios desde 1981, combinando datos satelitales y de estaciones terrestres, con una resolución espacial de $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ (~5.5 km). Se utilizaron los mapas de precipitación anual y de máxima diaria para la evaluación de patrones espaciales y temporales, insumo fundamental en la

modelación de las amenazas climáticas tensionantes y perturbadoras.

- ▶ **Temperatura del aire:** Utiliza el conjunto de datos de la Universidad de Princeton, que integra registros diarios de temperatura en mallas de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$. Se aplica corrección por altitud mediante la metodología de Daly et al. (2002, 2008).
- ▶ **Evapotranspiración potencial:** Calculada con el método de Penman-Monteith, usando varia-

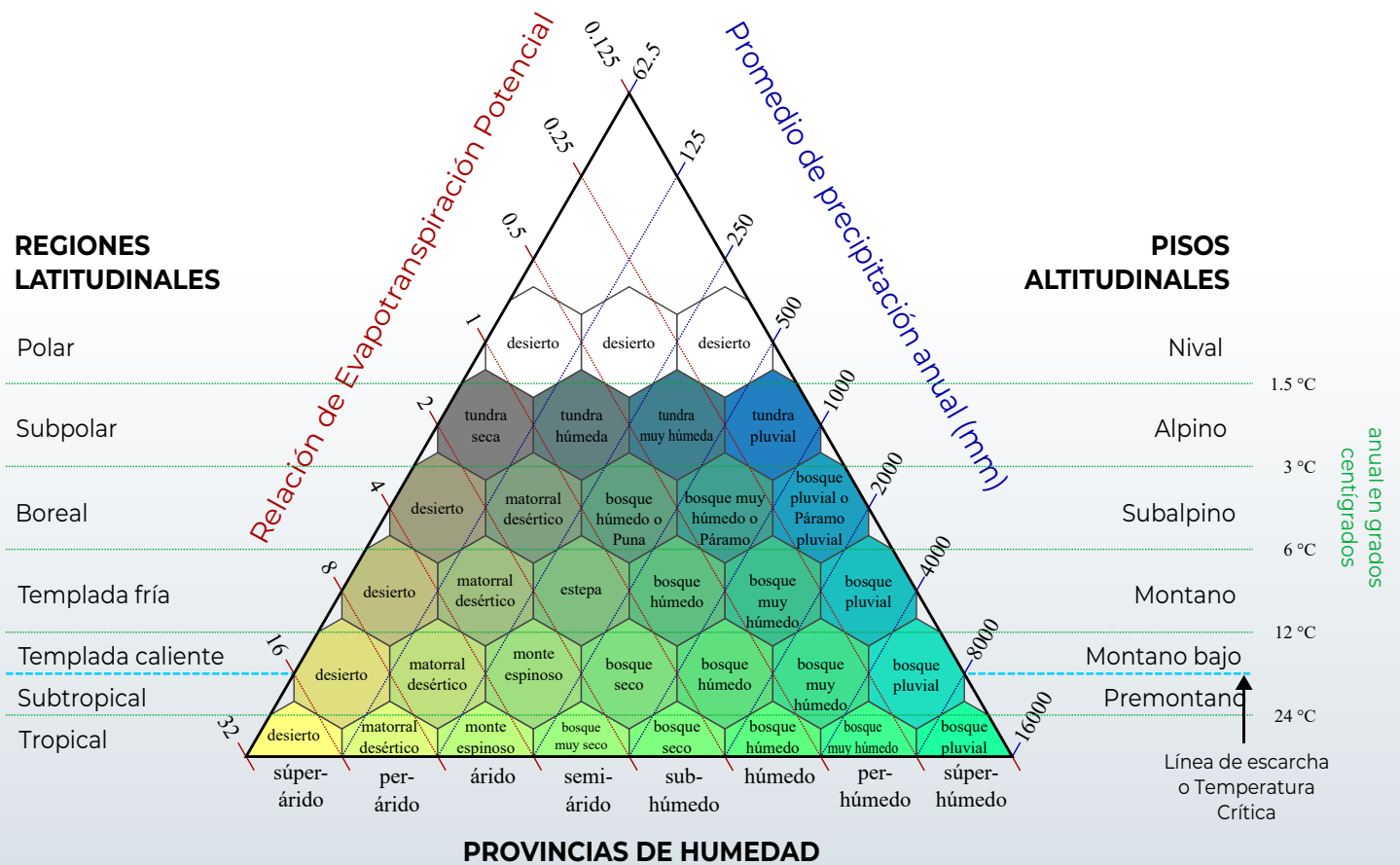
bles del conjunto de datos de Princeton y un promedio multianual (1981-2010).

- ▶ **Viento:** Campos horarios simulados a partir de ERA5 de Copernicus, con registros desde 1959, en malla de 0.25°.
- ▶ **Bioperatura:** Calculada a partir de las temperaturas medias mensuales, corrigiendo extremos según Holdridge.
- ▶ **Temperatura superficial del mar y nivel del mar:** Datos mensuales y diarios de Copernicus, con mallas de alta resolución.
- ▶ **pH del océano:** Tomado de la base NOAA/NCEI (Jiang et al., 2019), con resolución de 1°x1°, promediado para el análisis decadal.

Identificación y caracterización de los elementos expuestos

La identificación y caracterización de elementos expuestos se realizó integrando la clasificación nacional oficial de ecosistemas —incluyendo las zonas de vida de Holdridge, así como ambientes marinos, costeros y continentales— con información georreferenciada suministrada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), el Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, el Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (INVEMAR), el Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas (SINCHI) y Parques Nacionales Naturales de Colombia.

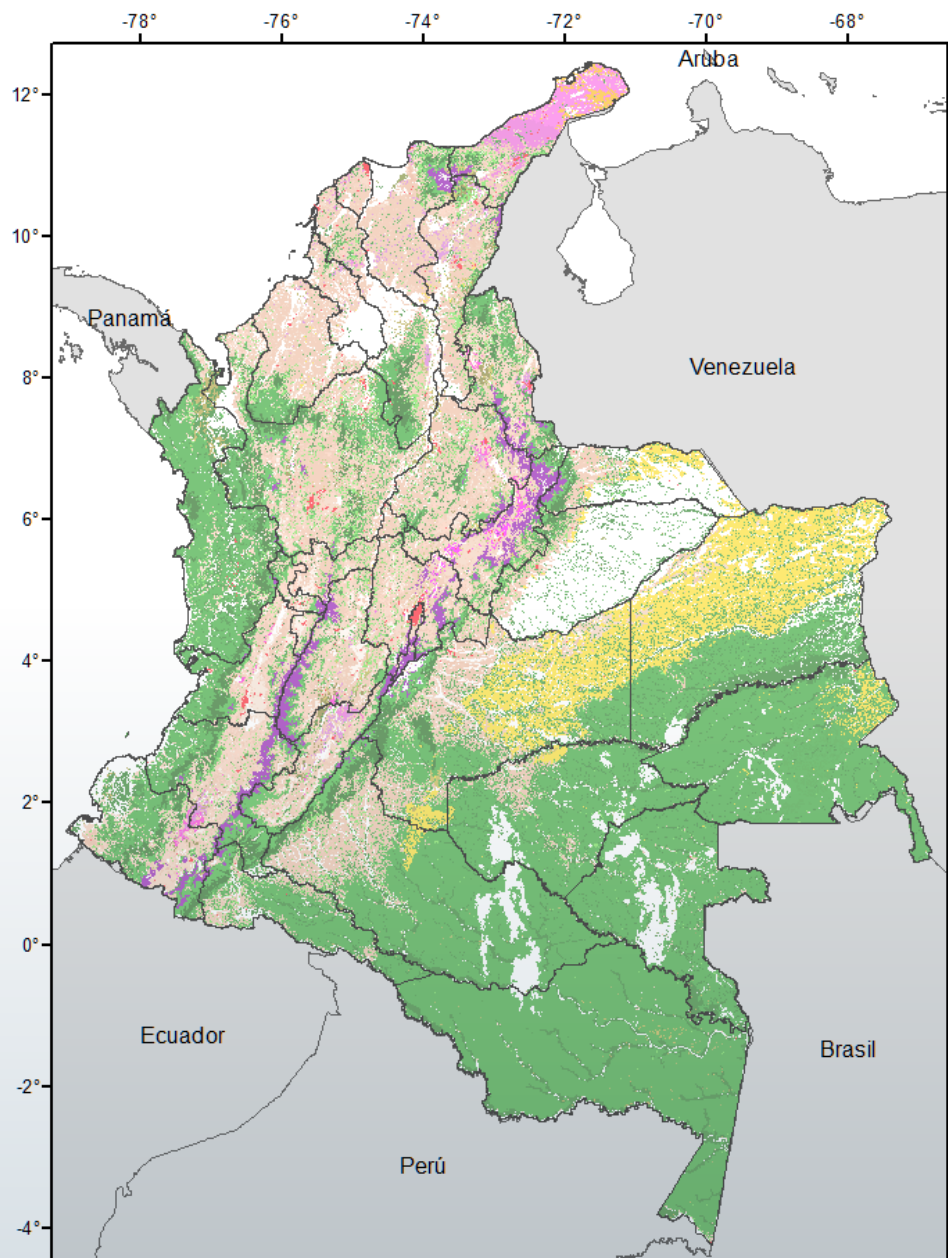
Figura 2 Diagrama de zonas de vida de Holdridge (1967).



El criterio de clasificación de estas zonas de vida se basó en Holdridge (1967), el cual define de forma cuantitativa la relación que existe entre el clima y la vegetación. El sistema de zonas de vida de Holdridge se puede resumir como se presenta en la Figura 2, donde cada ecosistema del país pertenece a una zona de vida específica. Dicha zona de vida está definida por unos límites dados por la clasificación de Holdridge, en términos de la precipitación anual, la relación de evapotranspiración potencial y la biotemperatura.

Cada ecosistema se analiza en términos de sensibilidad y capacidad de adaptación, sumando atributos de conectividad, fragmentación y presión antrópica. Además, se consideran servicios ecosistémicos (provisión, regulación y culturales) valorados mediante transferencia de beneficios y funciones ecosistémicas, cuantificando tanto el valor económico (COP/ha/año) como funcional de las pérdidas esperadas (Figura 3).

Figura 3 Ecosistemas terrestres continentales de Colombia (IDEAM, 2017).



Para el recurso hídrico, se aplican modelos hidrológicos de balance de oferta y demanda, calibrados con datos de subzonas hidrográficas nacionales y regionales. La evaluación incluye vulnerabilidad ecológica y social, priorizando territorios y poblaciones con menor capacidad adaptativa, y se aplica en cuatro unidades de análisis: CAR, departamentos, subzonas hidrográficas y áreas protegidas.

Valoración económica de servicios ecosistémicos

Para la evaluación probabilista del riesgo climático en el sector ambiente, resulta fundamental la valoración económica de las unidades ecosistémicas. Dado que el valor de los ecosistemas no puede ser plenamente capturado por los mercados, ni cuantificado únicamente en términos de área o producción, se hace necesario valorar los servicios ecosistémicos asociados a cada ecosistema. Este enfoque permite cuantificar, de manera más realista, las pérdidas generadas por los impulsores de cambio, ya sean de corto o largo plazo.

Desde la perspectiva sectorial, el riesgo climático se concibe como las consecuencias económicas, sociales y ambientales derivadas de la acción de los impulsores de cambio sobre los ecosistemas. Para estimar las pérdidas asociadas tanto a la transición de los ecosistemas fuera de su zona de vida (colapso ecosistémico) como a la ocurrencia de incendios de cobertura vegetal, es necesario asignar un valor monetario a los servicios ecosistémicos de cada tipo de ecosistema. Dicho valor se puede interpretar como el costo de reemplazar los servicios que dejarían de proveerse, o bien como el monto necesario para compensar sus impactos en la sociedad y la economía (Costanza et al., 1997; 2014).

Referentes internacionales como Costanza et al. (1997, 2014) y de Groot et al. (2012) han estimado el valor monetario de los servicios ecosistémicos para diferentes biomas y ecosistemas, apoyándo-

se en la Base de Datos de Valoración de Servicios Ecosistémicos (ESVD). Esta base reúne información estandarizada en unidades monetarias y espaciales comparables, como dólares internacionales por hectárea por año (Int \$/ha/año), lo que facilita la comparación y agregación entre ecosistemas y regiones. Si bien estos valores no son específicos para Colombia, en este análisis se realizó una adaptación metodológica para su aplicación en el contexto nacional, ajustando las estimaciones a las características ecológicas y socioeconómicas del país. Es importante señalar que dentro de cada bioma principal se agrupan diversos ecosistemas según sus características ecológicas, por lo que la valoración no debe limitarse al nombre del bioma, sino considerar la diversidad de ecosistemas que abarca. Por ejemplo, el bioma de bosques tropicales incluye tanto bosques húmedos como bosques caducifolios, y el bioma de bosques templados agrupa diferentes tipos de bosques de latitudes medias y boreales (Groot et al., 2012).

