



PROGRAMA  
**ESTADO DE LA NACIÓN**

---

Programa Estado de la Nación

---

## Investigación especial

---

Análisis de indicadores de cambio  
climático y proyecciones futuras  
para Costa Rica

**Investigador:**

Lenin Corrales Chaves

San José 2025



PROGRAMA  
**ESTADO DE LA NACIÓN**



CONSEJO  
NACIONAL  
DE RECTORES

333.75  
C823a

Corrales Chaves, Lenin  
Análisis de indicadores de cambio climático y proyecciones futuras para  
Costa Rica / Lenin Corrales Chaves. -- San José, C.R. : PEN, 2025.  
1 recurso en línea (50 páginas): archivos de texto PDF, 1170 KB

ISBN 978-9930-654-82-8  
Investigación especial 2025

1. INDICADORES. 2. CAMBIOS CLIMÁTICOS. 3. MEDIO AMBIENTE. 4.  
BIODIVERSIDAD. 5. AGRICULTURA. 6. COSTA RICA. I. Título.



### Información de la persona autor:

**Lenin Corrales Chaves.** <https://orcid.org/0000-0001-5638-7484>

Esta obra se comparte bajo la licencia  
**Reconocimiento – No Comercial – Compartir Igual**  
**(CC-BY-NC-SA)**

Permite usar una obra para crear otra obra o contenido, modificando o no la obra original, siempre que se cite al autor, la obra resultante se comparte bajo el mismo tipo de licencia y no tenga fines comerciales



Permite usar una obra para crear otra obra o contenido, modificando o no la obra original, siempre que se cite al autor, la obra resultante se comparte bajo el mismo tipo de licencia y no tenga fines comerciales

## Contenido

Principales hallazgos .....	4
Introducción.....	7
Clima pasado y presente en Costa Rica .....	9
Posibles futuros climáticos.....	11
Centroamérica .....	11
Costa Rica .....	14
Temperatura .....	16
Precipitaciones .....	17
Radiación solar y velocidad del viento.....	22
Humedad relativa .....	22
Nivel relativo del mar .....	23
Impactos probables.....	25
Biodiversidad.....	25
<i>Aves</i> .....	26
<i>Bosques</i> .....	26
<i>Fauna marina</i> .....	28
Agricultura .....	29
<i>Palma aceitera</i> .....	29
<i>Café</i> .....	30
<i>Caña de azúcar</i> .....	32
<i>Producción láctea</i> .....	33
<i>Arroz</i> .....	33
Cuencas hidrográficas .....	34
Sistemas costeros .....	35
Emisiones de gases de efecto invernadero (gei).....	37
Emisiones GEI según inventarios nacionales.....	37
Emisiones GEI según monitoreo global.....	39
Impacto de los fenómenos naturales a nivel nacional .....	41
Referencias bibliográficas.....	43
Bases de datos .....	50

## **Principales hallazgos**

- En términos globales a nivel nacional, son escasas las publicaciones que avalan los impactos del clima futuro sobre actividades económicas como la agricultura y la conservación de la biodiversidad, pero si hay un avance importante en el conocimiento de escenarios del clima futuros.
- Ninguna parte del país está al margen del cambio climático antropogénico, pero los impactos y desafíos particulares que enfrentan las personas y los ecosistemas difieren sustancialmente de una región a otra.
- Se prevén aumento en la temperatura en los diferentes períodos y regiones, siendo más pronunciado en algunas áreas y períodos.
- Hacia finales de siglo se prevé transformaciones del clima importantes, con disminución en precipitación y aumento en temperatura en todo el país.
- Se prevé cambios en la temperatura superficial de la Isla del Coco y en la cantidad de días y noches frías en todo el país.
- Bajo escenarios de altas emisiones se observa un aumento en la evapotranspiración, reduciendo el caudal en cuencas del Pacífico y el Caribe Norte.
- El Cantón de la Cruz sufriría cambios en las precipitaciones con tendencias a un futuro más seco y cálido hacia el final del siglo XXI.
- En escenarios de bajas emisiones se observa un incremento de la radiación solar y variabilidad en la velocidad del viento, con impacto en la producción agrícola y generación de energía.
- Se prevé que, para 2070, la mayoría de las especies de aves de la Cordillera de Talamanca experimentarán contracciones significativas en sus rangos de distribución geográficos.

- En el bosque nuboso de Monteverde, se ha observado cambios en la distribución altitudinal de especies de aves ante variaciones en el clima.
- El bosque nuboso ha experimentado un incremento en la temperatura mínima diaria y un aumento en los días secos consecutivos anuales durante los últimos 40 años.
- Es probable que los bosques tropicales experimenten cambios en la distribución de sus zonas de vida como consecuencia de las variaciones climáticas.
- Las zonas de vida situadas en elevaciones más altas demostraron ser más sensibles a las fluctuaciones de temperatura bajo escenarios del clima, mientras que aquellas en elevaciones más bajas mostraron una mayor sensibilidad a las variaciones en la precipitación.
- El bosque seco estacional de tierras bajas, pueden ser especialmente vulnerable a futuros cambios climáticos.
- Un estudio que emplea un sistema de clasificación de regiones fitogeográficas encontró que la mayoría experimentará una disminución en su probable rango de distribución. Sin embargo, algunas regiones, como la región seca del norte y la ladera húmeda del sureste del Caribe, presentan alta incertidumbre respecto a sus distribuciones futuras probables y la dirección de los cambios climáticos.
- Evaluaciones en la distribución del café con escenarios de cambio climático concluye que las tierras altas tienen una alta probabilidad de ser adecuadas para el café bajo todos los escenarios. Sin embargo, existe una superposición de áreas adecuadas para la producción de café y áreas forestales actuales, lo que sugiere que pueden surgir conflictos futuros entre la expansión del café y la conservación del bosque.
- Los cambios en el clima tienen un impacto notable en la distribución de las ballenas jorobadas del Nordeste del Pacífico, con especial énfasis en la subpoblación de América Central.

- Cambios en la temperatura superficial del mar ocasionados por fenómenos como El Niño repercute en la presencia y abundancia de especies específicas de tiburones y rayas en la Isla del Coco.
- La presencia de déficits de precipitación y aumento de la temperatura en el Pacífico central bajo escenarios futuros de clima tiene un impacto directo en la textura y densidad del suelo, resultando en una disminución en los rendimientos de producción de palma aceitera.
- Los pequeños productores de café en Costa Rica han notado cambios significativos en el clima, especialmente en las variaciones de temperatura y patrones de lluvia, complicando así la planificación de sus actividades productivas.
- La adopción de variedades híbridas de café para enfrentar el cambio climático ha sido moderada debido a varios factores, incluyendo el costo de adquisición de las plántulas, la demanda de más mano de obra, aumento en los costos de insumos y la incertidumbre relacionada con el rendimiento a largo plazo.
- La expansión de áreas potenciales para la producción de café esta principalmente ubicada en elevaciones intermedias en el lado de barlovento en las cordilleras de Tilarán y Guanacaste, donde actualmente existen parques nacionales. Este fenómeno podría generar tensiones entre los objetivos de conservación y los intereses agrícolas.
- La caña de azúcar bajo escenarios de cambio climático (2010-2050), muestra una tendencia a la reducción de rendimientos de hasta un 9% en un escenario bajo de emisiones y, en escenarios de altas emisiones, de hasta un 18%.
- El Índice de Temperatura-Humedad (THI), un indicador vital para el bienestar del ganado ya está superando límites preocupantes en algunas regiones de Costa Rica.
- Bajos escenarios de bajas emisiones (2000-2050) el cultivo de arroz en algunas áreas de Guanacaste ven una disminución del 5-10 por ciento en los rendimientos de producción.

- Escenarios de cambio climático muestran un impacto perceptible en el régimen de agua de la cuenca del río Pejibaye. Para el período 2040–2059, se prevé una disminución del 10,9% en la velocidad media del agua y una reducción de 0,1 metros en profundidad.
- En cuencas donde ha ocurrido deforestación se tiene un impacto más pronunciado en el flujo de corrientes de agua que los patrones alterados de precipitación y temperatura.
- En Cahuita, mareas superiores a 0,36 m ya comienzan a inundar áreas del Parque Nacional y en Moín.
- En la ciudad de Puntarenas las inundaciones son propensas a ocurrir durante ascensos paulatinos o extraordinarios del nivel de marea, afectando principalmente a los asentamientos cercanos. Bajo escenarios de aumento del nivel del mar de 150 cm - 200 cm, se prevé inundaciones importantes sobre la ciudad.
- Durante los últimos 63 años, las playas arenosas del Caribe sur experimentaron procesos erosivos fuertes en aproximadamente el 70% de la costa.

## **Introducción**

El cambio climático, un fenómeno global extensamente estudiado en recientes décadas, no excluye con sus impactos a Centroamérica, una región notable por su biodiversidad y su susceptibilidad a fenómenos climáticos extremos. Este informe se adentra en las tendencias climáticas históricas y proyecciones futuras de Costa Rica, poniendo especial énfasis en las fluctuaciones de temperatura y precipitación, y sus consecuencias para el país.

Costa Rica se ubicada en una región donde se anticipan significativas alteraciones climáticas (Giorgi 2006, Rauscher et al. 2008), donde ya ha experimentado algunos de estos cambios en la última mitad del siglo pasado (Aguilar et al. 2005, Malhi & Wright. 2004). Se prevén efectos primordiales como el ascenso del nivel del mar en el Caribe, incremento de las temperaturas superficiales del mar en el Caribe y el Pacífico, y modificaciones en los patrones de precipitación y temperatura del aire (Aguilar et al. 2005, Rauscher et al. 2008). En los

anteriores 60 años, la región ha registrado aumentos de temperatura cercanos a 1°C (Aguilar et al., 2005).

Los datos de las estaciones meteorológicas muestran un aumento general en la frecuencia de noches y días cálidos (de 1.7 y 2.5% por década) y una disminución de días y noches frías (2.2 y 2.4% por década) con extremos que muestran un aumento significativo de 0.2-0.3 ° C por década. El calentamiento es mayor durante la estación húmeda, lo que reduce los contrastes estacionales de temperatura. Las tendencias de la precipitación total anual muestran un aumento no significativo (de 8,7 mm/década), aunque la intensidad de las precipitaciones muestra un aumento significativo en la intensidad de los eventos extremos y muy extremos (de 18,1 y 10,3 mm/década) en la región Centroamericana (Aguilar et al., 2005).

La variabilidad interanual y los recurrentes períodos multianuales de precipitaciones extremas, especialmente en intervalos como 1931-1938, la mayoría de 1939-1947, 1950-1956, y 1971-1978 (Hastenrath & Polzin, 2013), han sido características prominentes del clima en Centroamérica. La región ha vivido episodios de sequía y precipitaciones intensas que han impactado tanto a ecosistemas como a comunidades humanas.

Identificada como un "*hotspot*" de cambio climático en futuros escenarios, Centroamérica muestra un consenso en los modelos climáticos respecto al aumento de la temperatura y la reducción de las precipitaciones (Giorgi, 2006; Imbach et al., 2012; Neelin et al., 2006). Las proyecciones señalan un aumento estadísticamente significativo en la temperatura y las olas de calor en toda la región y durante todas las estaciones para finales de siglo (Biasutti et al., 2012). Además, se anticipa una disminución de las precipitaciones en la mayoría de Centroamérica desde marzo hasta agosto, con un alto acuerdo (>75% de los modelos climáticos) (Biasutti et al., 2012).