Para el caso de Colombia, la valoración de los servicios ecosistémicos se realizó mediante el método de transferencia de beneficios, utilizando los valores monetarios reportados en estudios internacionales y ajustándolos por inflación y tasa de cambio promedio al año 2021 (UN et al., 2005). Los valores anuales por hectárea de los servicios ecosistémicos para bosques, herbazales, arbustales y otras unidades se obtuvieron principalmente de los cálculos de Groot et al. (2012) y Costanza et al. (1997; 2014). Las Tablas 3 a 6 muestran el valor promedio anual (COP/ha/año) para las distintas categorías ecosistémicas analizadas.

Cabe destacar que, aunque los ecosistemas marinos representan solo el 0,4 % del área del país, sus servicios ecosistémicos son proporcionalmente los de mayor valor económico. Esto evidencia su importancia estratégica y la necesidad de priorizar su conservación. Los valores de referencia para ecosistemas terrestres se presentan en la Tabla 2, para los ecosistemas marinos en la Tabla 3, y para los ecosistemas costeros en la Tabla 4.

Tabla 2 Zonas de vida asociadas a los ecosistemas terrestres colombianos y la valoración de sus servicios ecosistémicos.

Zona de Vida	Ecosistema general	Área (ha)	Promedio de Valor Servicio Ecosistémico (COP/ha/año)
Bosque húmedo	Agroecosistema	14 241 432	24 402 532
	Arbustal	329 377	15 323 711
	Bosque	42 942 413	51 215 663
	Bosque fragmentado	1 216 844	50 795 981
	Glaciares y nivales	336	92 347 556
	Herbazal	514 936	27 704 267
	Sabana	11 151 344	27 704 267
	Subxerofitia	363 765	15 323 711
	Transicional transformado	3 014 302	33 863 987
	Turbera	12 685	247 823 399
	Vegetación secundaria	1 759 585	15 323 711
	Xerofitia	59 656	20 431 615
Bosque muy húmedo	Agroecosistema	6 011 666	25 566 322
	Arbustal	125 912	15 323 711
	Bosque	8 338 112	50 892 068
	Bosque fragmentado	1 052 428	50 795 981
	Glaciares y nivales	40 792	92 347 556
	Herbazal	203 545	27 704 267
	Sabana	4 639	27 704 267
	Subxerofitia	9 985	15 323 711
	Transicional transformado	681 336	33 863 987
	Turbera	5 546	247 823 399
	Vegetación secundaria	1 081 891	15 323 711

Zona de Vida	Ecosistema general	Área (ha)	Promedio de Valor Servicio Ecosistémico (COP/ha/año)
Bosque muy seco	Agroecosistema	98 656	26 418 713
	Arbustal	3 186	15 323 711
	Bosque	21 765	62 958 398
	Bosque fragmentado	6 191	50 795 981
	Desierto	306	15 323 711
	Subxerofitia	6 543	15 323 711
	Transicional transformado	6 929	33 863 987
	Vegetación secundaria	8 046	15 323 711
	Xerofitia	87 510	20 431 615
Bosque pluvial	Agroecosistema	283 635	27 211 239
	Arbustal	5 290	15 323 711
	Bosque	1 291 340	50 795 981
	Bosque fragmentado	104 275	50 795 981
	Glaciares y nivales	9 037	92 347 556
	Herbazal	375	27 704 267
	Transicional transformado	39 540	33 863 987
	Vegetación secundaria	100 769	15 323 711
Bosque seco	Agroecosistema	5 464 772	24 854 075
	Arbustal	106 342	15 323 711
	Bosque	333 529	60 264 927
	Bosque fragmentado	136 663	50 795 981
	Desierto	7 271	15 323 711
	Herbazal	45 831	27 704 267
	Sabana	682 253	27 704 267
	Subxerofitia	383 040	15 323 711
	Transicional transformado	747 508	33 863 987
	Turbera	841	247 823 399
	Vegetación secundaria	343 842	15 323 711
	Xerofitia	292 073	20 431 615

Zona de Vida	Ecosistema general	Área (ha)	Promedio de Valor Servicio Ecosistémico (COP/ha/año)
Desierto	Agroecosistema	2 823	31 477 296
	Arbustal	195	15 323 711
	Bosque	4 091	64 341 575
	Subxerofitia	2 391	15 323 711
	Transicional transformado	36	33 863 987
	Xerofitia	1 189	20 431 615
Matorral desértico	Agroecosistema	1 954	32 161 917
	Arbustal	833	15 323 711
	Bosque	2 609	52 489 180
	Bosque fragmentado	210	50 795 981
	Desierto	7 329	15 323 711
	Vegetación secundaria	586	15 323 711
	Xerofitia	5 631	20 431 615
Monte espinoso	Agroecosistema	40 383	34 503 413
	Arbustal	240	15 323 711
	Bosque	8 945	62 340 522
	Bosque fragmentado	7 999	50 795 981
	Desierto	194 439	15 323 711
	Herbazal	62	27 704 267
	Subxerofitia	757	15 323 711
	Transicional transformado	1 980	33 863 987
	Vegetación secundaria	861	15 323 711
	Xerofitia	511 573	20 431 615
Páramo	Paramo	2 254 444	92 347 556

Tabla 3 Zonas de vida asociadas a los ecosistemas marinos y la valoración de sus servicios ecosistémicos.

Ecosistema general	Ecosistema	Área (ha)	Valor (COP/ha/año)
Coralino	Coralino continental	30 602	2 270 347 452
	Coralino oceánico	316 307	2 270 347 452
Fondos blandos	Fondos blandos	827	186 026 769
	Fondos blandos con vegetación no vascular	51 318	186 026 769
Fondos duros no coralinos	Fondos duros con vegetación no vascular	125	186 026 769
	Fondos duros no coralinos	1 579	186 026 769
Pradera de pastos marinos	Pradera de pastos marinos	70 654	186 026 769

Tabla 4 . Zonas de vida asociadas a los ecosistemas costeros y la valoración de sus servicios ecosistémicos.

Ecosistema general	Ecosistema	Área (ha)	Valor Servicio Ecosistémico (COP/ha/año)
Bosque	Manglar	4 230	247 823 399
	Manglar de aguas marinas	392	1 870 544 615
	Manglar de aguas mixohalinas	291 325	1 870 544 615
Playas	Playas costeras	7 720	186 026 769
Zona pantanosa	Zona pantanosa andina	2 331	247 823 399
	Zona pantanosa basal	753 939	247 823 399
	Zona pantanosa subandina	531	247 823 399
	Zonas pantanosas costeras	44 030	1 870 544 615
	Zonas pantanosas salinas	15 471	1 870 544 615
Zonas arenosas naturales	Zonas arenosas naturales	1 986	15 323 711
Llanura mareal	Llanura mareal	353	247 823 399

La valoración total anual de los servicios ecosistémicos estimada para Colombia asciende a aproximadamente **COP 538 billones**, lo que equivale a cerca del **37 % del PIB nacional de 2022**. De este total, los ecosistemas terrestres representan el componente más alto (**COP 506 billones**, 35 % del PIB), seguidos por los costeros (**COP 20 billones**, 1,39 %) y los marinos (**COP 11,85 billones**, 0,82 %). Estas cifras dimensionan la magnitud del aporte que realizan los ecosistemas a la economía nacional y evidencian que, aunque algunos de ellos ocupan áreas relativamente pequeñas —como arrecifes coralinos o manglares—, su valor económico por hectárea es sustancialmente mayor que el promedio, reforzando la necesidad de su conservación prioritaria.

Quantificación probabilista del riesgo climático

La cuantificación del riesgo climático para el sector ambiente colombiano se fundamenta en la aplicación rigurosa de métodos estadístico-matemáticos avanzados y de herramientas probabilistas. Estas técnicas permiten estimar tanto la probabilidad de ocurrencia como la magnitud y la distribución espacial y temporal de los impactos derivados del cambio climático, bajo diferentes escenarios futuros. Este enfoque es coherente con los estándares internacionales, como los establecidos por el IPCC (2022), y responde a las necesidades concretas de la gestión sectorial y territorial en Colombia.

El proceso inicia integrando los resultados de la modelación climática y la caracterización de amenazas sobre los elementos expuestos. Para cada variable relevante —precipitación, temperatura, pH, nivel del mar, entre otras— y para cada unidad de análisis —departamentos, regiones, subzonas hidrográficas, áreas protegidas— se generan escenarios estocásticos de eventos extremos y trayectorias de cambio a mediano y largo plazo (horizontes 2050 y 2100).

A través de simulaciones Monte Carlo y técnicas de modelación de riesgo catastrófico, se calcula la probabilidad anual de que un ecosistema experimente una transición fuera de su zona de vida (co-

lapso ecológico) o de que un evento perturbador, como un incendio forestal, cause alteraciones significativas en la prestación de servicios ecosistémicos. Cada evento es caracterizado por su frecuencia y severidad, lo que permite construir distribuciones de impacto para cada uno de los escenarios climáticos modelados.

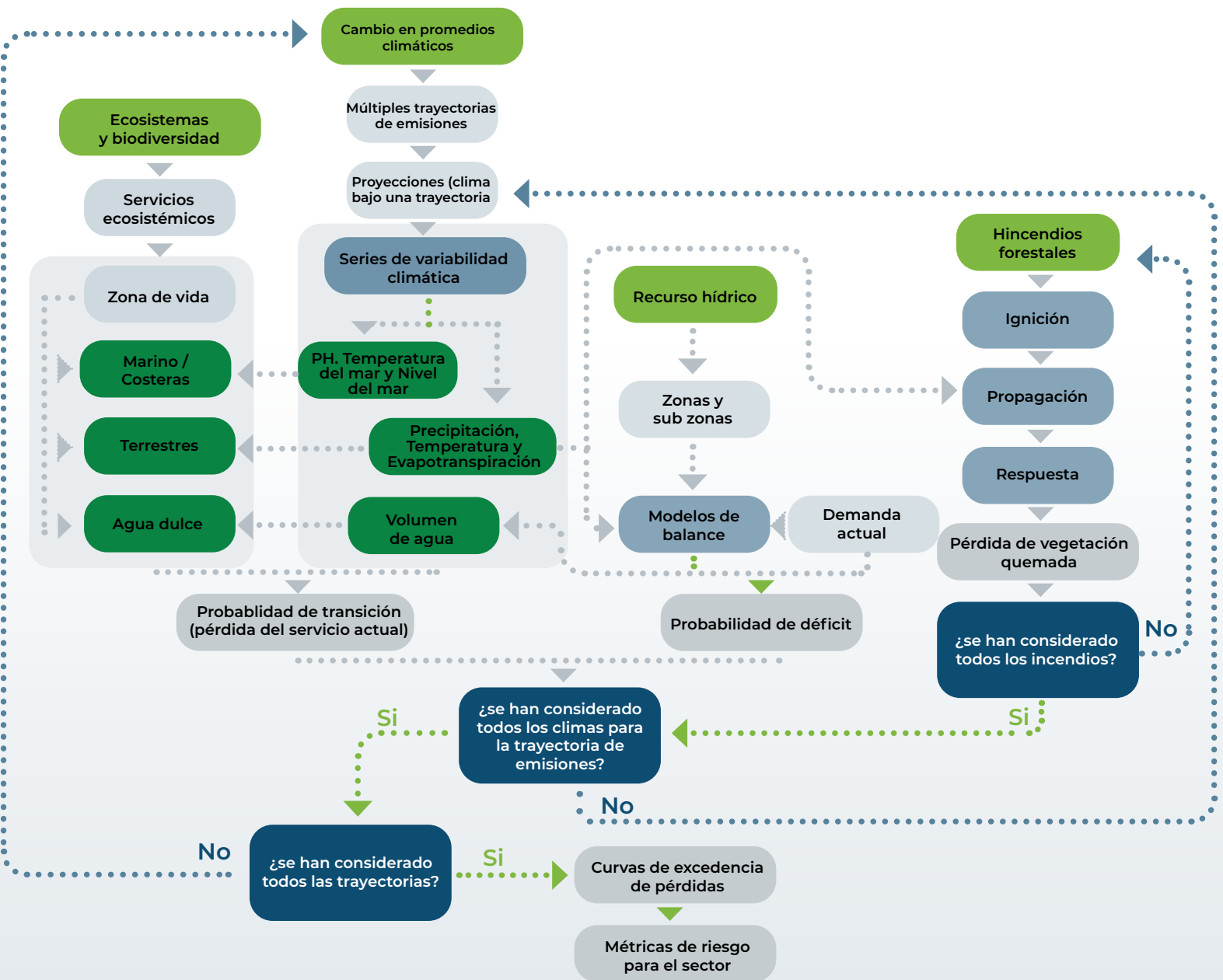
Los resultados se presentan en términos de **mapas de riesgo probabilístico** —expresados como probabilidad de exceder un umbral de pérdida económica (COP/ha/año)— y **curvas de excedencia de pérdidas económicas**, lo que permite visualizar tanto los territorios y ecosistemas más vulnerables como el rango y la magnitud de impactos potenciales para cada región. La métrica central corresponde a la **probabilidad de pérdida anual esperada y la pérdida máxima probable (PML)**, calculadas mediante simulaciones estocásticas. Bajo escenarios climáticos de altas emisiones (SSP5-8.5), se identifican regiones con probabilidades superiores al 50 % de transformación ecosistémica antes de 2100 y con pérdidas económicas anuales potencialmente muy altas si no se implementan medidas de adaptación al cambio climático. Este enfoque probabilista también facilita el cálculo del riesgo residual bajo diferentes estrategias de adaptación al cambio climático, permitiendo evaluar cómo las intervenciones propuestas podrían reducir la frecuencia y magnitud de las pérdidas en el tiempo. De esta manera, es posible priorizar territorios y ecosistemas, optimizar la asignación de recursos públicos, y establecer umbrales de intervención eficiente con base en análisis beneficio-costos.

El método incorpora, además, análisis bajo incertidumbre profunda, mediante la comparación de resultados entre distintos modelos climáticos y **trayectorias socioeconómicas** (pathways), así como la validación de resultados a través de la consulta a expertos y procesos participativos regionales. Esto refuerza la robustez y aplicabilidad de los resultados y facilita su integración en la planificación sectorial y la formulación de política pública. En síntesis, la cuantificación probabilista del riesgo climático pro-

porciona una base científica y operativa sólida para la toma de decisiones informada, permitiendo comparar alternativas de adaptación, anticipar posibles puntos de inflexión ecológica y focalizar la gestión

ambiental en los territorios y ecosistemas más vulnerables frente a los efectos adversos del cambio climático (Figura 4).

Figura 4 Metodología de evaluación probabilista del riesgo por cambio climático en el sector ambiente.



Modelación de riesgo por tensión climática:

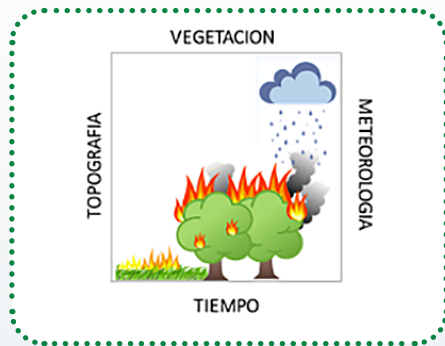
Se emplearon modelos de permanencia y transición ecosistémica basados en los umbrales de tolerancia de cada zona de vida (según Holdridge), modelando el desplazamiento de ecosistemas ante variaciones sostenidas en temperatura, precipitación y evapotranspiración. Las simulaciones incluyeron miles de trayectorias generadas de manera estocástica para cada combinación de ecosistema y unidad territorial. La probabilidad de transición fuera de la zona de vida se calculó para cada horizonte temporal y escenario climático, generando mapas de “probabilidad de transformación ecosistémica” y curvas de frecuencia de transición.

Modelación de riesgo por incendios forestales:

El análisis de riesgo por incendios se fundamenta en un modelo de susceptibilidad calibrado con información de variables biofísicas (temperatura máxima, déficit hídrico, índice de sequía, velocidad del viento, humedad del suelo) y antrópicas (proximidad a carreteras, densidad poblacional, fragmentación del hábitat). Se utilizó un algoritmo logístico multivariable, alimentado con registros históricos de ocurrencia de incendios reportados por el IDEAM. Para cada unidad de análisis, se estimó la probabilidad anual de ocurrencia de incendios, el área susceptible, y la severidad potencial de afectación (ver Figura 5).

Figura 5 Metodología utilizada para la evaluación del riesgo por incendios de cobertura vegetal

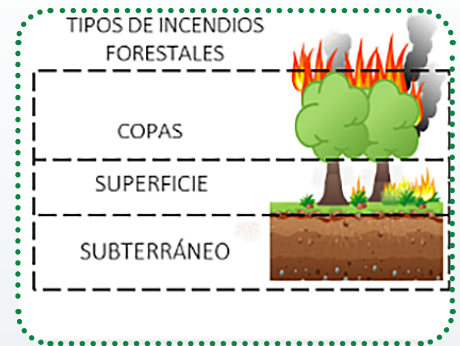
1 Simular condiciones iniciales que favorecen la ocurrencia de los incendios



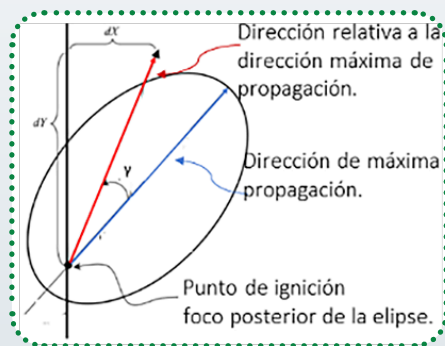
2 Generar puntos aleatorios de ignición en zonas de alta susceptibilidad



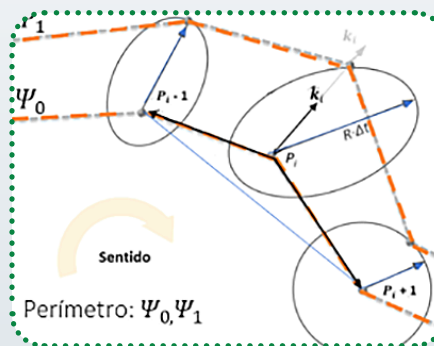
3 Definir del estrato combustible donde se va a propagar el incendio



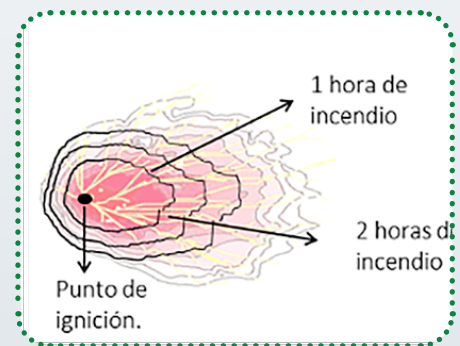
4 Propagar un punto del perímetro del incendio



5 Expandir el área activa del incendio



6 Finalizar predeterminadamente el evento por duración



Cálculo de métricas de riesgo:

Para ambos tipos de amenaza, la metodología incluyó la construcción de curvas de excedencia de pérdidas económicas y funcionales, utilizando distribuciones de probabilidad ajustadas (por ejemplo, Gumbel o Weibull para eventos extremos). En el caso específico de los incendios forestales, dichas curvas incorporaron la interacción entre el área susceptible y la severidad del evento, evaluada a partir de la intensidad y duración simulada bajo diferentes escenarios climáticos. Esto permitió obtener métricas clave como:

- ▶ **Pérdida anual esperada (PAE):** valor medio de las pérdidas económicas o funcionales por año, útil para la gestión financiera y priorización de intervenciones.
- ▶ **Pérdida máxima probable (PMP):** pérdida potencial asociada a un evento de período retorno específico (ejemplo, 20 años), relevante para dimensionar el riesgo catastrófico y diseñar medidas de contingencia.
- ▶ **Curvas de frecuencia y severidad:** gráficos que muestran la probabilidad acumulada de exceder distintos umbrales de pérdida, facilitando la comparación entre territorios y escenarios.

Integración y agregación territorial:

La metodología adoptada para la cuantificación integral del riesgo total en el sector ambiente se basa en el marco de evaluación holística del riesgo desarrollado por Cardona (2005, 2011). Este marco permite integrar dos componentes principales:

1. Riesgo físico: estimado mediante modelos catastróficos asociados a impulsores tensionantes de largo plazo.

2. Riesgo de contexto: incorpora factores de fragilidad ecológica y relevancia estratégica de los ecosistemas.

La **fragilidad ecológica** refleja la susceptibilidad inherente de los ecosistemas frente a alteraciones irreversibles, mientras que la **relevancia estratégica** evalúa su importancia funcional y social, considerando la provisión de servicios ecosistémicos, la conservación de la biodiversidad y la conectividad ecológica.

La selección de indicadores para cada componente se basó en tres criterios: (i) pertinencia para reflejar el fenómeno evaluado, (ii) disponibilidad y calidad de datos, y (iii) representatividad territorial y sectorial. Las fuentes incluyeron registros oficiales de entidades nacionales (IDEAM, DANE, Instituto Humboldt, INVEMAR, SINCHI, Parques Nacionales, entre otros), así como bases de datos internacionales y resultados de la modelación climática y ecológica desarrollada en este estudio.

Los indicadores se transformaron a valores normalizados y comparables, aplicando funciones de pertenencia y sistemas de puntuación estandarizados. Con ellos se calculó un **factor de agravamiento (F)** que amplifica el riesgo físico de base, de modo que el riesgo total (RT) se determina multiplicando el riesgo físico por $(1 + F)$.

Las métricas probabilísticas de riesgo se representaron espacialmente y se agregaron en las cuatro unidades de análisis principales (CAR, departamentos, subzonas hidrográficas y áreas protegidas), generando mapas, tablas y matrices comparativas. Esta integración territorial permitió no solo identificar "hotspots" de riesgo, sino también analizar, de forma inversa, los factores que más contribuyen al riesgo total, lo que orienta la priorización de intervenciones y el diseño de medidas adaptativas específicas.

Análisis de escenarios climáticos bajo incertidumbre y validación

Reconociendo la complejidad inherente al cambio climático y la profunda incertidumbre asociada a los escenarios futuros, este estudio incorpora un enfoque explícito de análisis bajo incertidumbre profunda. Este análisis se centra en la variabilidad y discrepancias entre proyecciones de diferentes modelos climáticos globales y regionales, así como en las rutas socioeconómicas consideradas (SSP2-4.5 y SSP5-8.5). La comparación sistemática de resultados permite identificar rangos de posible variación en las amenazas y riesgos estimados, fortaleciendo la credibilidad y utilidad de los hallazgos para la toma de decisiones sectoriales e interinstitucionales.

Manejo de la incertidumbre profunda:

Se emplearon herramientas probabilísticas avanzadas como los “probability boxes” (P-boxes), que representan rangos de distribución de probabilidad en lugar de una única estimación puntual. Esto permite capturar no solo la variabilidad esperada en las trayectorias climáticas, sino también las limitaciones en el conocimiento actual y las diferencias entre modelos climáticos. Cada resultado clave se presenta acompañado de sus respectivos rangos de incertidumbre, mostrando límites superiores e inferiores para cada unidad de análisis y horizonte temporal.

Sensibilidad y robustez de resultados:

La metodología incluye ejercicios de sensibilidad para evaluar el impacto de la variabilidad en pará-

metros críticos (por ejemplo, tasas de transición ecosistémica, frecuencia de incendios, elasticidad económica de los servicios ecosistémicos) sobre los resultados finales. Este análisis permitió identificar cuáles supuestos tienen mayor incidencia en los indicadores de riesgo, fortaleciendo la transparencia y robustez del modelo.

Validación y revisión por expertos:

La validación técnica de los resultados se realizó mediante la comparación sistemática de los datos simulados con registros históricos observados, evaluando el grado de ajuste de las proyecciones y la coherencia interna de los modelos utilizados. Este proceso incluyó pruebas de sensibilidad, verificación cruzada entre distintos modelos climáticos y análisis de coherencia espacial y temporal para garantizar la robustez de los hallazgos.

Adicionalmente, se efectuó una revisión cruzada por parte de expertos pertenecientes a instituciones líderes en investigación ambiental y climática, así como consultas con actores clave del sector ambiental y territorial. Esta retroalimentación permitió ajustar supuestos, refinar la selección de variables y validar la aplicabilidad de los resultados a nivel nacional y regional. En la versión final se sugiere incluir un esquema visual que ilustre el proceso de validación y el flujo de revisión entre actores técnicos e institucionales, a fin de facilitar su comprensión por diferentes audiencias (Figura 6).

Figura 6. Esquema de validación y revisión por expertos

Comunicación de incertidumbre y su consideración en políticas:

Los resultados y mapas de riesgo se comunican incluyendo bandas de confianza, rangos y advertencias explícitas sobre el nivel de incertidumbre en

cada indicador. Esta transparencia es fundamental para que los tomadores de decisiones, tanto del sector público como privado, puedan emplear la información en la planificación adaptativa y gestión de riesgos, considerando diferentes grados de precaución según su contexto de aplicación.