Pese a la profusión de estudios y proyecciones, la región enfrenta desafíos considerables en términos de disponibilidad y resolución de datos climáticos. Muchos estudios se basan en salidas directas de Modelos de Circulación General (GCM), que no logran capturar la dinámica climática local (Xu et al., 2005). Aunque se han hecho esfuerzos por simular el clima regional utilizando Modelos Climáticos Regionales (RCMs) (Karmalkar et al., 2011; Nakaegawa et al.,

2013, 2014), los recursos disponibles no permiten estimaciones de incertidumbre en las proyecciones futuras del clima ni en las evaluaciones de impacto.

Centroamérica, está en una encrucijada crítica respecto al cambio climático y con tendencias históricas que denotan patrones de calentamiento, enfrenta proyecciones futuras que sugieren un clima más extremo y variable. La región, rica en biodiversidad y con una población altamente dependiente de sus recursos naturales, debe abordar los desafíos presentados por el cambio climático mediante estrategias de adaptación y mitigación sólidas. La inversión en investigación climática, la optimización de modelos y la implementación de políticas basadas en la ciencia son vitales para proteger el futuro de la región en el contexto del cambio climático global.

## **Clima pasado y presente en Costa Rica**

Costa Rica, se caracteriza por una diversidad climática que es tan rica y variada como su biodiversidad. La marcada influencia de los vientos alisios del norte, que interactúan con la orografía local, genera regímenes de precipitación que, a su vez, determinan dos ecosistemas predominantes: el tropical seco y el tropical lluvioso (Castillo R., 2021).

La distribución bimodal de precipitación en la vertiente del Pacífico, caracterizada por una época seca de noviembre a abril y una época lluviosa de mayo a octubre, es un fenómeno que responde a una amalgama de sistemas. La migración latitudinal de la Zona de Convergencia Intertropical (ITCZ), la variación estacional de la radiación solar, y los vientos de bajo nivel que interactúan con la orografía local, son algunos de los factores que contribuyen a esta distribución (Alfaro, et al., 2018). Esta distribución bimodal se manifiesta en dos máximos, uno de mayo a junio y otro, más pronunciado, de septiembre a octubre, intercalados por un mínimo relativo entre julio y agosto, conocido regionalmente como la sequía de verano o “veranillo” (Magaña, et al., 1999). Este fenómeno, también denominado *Midsummer Drought* (MSD) (Karnauskas, et al., 2013), es un aspecto crucial para entender la dinámica de los ecosistemas y la gestión de los recursos hídricos en la región (Castillo R., 2021).

Por otro lado, la región del Caribe presenta un régimen de lluvias casi continuo a lo largo del año en las áreas costeras, con precipitaciones que aumentan de sur a norte y alcanzan su máximo cerca de la frontera entre Costa Rica y Nicaragua. Este patrón ha sido asociado con la salida del chorro de bajo nivel del Caribe (CLLJ) (Amador, 2008). En las regiones interiores, la actividad convectiva y la interacción del flujo con la cordillera modulan las precipitaciones, aunque a escala local, fenómenos como la brisa marina y las circulaciones entre valle y montaña también juegan un papel importante (Sáenz & Amador, 2016).

El anticiclón subtropical del Atlántico norte (NASH) emerge como el agente impulsor climático más dominante en Costa Rica (Amador, et al., 2016). Su fortalecimiento o debilitamiento modula los vientos alisios del norte que se encuentran cerca del flanco ecuatorial (Alfaro, et al., 2018). Además del NASH, otros mecanismos atmosféricos, como la migración estacional de la ITCZ, la incursión de frentes fríos y la propagación de perturbaciones tropicales, también influyen significativamente en el clima costarricense (Castillo R., 2021).

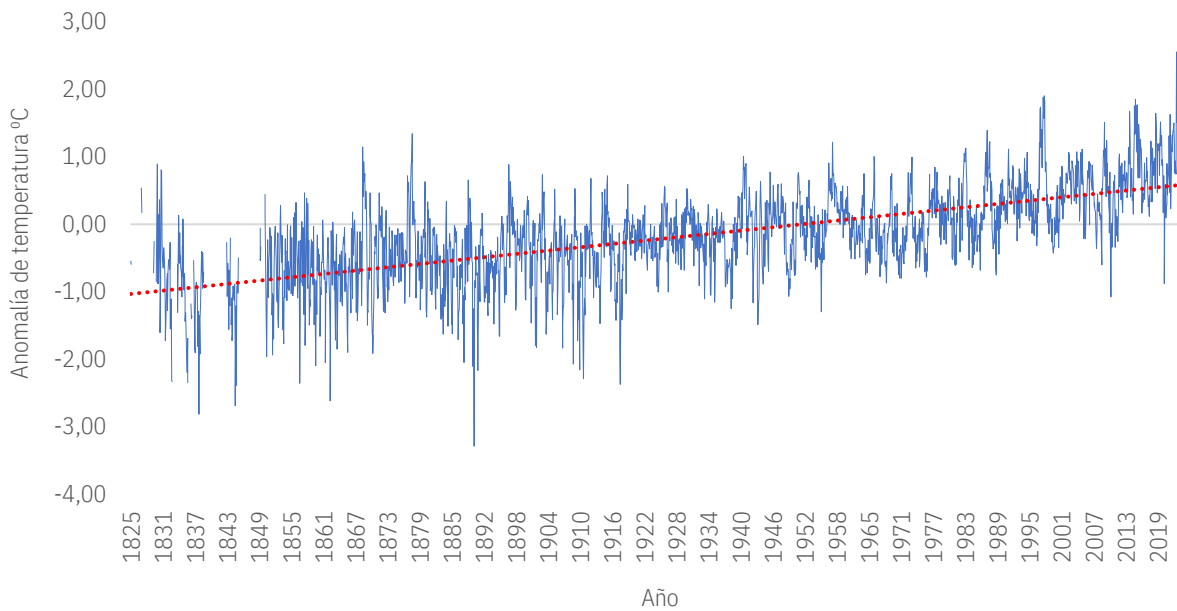
Este mosaico de influencias climáticas y patrones de precipitación en Costa Rica no solo es un fenómeno desde el punto de vista científico, sino que también plantea desafíos y oportunidades en términos de gestión de recursos naturales, conservación de la biodiversidad y desarrollo sostenible. La comprensión detallada de estos patrones y sus influencias subyacentes es esencial para informar las estrategias de adaptación al cambio climático y para garantizar que los ecosistemas únicos de Costa Rica, y las especies que los habitan, puedan prosperar en el futuro.

Hasta el año 2020, Costa Rica ha experimentado un incremento promedio de 1.4 °C en la temperatura superficial terrestre desde la era industrial. Este promedio engloba el calentamiento acaecido tanto en la superficie terrestre como en los océanos. Dado que el calentamiento de la superficie terrestre generalmente ha sido más acelerado que el experimentado en los océanos, naciones como Costa Rica han experimentado un calentamiento más rápido que el promedio global, que para 2020 fue de 1.3 °C (Berkeley Earth, 2022).

En cuanto a la evolución de los extremos climáticos, las temperaturas medias máximas diarias, en el período de 1855-2018, experimentaron una variación de  $29.04 \pm 1.37$  °C en 1855 a  $30.74 \pm 0.24$  °C en 2018, lo que representa una variación de  $+1.70$  °C en 163 años. Por otro lado, la temperatura media mínima diaria varió de  $20.05 \pm 1.03$  °C en 1855 a  $21.23 \pm 0.21$  °C en 2018, lo que se traduce en una variación de  $1.18$  °C en los mismos 163 años. El gráfico 1 ilustra la evolución de las anomalías en la temperatura media para el país en el período 1822-2020, mostrando una tendencia sostenida hacia el calentamiento (Berkeley Earth, 2022).

Gráfico 1

Anomalías de la temperatura media (T °C) en grados centígrados para Costa Rica. 1825-2020



Fuente: Elaboración propia con datos de Berkeleyearth-lbl.gov., 2022.

## Posibles futuros climáticos

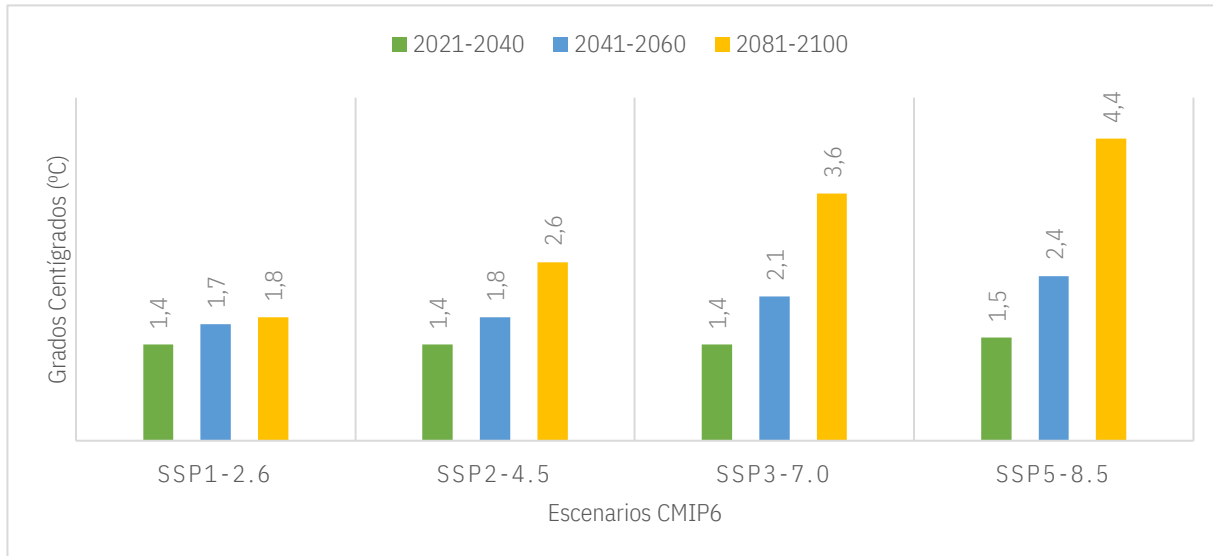
### Centroamérica

En el informe sobre cambio climático AR6 del IPCC, publicado en septiembre de 2021, se evidencia que la variación de la temperatura media (T °C) en grados centígrados en América Central, en relación con el período 1850-1900 y bajo los escenarios CMIP6, podría oscilar entre  $1.4$  °C y  $1.5$  °C para el período 2021-2040. Para el intervalo de tiempo comprendido entre 2041 y 2050, la variación proyectada es de  $1.7$  °C a  $2.4$  °C, mientras que para el período

2081-2100, esta podría situarse entre 1.8 °C y 4.4 °C, dependiendo del escenario que se materialice en función de las actividades antropogénicas globales (gráfico 2).

Gráfico 2

Cambio de la temperatura media (T oC) en grados centígrados en relación con 1850-1900 para la región de América Central-Escenarios CMIP6



Escenarios:

CMIP6 - SSP1-2.6 (relacionado 1850-1900) - Anual (32 modelos)

CMIP6 - SSP2-4.5 (relacionado 1850-1900) - Anual (34 modelos)

CMIP6 - SSP3-7.0 (relacionado 1850-1900) - Anual (30 modelos)

CMIP6 - SSP5-8.5 (relacionado 1850-1900) - Anual (34 modelos)

Fuente de datos: 2021, <https://interactive-atlas.ipcc.ch/>

Por otro lado, el cuadro 1 presenta los factores impulsores del impacto climático en Centroamérica para mediados de siglo, considerando escenarios tales como RCP4.5, SSP3-4.5, SRES A1B, o niveles de calentamiento global que oscilan entre 2 °C y 2.4 °C. Los impulsores del impacto de cambio climático en Centroamérica donde se tiene una confianza alta tanto hacia el aumento o disminución están relacionados con los cambios en la temperatura (calor y frío) y la precipitación. No obstante, impulsores como las fuertes lluvias, aridez, agricultura, sequías hidrológicas y cambio en la velocidad del viento aún presenta una baja confianza lo que implica que aún no se conoce o se tiene claro la dirección del cambio. Por otra parte, en el tema de los ciclones tropicales se tiene una confianza media hacia la intensificación de estos. En síntesis, aun en la región Centroamericana quedan algunos vacíos sobre la dirección de algunos impulsores del cambio climático.