4

**Resultados
de modelación
y riesgo
climático**

El análisis de riesgo climático para el sector ambiente distinguió entre amenazas tensionantes —cambios progresivos en temperatura, precipitación y acidificación de ecosistemas— y amenazas perturbadoras, representadas principalmente por incendios de cobertura vegetal. Bajo los escenarios de cambio climático SSP2-4.5 (trayectoria intermedia) y SSP5-8.5 (trayectoria alta), la modelación proyecta un aumento sostenido de la temperatura promedio nacional entre 1,5 °C y 4 °C hacia finales del siglo XXI, con mayor intensidad en la región Caribe, los valles interandinos, la Orinoquía y el piedemonte amazónico. Las proyecciones de precipitación indican una mayor variabilidad espacial y temporal, con intensificación de eventos extremos y prolongación de períodos secos, especialmente en el Caribe y la región Andina. Se identificaron zonas donde la acidificación de suelos y cuerpos de agua podría afectar gravemente la biodiversidad y la productividad agrícola, incrementando la vulnerabilidad ecosistémica.

En relación con las amenazas perturbadoras, los incendios de cobertura vegetal muestran una tendencia creciente, asociada a factores climáticos (olas de calor, sequías prolongadas) y antrópicos (expansión de la frontera agrícola, quemadas no controladas). La modelación espacial indica que la Orinoquía, el piedemonte amazónico y los Andes orientales

registrarían los mayores incrementos de riesgo de incendio hacia el año 2100 en el escenario más desfavorable.

El análisis de elementos expuestos se centró en ecosistemas y zonas de vida, identificando que bosques secos tropicales, páramos, humedales y manglares presentan alta exposición por su localización en áreas de amenaza, y elevada vulnerabilidad debido a sus características biogeográficas y la presión antrópica. El cruce espacial de información permitió identificar zonas críticas de biodiversidad que coinciden con áreas esenciales para la provisión de servicios ecosistémicos clave (regulación hídrica, captura de carbono, provisión de recursos), entre las que destacan los valles interandinos, la región Caribe, la Amazonia occidental y los corredores de conectividad Andes–Orinoquía.

El análisis incluyó áreas protegidas del SINAP y Parques Nacionales Naturales, encontrando que la probabilidad de transformación ecosistémica supera el 50 % en algunas de ellas bajo escenarios de alta emisión (SSP5-8.5) hacia 2100. Estos resultados, presentados en la Tabla 5, evidencian riesgos significativos para la biodiversidad y para la capacidad de los ecosistemas de sostener medios de vida locales y servicios esenciales para la población

Tabla 5 Valor esperado del área total en transición fuera de su zona de vida al 2100, para cada portafolio y clima.

Clima	Terrestres		Costeros		Agua dulce		Marinos	
	[Ha]	[%]	[Ha]	[%]	[Ha]	[%]	[Ha]	[%]
SSP1 - RCP2.6	2,423,357	4.67	11,198	3.27	43,252	1.63	14,644	3.11
SSP2 - RCP4.5	3,628,128	6.98	29,192	8.51	68,652	2.59	28,370	6.02
SSP4 - RCP6.0	2,670,378	5.14	20,890	6.09	74,111	2.79	115,930	24.59
SSP5 - RCP8.5	3,606,263	6.94	29,393	8.51	76,529	2.88	156,571	33.21

La estimación del Área Total en Transición Ecosistémica (ATAE) al 2100 evidencia que, bajo todos los escenarios evaluados, una porción significativa de los ecosistemas colombianos podría transformarse fuera de su zona de vida actual debido al cambio climático. Los resultados muestran que, para los ecosistemas terrestres, las áreas en transición oscilan entre 2,42 millones de hectáreas (4,67 % del total nacional) en el escenario más optimista (SSP1-RCP2.6) y 3,61 millones de hectáreas (6,94 %) en el escenario de altas emisiones (SSP5-RCP8.5).

En ecosistemas marinos, las proporciones relativas son aún más críticas: hasta 156.571 hectáreas (33,21 %) podrían sufrir transiciones significativas bajo el escenario más desfavorable, lo que implica cambios drásticos en hábitats clave como arrecifes coralinos oceánicos. Los ecosistemas costeros presentan entre 3,27 % y 8,51 % de su superficie en riesgo de transición, mientras que en agua dulce los valores fluctúan entre 1,63 % y 2,88 %. En conjunto, estas cifras representan una presión sustancial sobre la biodiversidad y los servicios ecosistémicos estratégicos del país, ya que equivalen a entre aproximadamente el 4,7 % y más del 7 % de la superficie terrestre nacional (sin incluir áreas mari-

nas) y afectan de forma diferenciada ecosistemas de alta relevancia socioambiental. Este nivel de transformación, expresado como probabilidad de cambio fuera de la zona de vida actual, refuerza la urgencia de medidas de adaptación focalizadas, priorizando áreas con alta exposición y baja resiliencia para minimizar impactos económicos y ecológicos a largo plazo.

La Figura 7 detalla la distribución de las áreas en transición para cuatro ecosistemas representativos: zona pantanosa basal, manglar de aguas mixohalinas, laguna aluvial y coralino oceánico. Mientras que los ecosistemas continentales (zona pantanosa basal y laguna aluvial) muestran incrementos moderados en la probabilidad de transición, los ecosistemas costeros y marinos (manglar y coralino oceánico) presentan aumentos más pronunciados bajo escenarios de alta emisión, destacando el coralino oceánico como el más afectado. Este patrón confirma la alta sensibilidad de los sistemas marino-costeros a factores como el aumento de temperatura y la acidificación, reforzando la necesidad de implementar medidas de adaptación específicas para preservar su funcionalidad ecológica y socioeconómica.

Figura 7 Distribución de áreas en transición para el ecosistema: a) Zona pantanosa basal, b) Manglar de aguas mixohalinas, c) Laguna aluvial, d) Coralino oceánico



Cuantificación probabilista y económica del riesgo

La integración de los escenarios climáticos y la caracterización de elementos expuestos permitió construir mapas de riesgo probabilístico, que muestran tanto la probabilidad de transformación ecosistémica como la magnitud de las pérdidas potenciales en los diferentes servicios ecosistémicos (Tabla 6).

Bajo el escenario más desfavorable (SSP5–RCP8.5), las pérdidas económicas proyectadas por degradación de servicios ecosistémicos podrían superar los 4,36 billones de pesos anuales hacia 2100 si no se implementan medidas de adaptación efectivas. Esto representa aproximadamente el 0,36 % del PIB colombiano de 2022 (1.215 billones COP), una magnitud que refleja la alta vulnerabilidad económica del sector ambiente frente al cambio climático.

Tabla 6 Resumen de pérdidas por clima

Valor expuesto (COP x10 ⁶)	Clima	PAE (COP x10 ⁶)	PAE (%)
6,001,456,000	SSP1 – RCP 2.6	311,000	0.05
	SSP2 – RCP 4.5	1,336,000	0.22
	SSP4 – RCP6.0	2,824,000	0.47
	SSP5 – RCP 8.5	4,360,000	0.72

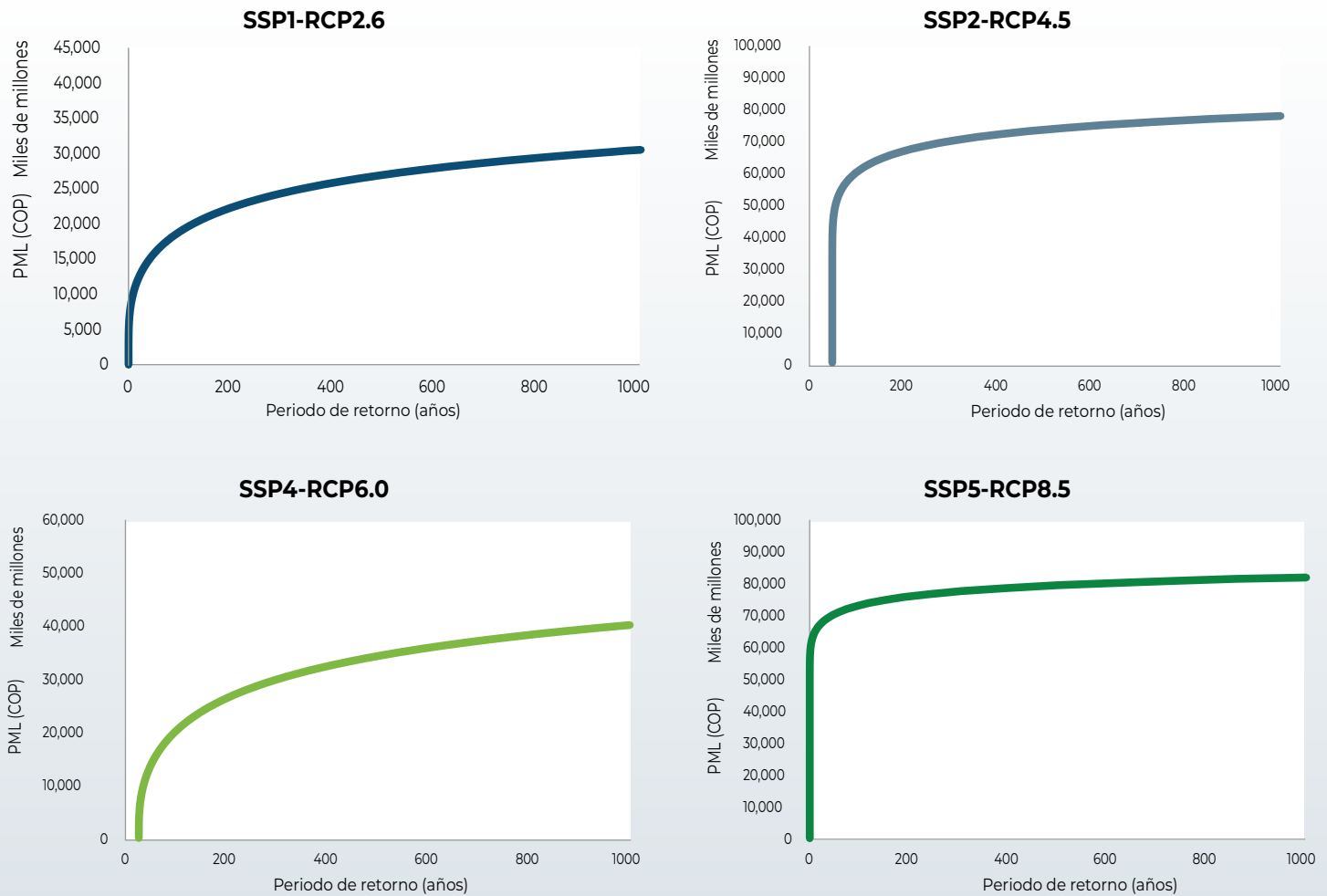
Una observación relevante es que, a diferencia de otros sectores evaluados en estudios paralelos (por ejemplo, infraestructura), el sector ambiente muestra una marcada variabilidad en las pérdidas económicas entre escenarios climáticos. Mientras que en sectores como infraestructura las pérdidas no difieren sustancialmente entre trayectorias de emisiones, en el caso de los recursos naturales el incremento de emisiones se traduce en aumentos significativos de pérdidas proyectadas. Esta divergencia confirma que los ecosistemas y servicios ecosistémicos son altamente sensibles a los cambios en variables climáticas, lo que refuerza la urgencia de implementar medidas de adaptación robustas y específicas para este sector.

La comparación departamental revela que Meta, Casanare, Bolívar y Magdalena concentran las mayores pérdidas potenciales, mientras que áreas protegidas como la Sierra Nevada de Santa Marta, el Parque Nacional Natural Serranía de Chiribiquete y los manglares del Pacífico exhiben alta vulnerabilidad ecológica y funcional.

El análisis por Corporaciones Autónomas Regionales (CAR) y subzonas hidrográficas confirma la necesidad de focalizar acciones adaptativas en regiones con riesgos críticos. Asimismo, las curvas de Pérdida Máxima Probable (PMP) presentadas corresponden a un análisis agregado para la totalidad de portafolios bajo todos los climas considerados, con el fin de ilustrar la relación entre la magnitud de las pérdidas y su probabilidad de excedencia a nivel nacional.

Estas curvas permiten comparar la severidad relativa de los distintos escenarios climáticos y entender el comportamiento general del riesgo, pero no reflejan las diferencias específicas entre territorios (Figura 8). Para identificar las variaciones espaciales del riesgo, se debe recurrir a los mapas y análisis desagregados por departamento, CAR, subzona hidrográfica y área protegida, los cuales sí muestran la heterogeneidad territorial en la probabilidad y magnitud de las pérdidas.

Figura 8 Curvas de PML para la totalidad de portafolios ante todos los climas considerados.



Riesgo por incendios forestales

El riesgo asociado a los incendios de cobertura vegetal fue evaluado mediante un procedimiento específico que combina modelación climática, variables meteorológicas históricas y proyectadas, y parámetros de propagación del fuego. Este modelo genera **catálogos simulados de incendios** para cada escenario climático considerado, los cuales reproducen miles de eventos potenciales con variación en localización, extensión y severidad. Con esta información, se estiman las áreas afectadas, las pérdidas en servicios ecosistémicos y las métricas probabilísticas de riesgo.