Cuadro 1

Impulsores del impacto climático en Centroamérica para mediados de siglo para los escenarios RCP4.5, SSP3-44 4.5, SRES A1B o niveles de calentamiento global entre 2 ° C y 2.4 ° C, según grado de confianza

Calor y frío					Húmedo y seco					Viento				Costero y Oceánico				Otro						
Temperatura media del aire	Calor extremo	Ola de frío	Helada	Precipitación media	Inundación del río	Fuertes precipitaciones e inundación pluvial	Derrumbamiento	Aridez	Sequía hidrológica	Agricultura y sequía ecológica	Clima de incendio	Velocidad media del viento	Tormenta de viento severa	Ciclón tropical	Tormenta de arena y polvo	Nivel relativo del mar	Inundación costera	Erosión costera	Ola de calor marina	Acidez del océano	Clima de contaminación del aire	CO <sub>2</sub> atmosférico en superficie	Radiación en la superficie	
A	A	B	B											1		B		2			B		A	

- 1 Los ciclones tropicales disminuyen en número, pero aumentan en intensidad
- 2 A lo largo de la costa arenosa y en ausencia de sumideros / fuentes de sedimentos adicionales o cualquier barrera física para el retiro de la costa
- A Surgió en el período histórico (confianza media a alta)
- B Emergente para 2050 al menos en los escenarios RCP8.5/SSP5-8.5 (confianza media a alta)
- Confianza alta en el aumento
- Confianza alta en la disminución
- Confianza media de disminución
- Confianza media de aumento
- Confianza baja en la dirección del cambio
- No es ampliamente relevante

Fuente: Ranasinghe, et al. 2021.

## **Costa Rica**

El gráfico 3 ilustra las proyecciones de calentamiento para Costa Rica y constituye una de las primeras estimaciones localizadas, coherentes con los recientes escenarios de emisiones del informe del IPCC de la ONU. Utilizando los más recientes modelos climáticos CMIP6, el análisis se enfocó en tres de los escenarios más estudiados, conocidos como "Rutas Socioeconómicas Compartidas" (SSP), cada uno reflejando distintas tasas de descarbonización global y reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (Berkeley Earth, 2022).

**SSP1-2.6**, representado por la curva verde, presupone emisiones de gases de efecto invernadero notablemente más bajas, asumiendo un neto de cero emisiones de dióxido de carbono a nivel mundial hacia el 2080. Bajo este escenario, se proyecta que el calentamiento global promedio alcance aproximadamente 1.8 °C para 2100 y 2.3 °C en Costa Rica (Berkeley Earth, 2022).

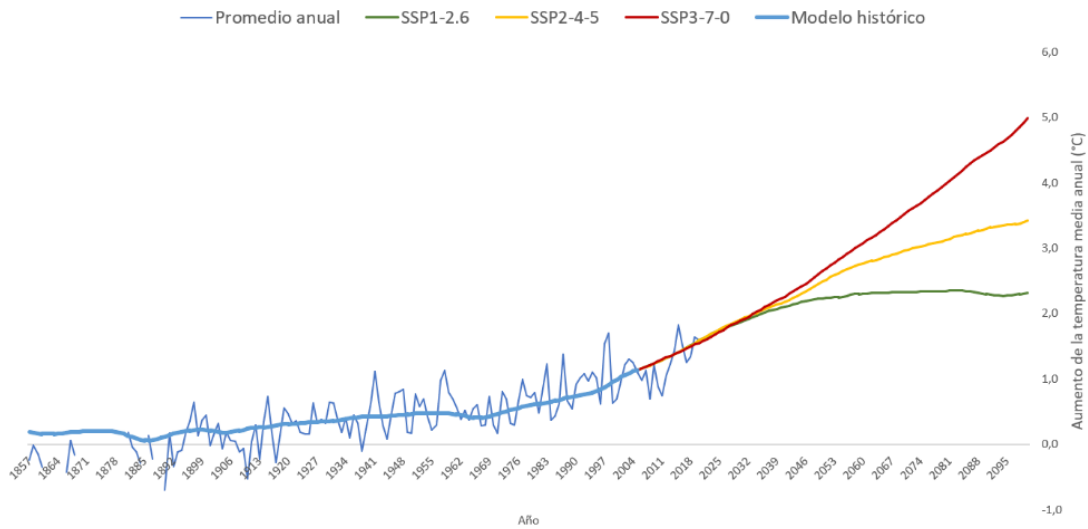
**SSP2-4.5**, ilustrado por la curva naranja, plantea una trayectoria de emisiones futuras intermedia. Este escenario asume que los niveles de emisiones contemporáneas se mantendrán relativamente constantes hasta 2050, para luego decrecer gradualmente. Bajo esta perspectiva, no se alcanza el cero neto para 2100, y se espera que el calentamiento global promedio llegue a aproximadamente 2.7 °C para 2100, continuando su ascenso, y para Costa Rica se prevé un incremento de 3.43 °C. Este escenario es el que más se asemeja al comportamiento actual del mundo respecto a las emisiones (Berkeley Earth, 2022).

**SSP3-7.0**, representado por la curva marrón, es un escenario de emisiones elevadas y alto calentamiento, que presupone que el mundo no solo fracasará en reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, sino que estas continuarán en ascenso. Bajo este escenario, se asume que las emisiones de dióxido de carbono se duplicarán para 2100; la temperatura global promedio alcanzaría aproximadamente 3.6 °C por encima de la línea de base preindustrial y, para Costa Rica, se espera un aumento de 4.99 °C, más del doble de los niveles actuales de calentamiento (Berkeley Earth, 2022).