Los resultados muestran que el área susceptible a incendios podría **duplicarse** bajo el escenario de altas emisiones SSP5-8.5 hacia 2100, con los mayores incrementos en la Orinoquía, el piedemonte amazónico y los márgenes de la región Andina. Factores como la expansión de la frontera agrícola y la recurrencia de quemados no controlados intensifican esta amenaza. La Tabla 7 presenta los promedios de áreas quemadas (por evento simulado y por año) y las métricas probabilísticas a nivel nacional para cada clima, evidenciando que SSP5-RCP8.5 genera las mayores pérdidas proyectadas, mientras que SSP1-RCP2.6 presenta las menores.

Tabla 7 Áreas quemadas, PAE y PML de 50 y 500 años de periodo de retorno para incendios forestales

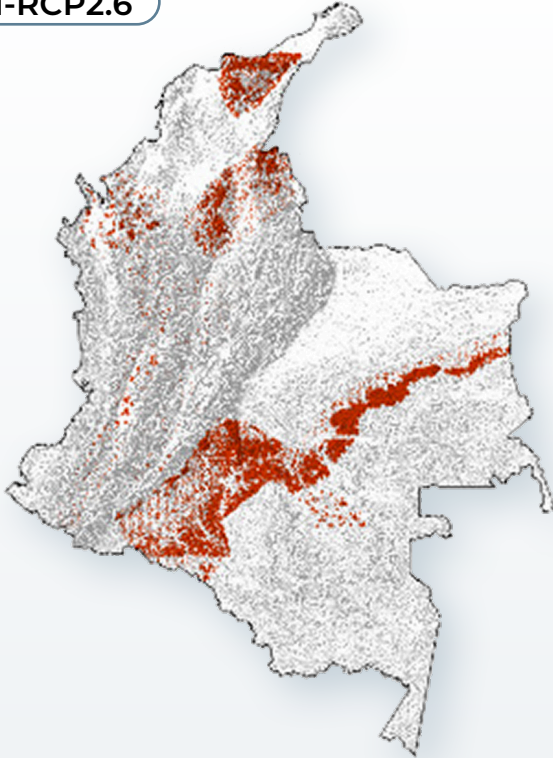
Clima	Área quemada promedio		PAE		PML 50 años		PML 500 años	
	(por evento - Ha)	(por año - Ha)	(COP billones)	(%)	(COP billones)	(%)	(COP billones)	(%)
SSP1-RCP 2.6	3,396	511,685	\$2.97	0.87	\$4.38	0.14	\$5.02	0.16
SSP2-RCP 4.5	3,574	620,153	\$3.8	1.1	\$5.92	0.19	\$7.3	0.24
SSP4-RCP 6.0	3,311	545,688	\$3.35	0.997	\$5.42	0.18	\$6.49	0.21
SSP5-RCP 8.5	15,391	2,699,813	\$4.39	1.29	\$7.63	0.25	\$8.97	0.29

A nivel departamental, Meta, Guaviare y Vichada destacan por los mayores incrementos relativos en la probabilidad y extensión de incendios (Figura 9). La valoración económica de la pérdida de servicios ecosistémicos por incendios revela una **alta relación beneficio-costo** para las inversiones en prevención

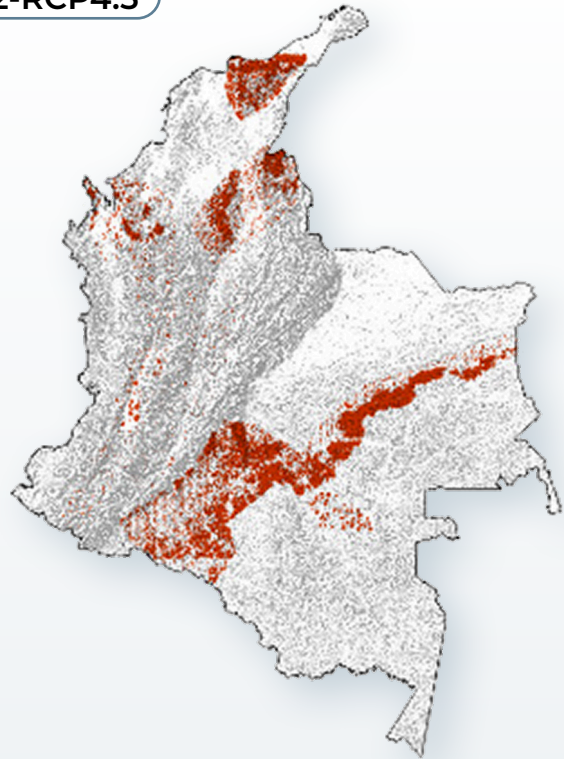
y control, especialmente en zonas críticas. El análisis también identificó un **umbral de inversión** a partir del cual las reducciones adicionales del riesgo son marginales, optimizando así la asignación de recursos públicos.

Figura 9 Catálogos simulados de incendios para cada clima considerado

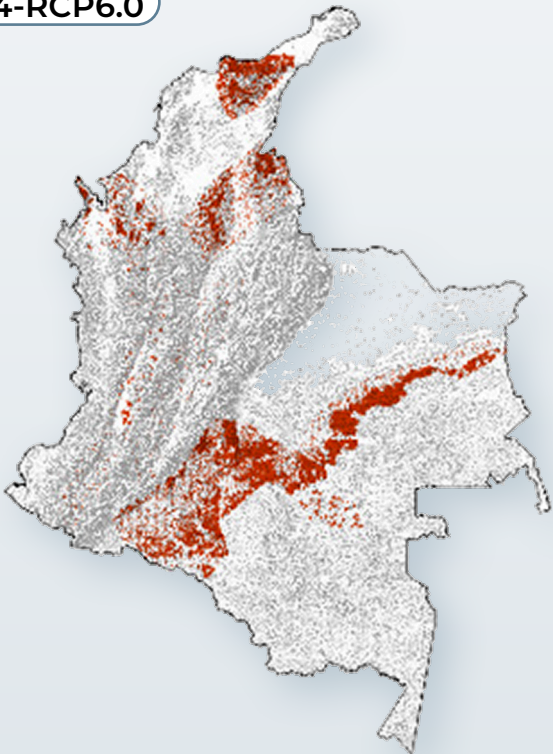
SSP1-RCP2.6



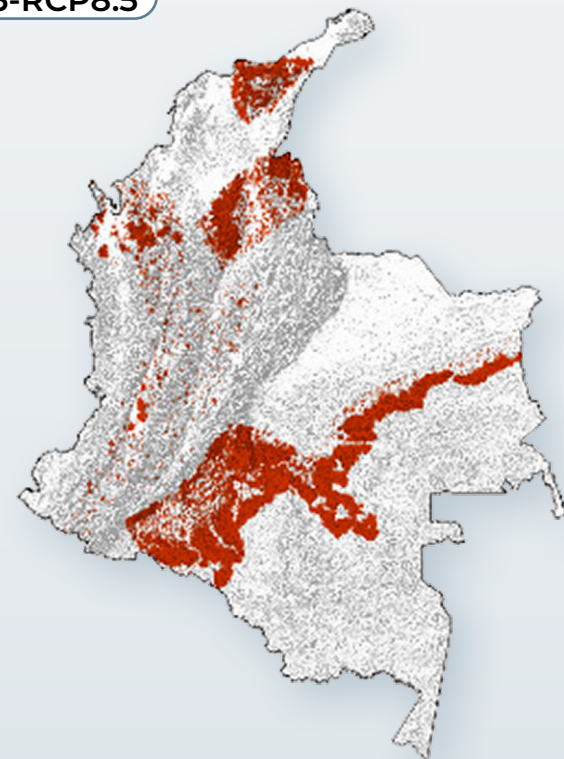
SSP2-RCP4.5



SSP4-RCP6.0



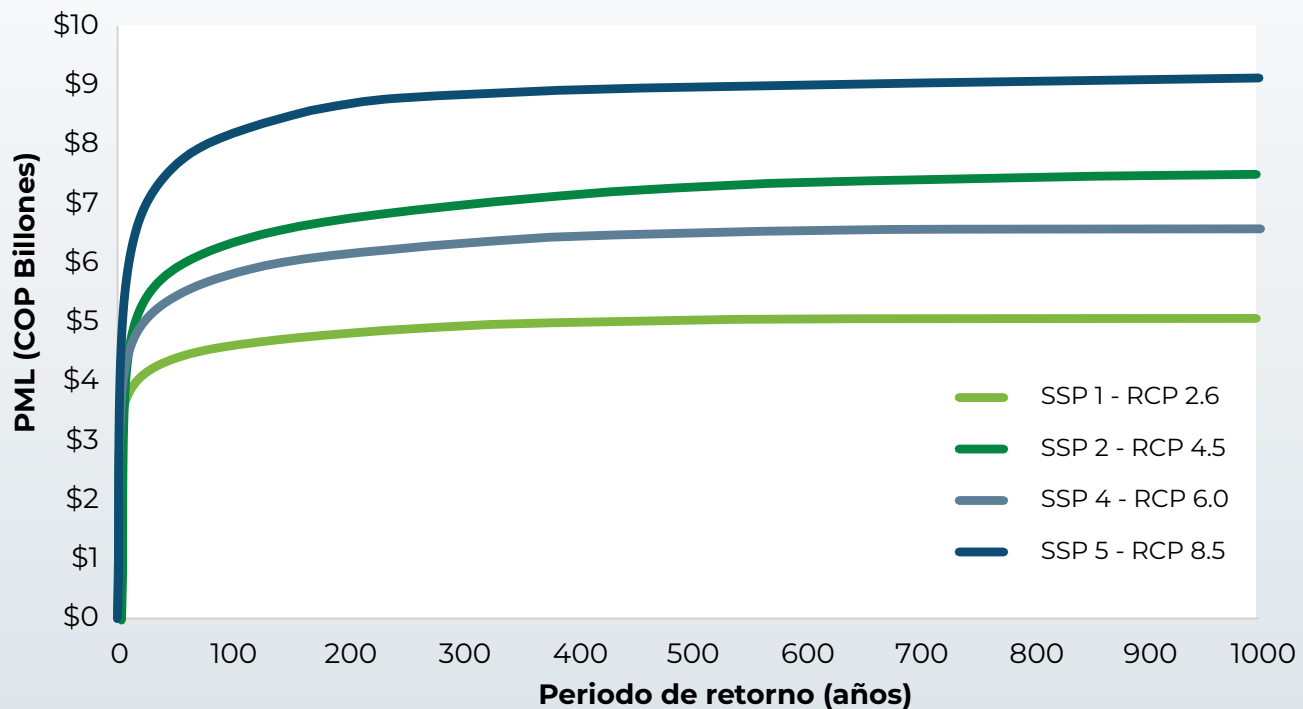
SSP5-RCP8.5



Como se muestra en la Figura 10, las curvas de Pérdida Máxima Probable (PML) para incendios de cobertura vegetal se construyeron a partir de estos catálogos simulados. Las curvas relacionan la magnitud de las pérdidas económicas y funcionales con la frecuencia de ocurrencia de los eventos simulados, expresada en períodos de retorno. El incremento rápido al inicio indica que eventos relativamente frecuentes generan pérdidas significativas sobre los elementos expuestos (principalmente la cobertu-

ra vegetal y los servicios ecosistémicos asociados). Posteriormente, la curva tiende a estabilizarse, lo que significa que, aunque ocurran eventos extremos adicionales, el incremento de pérdidas no es proporcional. Esta dinámica refleja una amenaza que causa impactos recurrentes y de alta incidencia, y permite identificar umbrales de pérdida útiles para la planificación de medidas preventivas y, potencialmente, para el diseño de esquemas financieros como seguros paramétricos o fondos de contingencia.

Figura 10 Comparación de curvas de PML por incendios de cobertura vegetal para todos los climas considerados

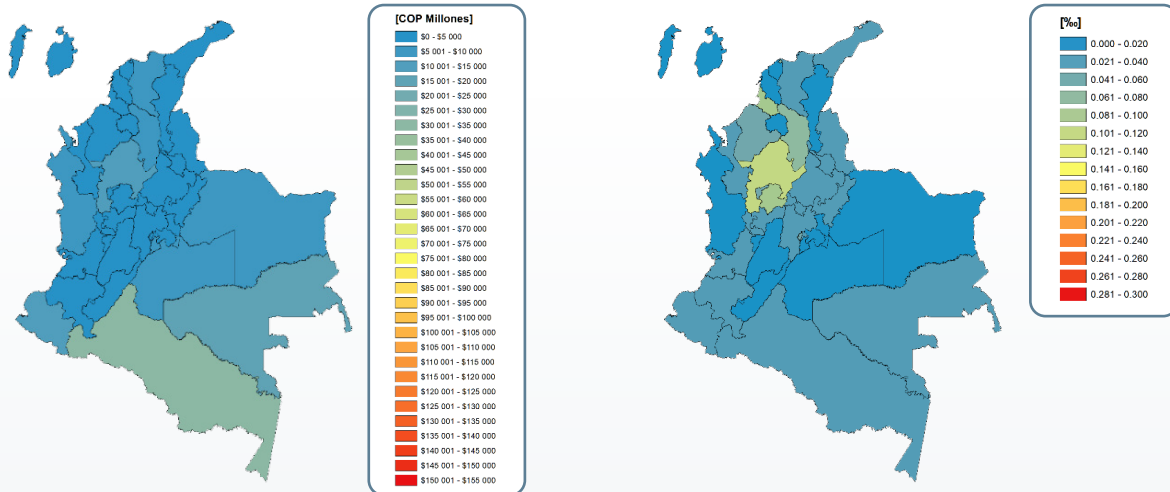


En cuanto a la PAE (Pérdida Anual Esperada) agrupada por jurisdicción de CAR, para todos los climas considerados, Corpoamazonía presenta los mayores valores absolutos. Sin embargo, las mayores afectaciones relativas se concentran en Corantioquia y Cornare (Figura 11). Esto significa que, aunque el valor monetario absoluto de las pérdidas en estas jurisdicciones no sea el más alto, la proporción que

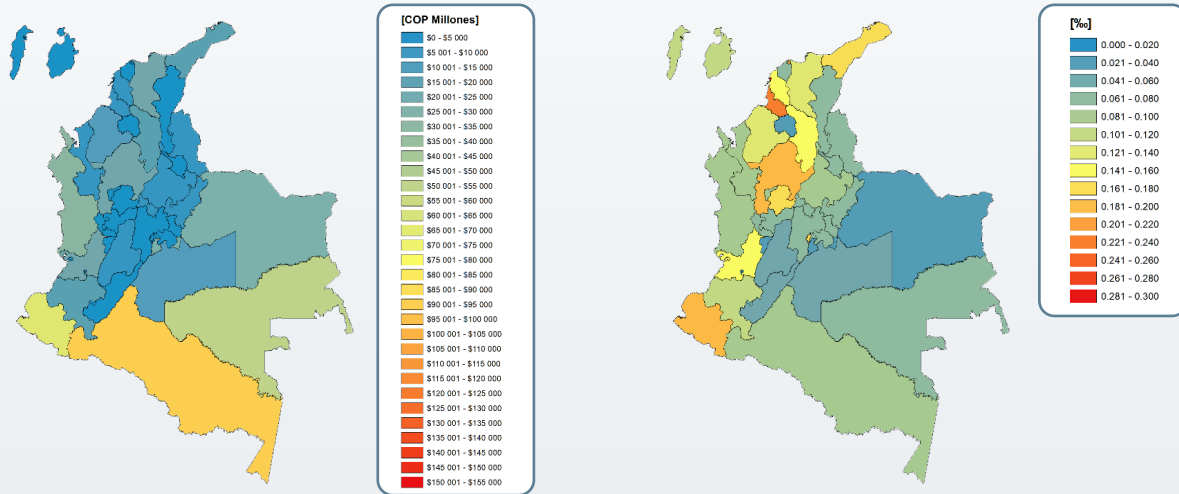
representan respecto a su valor ecosistémico total es muy significativa, lo que refleja una alta fragilidad relativa. Este hallazgo es relevante porque permite priorizar medidas de adaptación en aquellas jurisdicciones donde las pérdidas, aunque menores en términos absolutos, tienen un impacto proporcional alto sobre el capital natural disponible.

Figura 11 PAE absoluta (izq.) y relativa (der.) agrupada en las regiones de Jurisdicción de CARs, para el clima a. A. SSP1-RCP2.6 B. SSP2-RCP4.5 y C. SSP5-RCP8.5.

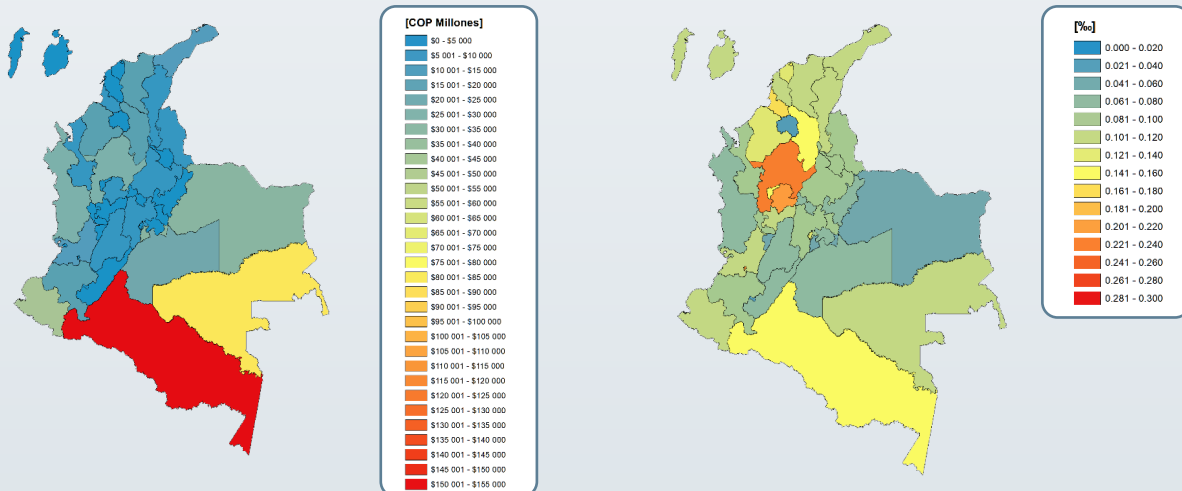
A. Escenario para el clima SSP1-RCP2.6



B. Escenario para el clima SSP2-RCP4.5



C. Escenario para el clima SSP5-RCP8.5



En cuanto a la PAE agrupada por departamento, el escenario SSP5-RCP8.5 genera las mayores pérdidas, particularmente en Amazonas y Antioquia. El SSP2-RCP4.5 presenta afectaciones altas en La Guajira, Nariño, Antioquia, Bolívar y Valle del Cauca, mientras que el SSP4-RCP6.0 muestra máximos en Antioquia y Amazonas. El SSP1-RCP2.6 es el de menor impacto y presenta valores relativamente homogéneos en todo el territorio. Estas variaciones se explican por la interacción entre la sensibilidad climática de los ecosistemas y su ubicación geográfica en relación con las amenazas modeladas, que determinan diferencias sustanciales en el riesgo. En el caso de la PAE agrupada por áreas protegidas, los mayores valores de pérdida se concentran en zonas de arrecifes coralinos, con cifras muy superiores al resto de ecosistemas, especialmente bajo los escenarios SSP4-RCP6.0 y SSP5-RCP8.5.

Esto se debe a la alta vulnerabilidad de los ecosistemas coralinos frente a la acidificación y el aumento de temperatura, factores que afectan directamente su estructura y funcionalidad. Al analizar la PAE por subzona hidrográfica, el escenario SSP4-RCP6.0 destaca con los mayores valores de pérdida, principalmente en ecosistemas cercanos a la costa y en zonas de Amazonas, Antioquia y Bolívar. Si bien los mapas de valores absolutos muestran varias áreas con pérdidas altas, el análisis relativo respecto a su valor ecosistémico total revela que, en la mayoría de los casos, la afectación proporcional es menor, lo que aporta un matiz importante para orientar la priorización territorial de las intervenciones adaptativas.

Priorización territorial y enfoque holístico

La agrupación de resultados por CAR, departamentos, subzonas hidrográficas y áreas protegidas permitió comparar el riesgo absoluto y relativo, facilitando la identificación de territorios prioritarios para la acción adaptativa. El análisis evidencia que existen

regiones con alto riesgo absoluto —por ejemplo, los Llanos Orientales, el Caribe y áreas amazónicas de transición— y otras con alta vulnerabilidad relativa debido a capacidades institucionales limitadas o mayor dependencia de servicios ecosistémicos (Figura 12).

La priorización territorial se apoyó en un sistema de indicadores de riesgo, vulnerabilidad y capacidad adaptativa, considerando no sólo la exposición biogeográfica, sino factores socioeconómicos e institucionales. Este enfoque permite orientar la inversión pública y el diseño de políticas diferenciadas según la realidad de cada territorio, y resalta la importancia de fortalecer la gobernanza ambiental a nivel local y regional.

El análisis bajo incertidumbre profunda, mediante la comparación de escenarios y simulaciones, subraya la necesidad de estrategias flexibles y adaptativas, así como el monitoreo continuo de los indicadores para ajustar las acciones ante cambios no previstos.

La modelación y cuantificación probabilista del riesgo climático revela diferencias marcadas en la exposición y vulnerabilidad de los distintos ecosistemas y regiones del país. A continuación, se resumen los principales hallazgos para los territorios y ecosistemas clave:

Valles interandinos: Se identifican como zonas de alta exposición debido a la intensificación de sequías y eventos extremos de precipitación, lo que incrementa el riesgo de pérdida de servicios ecosistémicos relacionados con la regulación hídrica y la productividad agrícola. Las proyecciones muestran una alta probabilidad de transición ecosistémica en áreas fragmentadas por la expansión urbana y agropecuaria.

Páramos y alta montaña: Estos ecosistemas presentan una elevada fragilidad ecológica frente a aumentos de temperatura y cambios en los patrones de precipitación. El retroceso de la frontera de pá-

ramo y la disminución de la oferta hídrica afectan a millones de personas aguas abajo, destacando la necesidad de medidas de conservación y restauración.

Bosques secos tropicales: Son considerados zonas críticas de riesgo debido a su vulnerabilidad a incendios forestales y a la presión antrópica. Se proyectan pérdidas significativas de biodiversidad y servicios de provisión si no se implementan acciones de restauración y uso sostenible.

Ecosistemas marino-costeros (manglares, arrecifes y playas): Están entre los más afectados por el aumento del nivel del mar, la erosión costera y la acidificación oceánica. El valor económico de sus servicios ecosistémicos es proporcionalmente alto respecto a su área, y su degradación impacta la pesca, la protección costera y las comunidades locales.

Orinoquía y Amazonía: Se observan patrones diferenciados de riesgo, con la Amazonía mostrando alta sensibilidad a cambios en la precipitación y la Orinoquía a variabilidad hidrológica y expansión agropecuaria. En ambos casos, la conservación de la conectividad ecológica y la gestión sostenible del territorio son prioritarias.

Áreas protegidas y corredores de conectividad: La modelación indica que la efectividad de la red de áreas protegidas depende de su capacidad para mantener la funcionalidad ecológica frente a esce-

narios climáticos adversos, por lo que se recomienda fortalecer la gestión y monitoreo adaptativo en estos territorios.

Los resultados de la evaluación integran tanto el riesgo físico —derivado de los impulsores climáticos y antrópicos— como los factores contextuales y socioecológicos que pueden amplificar o reducir sus impactos. La vulnerabilidad de los ecosistemas se determinó considerando su susceptibilidad a cambios irreversibles y su capacidad de resiliencia, así como la fragilidad ecológica y la relevancia estratégica en términos de biodiversidad y servicios ecosistémicos.

En este análisis, la exposición se refiere a la presencia y localización de ecosistemas y servicios en áreas potencialmente afectadas por los impulsores de cambio, mientras que la vulnerabilidad describe su capacidad para resistir o adaptarse a dichos impactos. La combinación de ambas dimensiones permitió estimar el riesgo físico y el riesgo total, identificando zonas donde la fragilidad y la importancia estratégica amplifican significativamente las pérdidas potenciales.

Este enfoque permitió no solo cuantificar y comparar el riesgo entre diferentes ecosistemas y territorios, sino también priorizar áreas críticas para intervenciones de adaptación, restauración y gestión preventiva, facilitando así la focalización de recursos y la formulación de políticas públicas efectivas.

Figura 12 Enfoque conceptual de la evaluación holística del riesgo ambiental



En consecuencia, la visión holística del riesgo brinda una perspectiva integradora y simplificada de una problemática multidimensional, promoviendo la articulación entre los distintos aspectos climáticos, económicos y ambientales. Así, la planificación y ejecución de acciones de adaptación pueden orientarse a partir de la desagregación de los resultados de la evaluación holística, permitiendo enfocar las intervenciones sobre los factores más efectivos para reducir la vulnerabilidad y fortalecer la resiliencia de los ecosistemas.