Es crucial subrayar que ningún escenario es considerado más probable que otro. Los resultados futuros dependerán íntegramente de las decisiones que miembros de la sociedad civil, sector privado y gobiernos tomen respecto al uso de combustibles fósiles y las emisiones relacionadas. Aún es posible optar por un futuro de bajas emisiones, un futuro de altas emisiones, o cualquier punto intermedio (Berkeley Earth, 2022).

Gráfico 3

Proyecciones de calentamiento de Costa Rica bajo tres escenarios SSP de CMIP6.1860-2100



Fuente: Berkeley Earth, 2022.

Los datos previamente presentados reflejan valores globales a nivel nacional; sin embargo, es imperativo reconocer que el calentamiento exhibido no es homogéneo en todas las regiones climáticas del país ni constante en todos los períodos de tiempo. Por ende, resulta esencial visualizar los escenarios considerando diversas temporalidades, niveles de emisiones y regiones específicas del país. A continuación, se presentan proyecciones climáticas para la nación, fundamentadas en escenarios de emisiones RCP2.6 y RCP8.5 proveniente del AR5 y estructuradas en tres períodos temporales: corto (2010-2039), mediano (2040-2069) y largo plazo (2070-2099). Estas proporcionan una perspectiva detallada y regionalizada de las posibles consecuencias futuras.

## **Temperatura**

Bajo el escenario RCP2.6, que asume bajas emisiones, las variaciones de temperatura pueden parecer sutiles a primera vista. No obstante, un análisis detallado revela tendencias claras. Para el período de largo alcance (2070-2099), se espera un aumento de temperatura de entre +0.3°C y 0.5°C en relación con otros períodos. A lo largo de todos los intervalos analizados, se proyecta un incremento de 1°C a 2°C en comparación con el clima actual. Es notable que las regiones de la Vertiente del Caribe y la Zona Norte experimenten incrementos térmicos ligeramente mayores que la Vertiente del Pacífico (Alvarado L., 2021).

En el escenario RCP8.5, asociado a altas emisiones, el período corto (2010-2039) refleja un aumento de temperatura de 1.1°C a 1.6°C. Este calentamiento es más pronunciado en las regiones del Caribe y Zona Norte, y menos en la vertiente del Pacífico. Para el período medio (2040-2069), el aumento varía entre 2.4°C y 2.8°C, siendo más intenso en la cordillera de Talamanca, Volcánica Central y Zona Norte, y menos en el Pacífico Norte y Central. En el período de largo alcance, el incremento fluctúa entre 3.8°C y 4.8°C, afectando más a las zonas de la cordillera de Talamanca, Valle Central y Pacífico Norte, coincidiendo con la cuenca del río Tempisque (Alvarado L., 2021).

El ciclo anual de temperaturas máximas y mínimas en el Pacífico Norte presenta patrones característicos. Se anticipa un aumento de 2°C a 5°C para mediados y finales de siglo, respectivamente, en la mayoría del cantón de La Cruz, y un incremento menor en zonas elevadas (Hidalgo H., et al. 2021). Otros estudios señalan un crecimiento en la media y variabilidad de la temperatura superficial del aire anual en la Isla del Coco, que, a pesar de su distancia del continente, sigue la misma tendencia creciente en escenarios futuros (Maldonado T. y Alfaro E. 2012). La elevación de la temperatura del período medio al largo es mayor que del corto al medio, especialmente en junio y septiembre, lo que sugiere una posible intensificación del calentamiento hacia el final del siglo. Es importante destacar que, a lo largo del siglo, se prevé un aumento de la temperatura máxima en agosto, relacionado con el veranillo o canícula de ese mes (Alvarado L., 2021).

Además, las proyecciones basadas en el RCP8.5 pronostican una transformación drástica del clima hacia el final del siglo, con una disminución significativa en la precipitación anual y un aumento considerable en la temperatura, especialmente en la mínima (~4°C). Investigaciones en la estación 84003, ubicada en La Argentina, Grecia, CR, sugieren que la cantidad de días y noches frías disminuirá considerablemente, mientras que los días y noches cálidos aumentarán en un 80% y 33%, respectivamente. Se estima que el promedio anual de noches tropicales crecerá en unos 267 días y que la precipitación anual promedio se reducirá en un 31% (Aguilar E., et al. 2005).

## **Precipitaciones**

Bajo el escenario RCP 2.6, asociado a bajas emisiones, las precipitaciones varían según el período de tiempo considerado. En el corto plazo (2010-2039), se anticipa un aumento de lluvias en determinadas regiones, mientras que el período medio (2040-2069) refleja una disminución general. En el largo plazo (2070-2099), las precipitaciones muestran un patrón regional: incrementos en el Pacífico y descensos en el Caribe y Zona Norte. Específicamente, se espera un aumento notable de lluvias en las laderas orientales de la cordillera de Guanacaste, mientras que áreas como el Valle Central y el Caribe Sur podrían ver reducciones de hasta 400 mm (Alvarado L., 2021).

En contraste, el escenario RCP 8.5, que contempla altas emisiones, señala una disminución general de las precipitaciones de 2020-2039 a 2040-2069, especialmente en el sur del país. No obstante, para 2070-2099, las lluvias se intensifican en ciertas regiones, mientras que otras enfrentan condiciones más áridas. En el sur, por ejemplo, las precipitaciones de 6.000-7.000 mm en 2020-2039 disminuyen a 4.000-5.000 mm en 2040-2069. Sin embargo, en la cordillera de Guanacaste y sus laderas orientales, se observa un aumento. Para 2070-2099, las precipitaciones crecen en áreas como la cordillera central, la cordillera de Talamanca y el Caribe, mientras que otras zonas, como la ladera oriental de la cordillera de Guanacaste, experimentan menos lluvias (Alvarado L., 2021). A pesar de estos cambios en las precipitaciones, el aumento en la evapotranspiración debido al calentamiento supera estos efectos, resultando en una reducción del caudal en cuencas del Pacífico y disminuciones en el Caribe Norte. Esta información es crucial, ya que indica que el Pacífico Norte, una región ya de

por sí seca, podría enfrentar una aridez aún mayor, exacerbando las vulnerabilidades sociales y económicas de la zona, parte del Corredor Seco Centroamericano (Hidalgo H., 2022).

En el cantón de La Cruz, en el Pacífico Norte, las proyecciones indican cambios moderados en las precipitaciones para 2040-2060, incluso en escenarios menos optimistas. Sin embargo, hacia 2079-2099, se prevé una reducción de hasta el -10% en la precipitación en áreas específicas del cantón. En general, se espera que La Cruz comience a experimentar una disminución en las precipitaciones a partir de 2040, con temperaturas en ascenso y una reducción significativa en la escorrentía total, esencial para el suministro de agua. Estas tendencias sugieren un futuro más seco y cálido para La Cruz al final del siglo XXI (Hidalgo H., et al. 2021).

Un estudio en cuencas específicas, utilizando cinco Modelos de Circulación General (GCMs) y considerando escenarios RCP 2.6, 4.5 y 8.5, proyecta condiciones más húmedas en el corto y mediano plazo bajo RCPs 2.6 y 4.5. Sin embargo, el largo plazo bajo RCP 8.5 anticipa condiciones más secas. Estos cambios en el flujo hídrico podrían resultar en inundaciones, sequías y escasez de agua más frecuentes en comparación con patrones históricos (Mendez M., et al 2022).

El siguiente cuadro muestra los resultados de modelos climáticos, simulando precipitaciones del período histórico (1961-1990) basados en datos de estaciones meteorológicas. Se consideran dos escenarios de emisiones RCP (4.5 y 8.5) para las cuatro estaciones del año y seis regiones climáticas del país (Alvarado L., 2021).

El mapa 1 muestra la precipitación media anual histórica (1970-2000), la anomalía de precipitación del trimestre más seco, la anomalía de precipitación del trimestre más húmedo, la temperatura media anual histórica (1970-2000), la anomalía de temperatura del trimestre más seco, y la anomalía de temperatura del trimestre más húmedo para el país en al 2050 bajo el escenario de cambio climático ssp245 del CMIP6.

**Cuadro 2**

**Cambios en la precipitación para todas las regiones climáticas del país para dos escenarios de emisiones RCP (4.5 y 8.5)**

Región Climática	2011-2040	2041-2070	2071-2100	Observaciones
<b>Pacífico Norte</b>	Déficit porcentuales máximos de 5% para marzo-mayo de 2011-2040	15% para marzo-mayo del 2041-2070	15-30% en junio-agosto de 2071-2100	Tendencias negativas de la lluvia en casi todas las temporadas, con una canícula que cada vez se vuelve menos lluviosa con respecto al clima de 1961-1990. Solo la temporada setiembre-noviembre no mostró desviaciones significativas, es decir, los montos estimados son similares a los del clima actual.
<b>Pacífico Central</b>		5%- 10% en marzo-mayo de 2041-2070	10%-20% en junio-agosto del 2071-2100	El déficit aumenta gradualmente con el tiempo lo que implica una canícula más acentuada para finales de siglo. El periodo setiembre-noviembre tampoco exhibió cambios significativos con respecto a la norma climática (1961-1990), lo que significa que se mantendrá como el periodo más lluvioso del año.
<b>Pacífico Sur</b>	Se manifiesta un patrón de tendencia parecido al del resto del Pacífico. Presenta déficit muy homogéneo del 10%-15% desde diciembre hasta agosto, aunque el déficit aumenta un poco más en el período de la canícula (de hasta un 20% menos). No se observan cambios en el período normalmente lluvioso de setiembre-noviembre			

Región Climática	2011-2040	2041-2070	2071-2100	Observaciones
<b>Valle Central</b>	Manifiesta un patrón de tendencia parecido al de las regiones del Pacífico. Es de las pocas regiones donde el escenario RCP4.5 genera niveles de lluvia más bajos que los del RCP8.5, particularmente en el 2041-2100. En diciembre-febrero se registran los porcentajes más bajos (de hasta un 20% menos). El período de la canícula muestra una disminución menos acentuada que las otras regiones (del 10% al 15%). Tampoco se presentan cambios importantes en el período normalmente lluvioso de setiembre-noviembre.			
<b>Zona Norte</b>	En esta región también el escenario RCP4.5 genera en el 2041- 2070 cambios negativos más bajos que el RCP8.5 para cualquiera de las temporadas. En general se observan cambios poco significativos, salvo entre junio-agosto, que presentan una disminución posterior al 2041 de un 10% al 15% entre setiembre y febrero, independientemente del escenario de emisiones y el horizonte de tiempo.			
<b>Región Caribe</b>	Es la región de mayor variabilidad ya que presenta cambios positivos y negativos en función de la temporada, el escenario de emisiones y el horizonte de tiempo. Las temporadas con comportamientos totalmente opuestos son las de diciembre-febrero y setiembre-noviembre. En la primera se observa una tendencia negativa que se acentúa en el 2071-2100 con un déficit del 10% (para ambos escenarios RCP8.5 y 4.5), mientras que en setiembre-noviembre todos los escenarios indican cambios positivos con una definida y significativa tendencia positiva que alcanza los niveles más altos en el 2071-2100 para el escenario RCP8.5.			