Por ejemplo, el análisis identificó que en zonas como los manglares del Pacífico y la Sierra Nevada de Santa Marta, la alta relevancia estratégica y fragilidad ecológica incrementan el riesgo total, incluso bajo escenarios de emisiones moderadas. En estos casos, priorizar medidas de restauración y protec-

ción de hábitats críticos podría generar reducciones significativas en la pérdida anual esperada de servicios ecosistémicos, maximizando el beneficio de la inversión pública y privada en adaptación

Evaluación del riesgo total

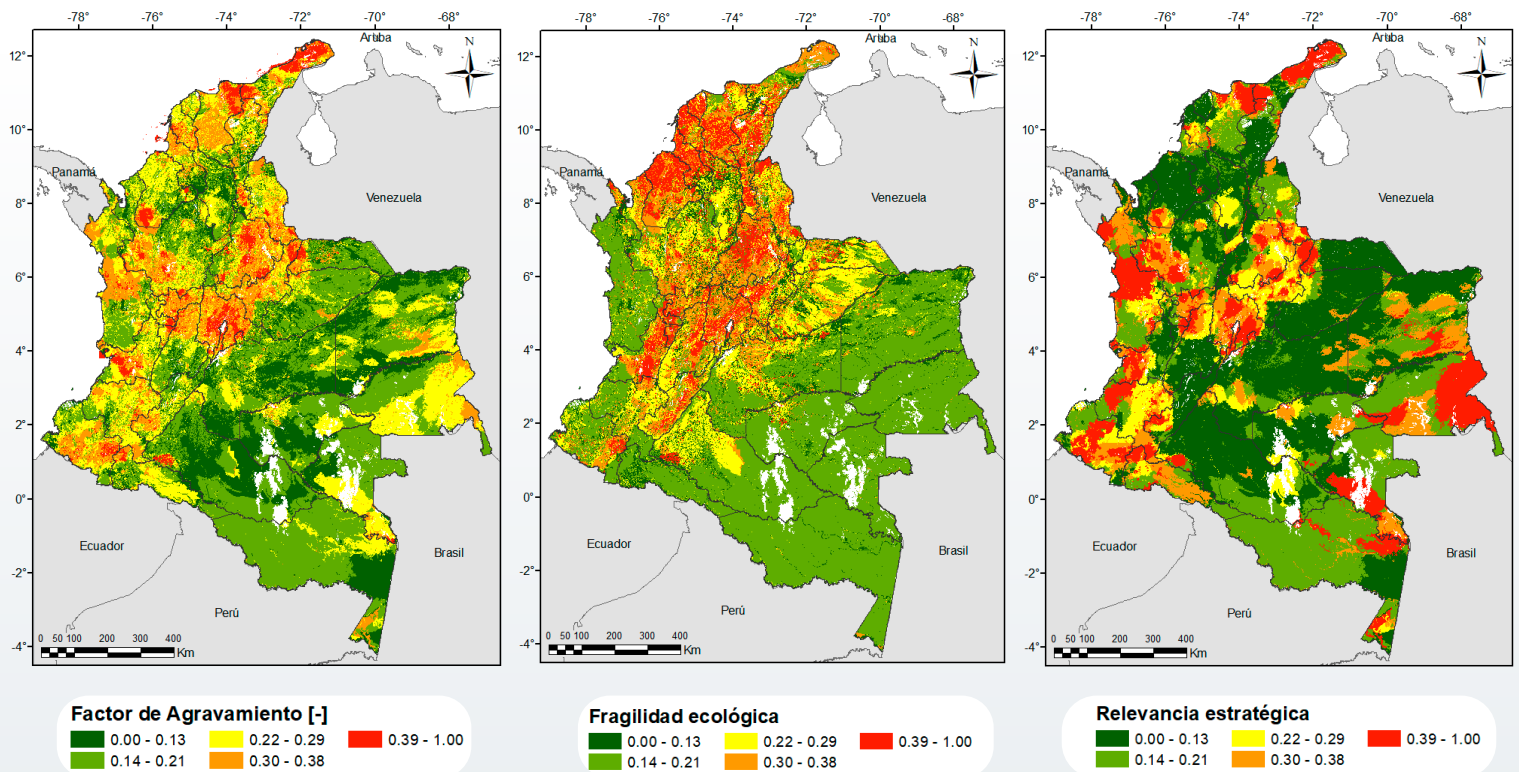
La aplicación del indicador integral de riesgo total ha permitido identificar con robustez los territorios y ecosistemas donde la vulnerabilidad estructural y la importancia estratégica amplifican de manera significativa el riesgo físico derivado del cambio climático.

Los mapas obtenidos muestran la distribución espacial de los coeficientes de agravamiento, desagregados por fragilidad ecológica y relevancia es-

tratégica presentados en la Figura 13. Por ejemplo, áreas como los páramos, bosques secos y corredores biológicos presentan valores elevados de riesgo total, reflejando tanto su susceptibilidad a las alteraciones climáticas como su rol clave en la provisión de servicios ecosistémicos y la conservación de la biodiversidad.

Esta desagregación resulta fundamental para la focalización y priorización de las medidas de adaptación, permitiendo orientar los recursos hacia las zonas donde el impacto potencial es mayor. El enfoque integral utilizado ofrece además una herramienta robusta para la toma de decisiones en política pública, facilitando la planificación sectorial y territorial bajo un criterio de costo-efectividad y gestión adaptativa.

Figura 13 a) Mapa del coeficiente de agravamiento (F) para Colombia, b) Mapa de los coeficientes de agravamiento por fragilidad ecológica (F_FE) y c) por relevancia estratégica (F_RE) para Colombia





5

**Medidas de
Adaptación:
Propuestas
Estratégicas para
el Sector Ambiente**

Los resultados de la evaluación holística del riesgo muestran que ecosistemas estratégicos como arrecifes coralinos, manglares y humedales costeros, así como áreas de la Orinoquía y la Amazonia, enfrentan niveles críticos de fragilidad ecológica y pérdidas potenciales significativas bajo escenarios de altas emisiones (especialmente SSP5-RCP8.5). Esto exige intervenciones diferenciadas que integren conservación, restauración y gestión sostenible, priorizadas según su relevancia estratégica, grado de riesgo y contexto territorial.

Las medidas propuestas se agrupan en cuatro categorías principales:

- 1. Conservación y protección** (*morado*): incluye el fortalecimiento del Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SINAP), la conservación de bosques, manglares y humedales, el monitoreo y control de la pérdida de hábitat, la implementación de sistemas de alerta temprana y la protección de ecosistemas de alta representatividad y conectividad (Figura 14).
- 2. Restauración** (*azul*): dirigida a recuperar la integridad y funcionalidad de ecosistemas degradados, especialmente en zonas de alta vulnerabilidad y relevancia ecológica, como corredores biológicos y áreas de amortiguamiento de parques nacionales. Incluye restauración ecológica, rehabilitación de suelos y recuperación de servicios ecosistémicos clave (Figura 15).

3. Uso sostenible de la tierra y los recursos (*verde*): integra criterios de adaptación en la planificación territorial, promueve prácticas agropecuarias resilientes, corrige conflictos de uso del suelo y fomenta la gestión sostenible de ecosistemas frágiles y productivos (Figura 16).

4. Educación y concientización (*naranja*): impulsa la apropiación social de la adaptación a través de programas educativos formales e informales, campañas de sensibilización y el fortalecimiento de capacidades comunitarias e institucionales (Figura 17).

Un caso específico son las **medidas frente a incendios de cobertura vegetal**, que priorizan la prevención (campañas educativas, vigilancia y sanciones efectivas), la respuesta rápida (fortalecimiento de brigadas y uso de aeronaves para control de incendios) y la asignación costo-eficiente de recursos, considerando que existe un umbral de inversión óptimo más allá del cual los beneficios marginales se estabilizan.

La priorización se basa en el **indicador de Fragilidad Ecológica**, que combina el grado de degradación, presión hídrica, desertificación, disminución de la distribución y pérdida de procesos bióticos, entre otros. Las figuras siguientes muestran, con un **código de color unificado**, la distribución de las medidas por ecosistema según su nivel de fragilidad, facilitando la identificación de intervenciones prioritarias a nivel nacional.

Figura 14 .Medidas de adaptación para la conservación y protección del ecosistema asociado al indicador del grado de transformación

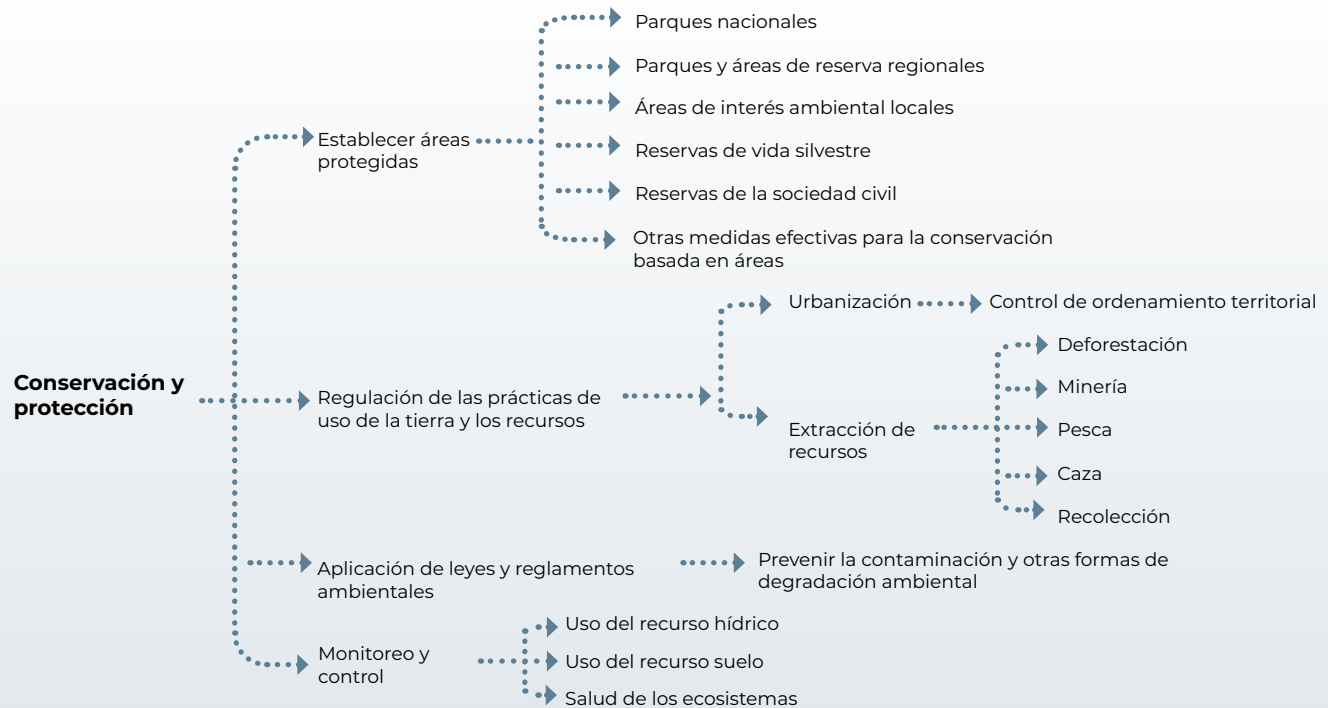


Figura 15 Medidas de adaptación para la restauración del ecosistema asociado al indicador de presión hídrica a los ecosistemas

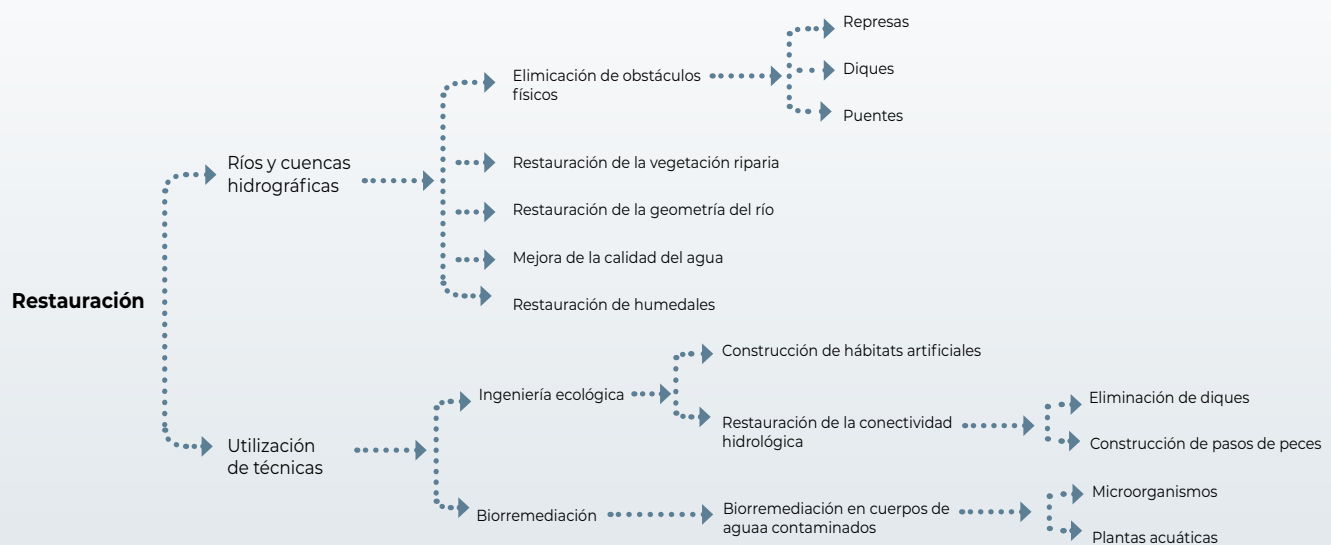


Figura 16 Medidas de adaptación para el uso sostenible de la tierra y los recursos del ecosistema asociado al indicador de degradación del suelo por desertificación

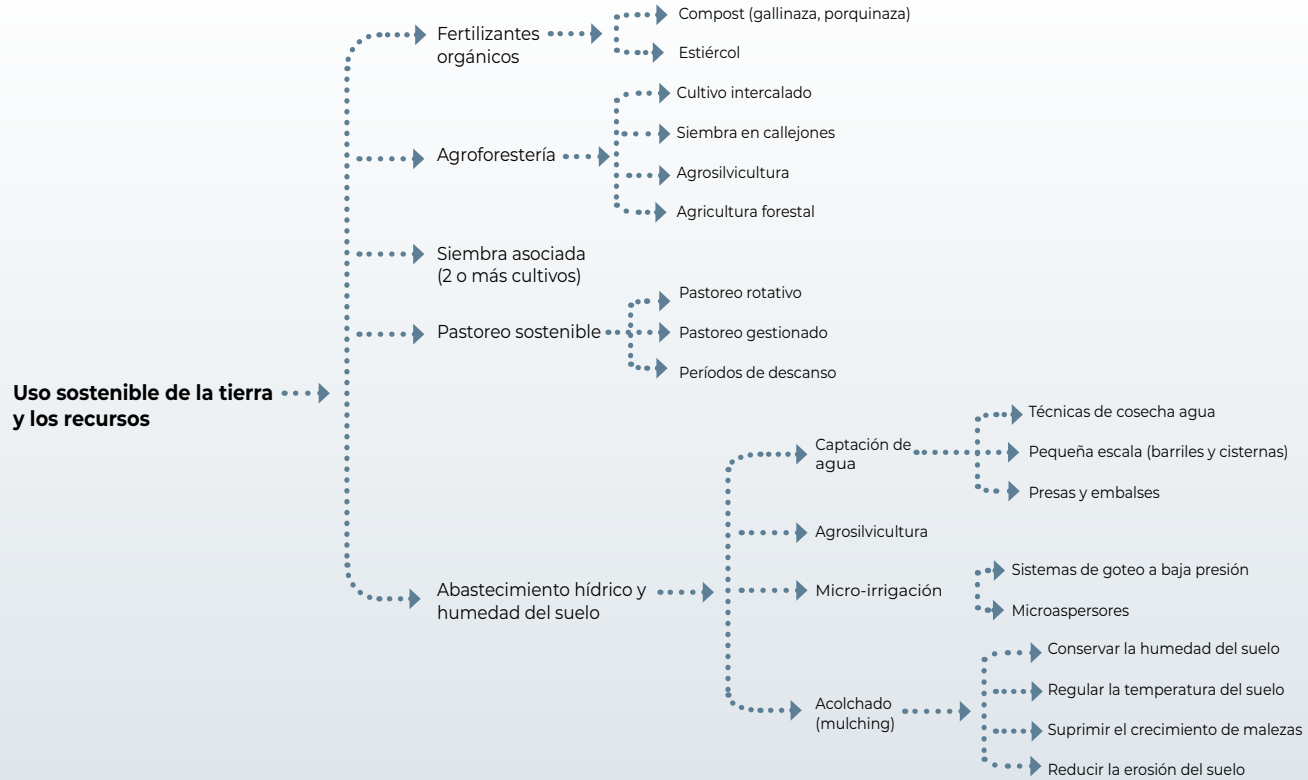


Figura 17 Medidas de adaptación para la educación y concientización en la conservación del ecosistema e importancia de la biodiversidad asociado al indicador de disminución de la distribución del ecosistema





6

Conclusiones

La modelación integrada y probabilista desarrollada en este estudio demuestra la necesidad de una adaptación diferenciada, focalizada y basada en evidencia científica. La priorización debe dirigirse a aquellos ecosistemas, territorios y comunidades que presentan mayores niveles de riesgo, identificados a través de la combinación de factores físicos, ecológicos y sociales. Los resultados evidencian que ecosistemas como páramos, bosques secos, manglares y humedales, así como territorios con alta fragilidad ecológica o relevancia estratégica, requieren intervenciones urgentes y adaptadas a sus contextos específicos.

La transversalización del riesgo climático en la política pública nacional y territorial resulta imprescindible para enfrentar los desafíos identificados. Superar los enfoques sectoriales aislados y fragmentados es fundamental; se recomienda fortalecer la coordinación multisectorial y multinivel, integrando la gestión del riesgo climático en los instrumentos de planificación, ordenamiento y desarrollo, así como en las agendas de adaptación sectorial y territorial.

La adaptación basada en ecosistemas se reafirma como la estrategia más costo-efectiva y con mayores beneficios colaterales. Este enfoque permite, a la vez, proteger la biodiversidad, garantizar servicios ecosistémicos esenciales para las comunidades y aumentar la resiliencia ante eventos extremos, contribuyendo al bienestar social y al desarrollo económico sostenible. Las simulaciones de escenarios muestran que la inversión en restauración, conservación y uso sostenible de la tierra puede reducir hasta en un 35-40 % las pérdidas económicas proyectadas y evitar la degradación de más de 1,5 millones de hectáreas hacia 2100 bajo escenarios de alta presión climática (SSP5-RCP8.5). Esto equivale a prevenir pérdidas superiores a 4 billones de pesos anuales, reforzando su relevancia como pilar central de las políticas de adaptación. **El fortalecimiento**

de la gobernanza ambiental, el monitoreo permanente y la participación social emergen como condiciones indispensables para una adaptación robusta y flexible. El estudio resalta la importancia de contar con sistemas de monitoreo integrados y actualizados, así como con mecanismos efectivos de alerta temprana y participación de los actores locales en la toma de decisiones, lo que permite ajustar oportunamente las estrategias de adaptación frente a la incertidumbre y los escenarios cambiantes.

Se recomienda avanzar en la creación de un Sistema Nacional de Monitoreo de Riesgo Climático que incluya la actualización periódica de mapas, tableros de control y reportes técnicos, con el fin de retroalimentar de manera continua los procesos de planificación y la toma de decisiones a escala nacional y regional. Este sistema deberá articularse con los observatorios existentes y con los nodos regionales de cambio climático, asegurando el acceso oportuno a la información, la transparencia y el uso efectivo de los resultados de la modelación y evaluación de riesgos. **El financiamiento para la adaptación requiere un enfoque integral y sostenible, combinando fuentes nacionales, internacionales y mecanismos innovadores como bonos verdes, seguros climáticos y fondos de resiliencia.** Los recursos deben orientarse a la restauración, conservación, fortalecimiento de capacidades institucionales y reducción de vulnerabilidades sociales, asegurando la equidad y la sostenibilidad en el largo plazo.

Finalmente, la experiencia y las capacidades técnicas desarrolladas en este análisis son replicables y escalables a otros sectores estratégicos como el agropecuario, la infraestructura y la salud. Este abordaje integral constituye un paso fundamental hacia un modelo de desarrollo verdaderamente resiliente y sostenible, permitiendo a Colombia anticipar, gestionar y transformar los riesgos climáticos en oportunidades de adaptación y bienestar para toda la sociedad.



7

Bibliografía

Documentos de la consultoría BID-MinAmbiente:

- ▶ Cardona, O.D., Bernal, G., Suarez, D.C., Perez, M.P., Grajales, S., Rincón, D.F. (2022). Producto 2: Análisis del Riesgo del Sector de Ambiente y Desarrollo Sostenible ante Escenarios de Variabilidad y Cambio Climático, en Consideración de las Áreas de Trabajo o Unidades Funcionales Competencia del Sector. Preparado para Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y Banco Interamericano de Desarrollo. INGENIAR Risk Intelligence Ltda. Bogotá.
- ▶ Cardona, O.D. et al. (2022). Producto 3: Análisis de riesgo por el cambio climático. Análisis del Riesgo del Sector de Ambiente y Desarrollo Sostenible ante Escenarios de Variabilidad y Cambio Climático, en Consideración de las Áreas de Trabajo o Unidades Funcionales Competencia del Sector. Preparado para Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y Banco Interamericano de Desarrollo. INGENIAR Risk Intelligence Ltda. Bogotá.
- ▶ Cardona, O.D. et al. (2022). Producto 4: Análisis de riesgo por el cambio climático. Análisis del Riesgo del Sector de Ambiente y Desarrollo Sostenible ante Escenarios de Variabilidad y Cambio Climático, en Consideración de las Áreas de Trabajo o Unidades Funcionales Competencia del Sector. Preparado para Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y Banco Interamericano de Desarrollo. INGENIAR Risk Intelligence Ltda. Bogotá.
- ▶ Cardona, O.D. et al. (2022). Producto 5: Análisis de riesgo por el cambio climático. Análisis del Riesgo del Sector de Ambiente y Desarrollo Sostenible ante Escenarios de Variabilidad y Cambio Climático, en Consideración de las Áreas de Trabajo o Unidades Funcionales Competencia del Sector. Preparado para Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y Banco Interamericano de Desarrollo. INGENIAR Risk Intelligence Ltda. Bogotá.

Normatividad y políticas nacionales:

- ▶ República de Colombia. 2018. *Ley 1931 de 2018. Por la cual se establecen directrices para la gestión del cambio climático*. Disponible en: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestor-normativo/norma.php?i=87765>
- ▶ Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS). 2020. *Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC)*. Disponible en: <https://www.minambiente.gov.co/>
- ▶ Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS). 2022. *Política Nacional de Cambio Climático (PNCC)*. Disponible en: <https://www.minambiente.gov.co/>
- ▶ Departamento Nacional de Planeación (DNP). 2022. *Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026*. Disponible en: <https://www.dnp.gov.co/PNDB>
- ▶ República de Colombia. 2020. *NDC - Contribución Determinada a Nivel Nacional actualizada*. Disponible en: <https://www4.unfccc.int/sites/ndcstaging/PublishedDocuments/Colombia%20First/NDC%20Actualizada%20Colombia.pdf>
- ▶ Parques Nacionales Naturales de Colombia (PNNC). 2021. *Plan Estratégico para la Conservación y Adaptación al Cambio Climático*. Disponible en: <https://www.parquesnacionales.gov.co/>

Bases de datos y fuentes técnicas:

- ▶ IDEAM. 2020. *Inventario nacional de ecosistemas y monitoreo ambiental*. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/>
- ▶ Instituto Humboldt, INVEMAR, SINCHI, IAvH. 2018-2022. *Sistemas de Información Ambiental de Colombia*. Disponible en: <https://www.siac.gov.co/>

- ▶ WorldClim. *Global Climate Data*. <https://www.worldclim.org/>
- ▶ CHIRPS. *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data*. <https://www.chc.ucsb.edu/data/chirps>
- ▶ ERA5. *Reanalysis climate data*. <https://cds.climate.copernicus.eu/>
- ▶ Costanza, R., et al. (2014). Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change*, 26, 152-158. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.04.002>
- ▶ Groot, R. de, Brander, L., van der Ploeg, S., et al. (2012). Global estimates of the value of ecosystems and their services in monetary units. *Ecosystem Services*, 1(1), 50–61. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2012.07.005>

Referencias internacionales y metodológicas:

- ▶ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). Sixth Assessment Report (AR6): Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- ▶ United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR). (2015). Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015–2030. <https://www.undrr.org/publication/sendai-framework-disaster-risk-reduction-2015-2030>
- ▶ The Economics of Ecosystems and Biodiversity (TEEB). (2010). Mainstreaming the Economics of Nature. <https://www.teebweb.org/>
- ▶ Costanza, R., et al. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387, 253–260. <https://doi.org/10.1038/387253a0>
- ▶ Millennium Ecosystem Assessment (MEA). (2005). *Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis*. Island Press. <https://www.millennium-assessment.org/en/Synthesis.html>
- ▶ World Bank. (2016). *Unbreakable: Building the Resilience of the Poor in the Face of Natural Disasters*. World Bank Publications. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1003-9>

Otras fuentes y literatura relevante:

- ▶ Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) y BID. (2023). *Guía de integración del riesgo climático en la planificación sectorial*.
- ▶ IDEAM, IAvH, Humboldt, INVEMAR, SINCHI. (2022). *Bases de datos y publicaciones técnicas sobre biodiversidad, servicios ecosistémicos y amenazas climáticas en Colombia*. <https://www.siac.gov.co/>