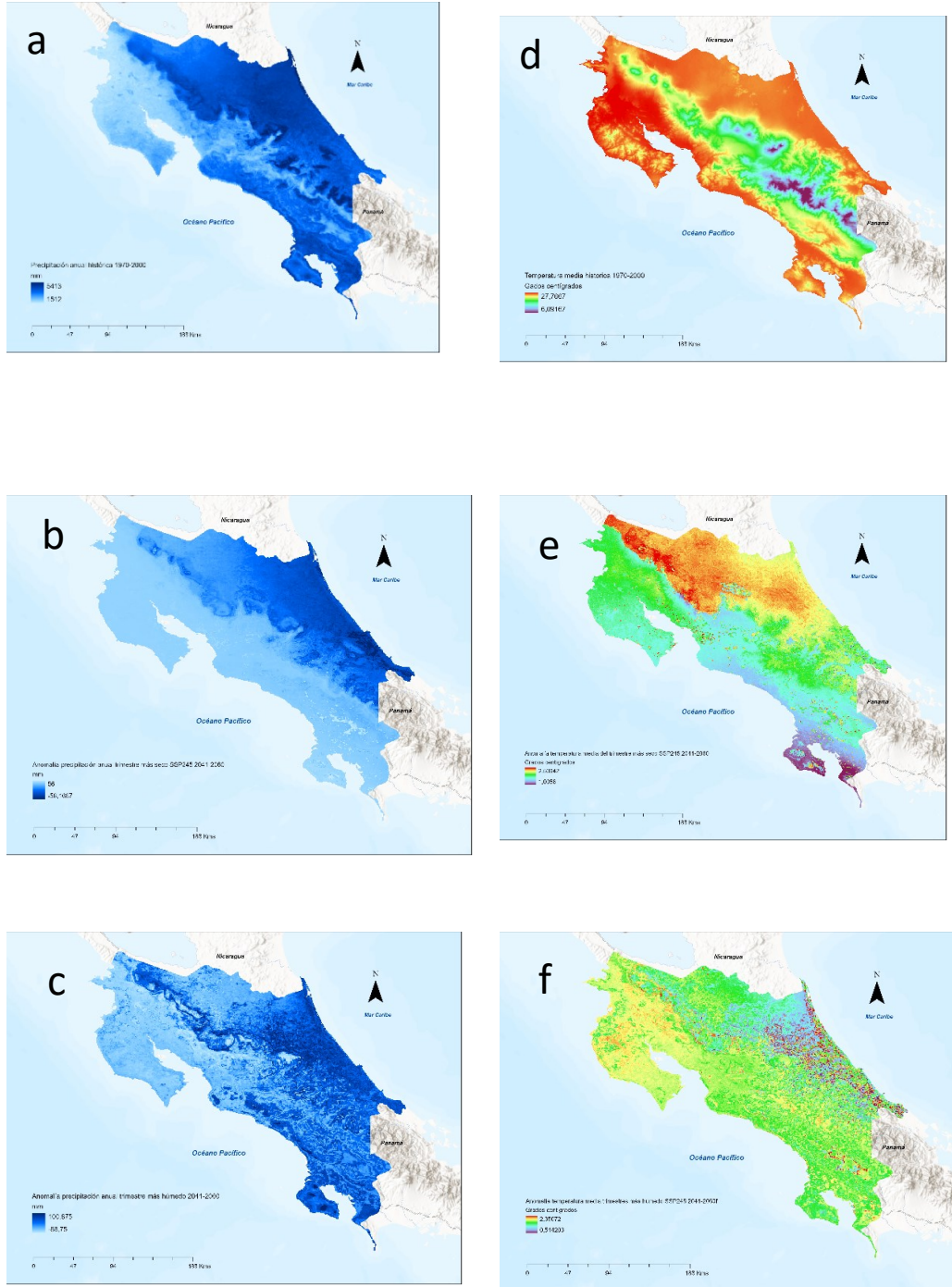
Fuente: Mendez et al. 2020<sup>1</sup> y Alvarado L., 2021.

---

<sup>1</sup> Mendez M., et al 2020.

Mapa 1

(a) Precipitación media anual histórica (1970-2000); (b) Anomalía de precipitación del trimestre más seco; (c) Anomalía de precipitación del trimestre más húmedo; (d) Temperatura media anual histórica (1970-2000); (e) Anomalía de temperatura del trimestre más seco; (f) Anomalía de temperatura del trimestre más húmedo en el 2050 bajo el escenario de cambio climático ssp245 del CMIP6



Fuente: Elaboración propia con datos de IPCC-DDC, 2023.

## **Radiación solar y velocidad del viento**

En el escenario RCP2.6, la radiación solar tiende a incrementarse con el tiempo, lo que podría afectar tanto la producción agrícola (rendimientos más altos si hay una combinación equilibrada de luz, agua y nutrientes; disminución en la producción si se produce estrés hídrico y sequías; daños a las plantas por exceso de UV, cambio en la prevalencia de plagas y enfermedades e impacto sobre la calidad y fertilidad del suelo) como la generación de energía solar (en lo positivo puede llevar a un aumento en la generación; en lo negativo conlleva al sobre calentamiento de los equipos). En cuanto a la velocidad del viento, se observa un aumento sostenido hasta 2070, seguido de una disminución hacia 2100. Este comportamiento podría tener repercusiones en la generación de energía eólica. Las velocidades más elevadas se detectan en las costas del Pacífico Norte y en las cordilleras, anticipándose un incremento progresivo de las velocidades del viento a nivel nacional (Alvarado L., 2021).

Para el escenario RCP8.5, se proyecta un incremento inicial de la radiación solar en varias regiones, incluyendo ambas costas, el Pacífico Norte, la Zona Norte, el Valle Central y las zonas bajas del Pacífico Sur. Sin embargo, se espera una disminución en el largo plazo, particularmente en la región Caribe y el Pacífico Sur (Alvarado L., 2021).

## **Humedad relativa**

A pesar de las fluctuaciones en temperatura y precipitación, la humedad relativa parece mantenerse estable en el escenario RCP2.6. Esta constancia es significativa, dado que la humedad influye en la sensación térmica y en la salud de los ecosistemas. En resumen, el escenario RCP2.6, aunque refleja bajas emisiones de gases de efecto invernadero, indica cambios climáticos de importancia para Costa Rica. Aunque estos cambios puedan parecer menores, tienen el potencial de afectar de manera significativa la vida, economía y ecosistemas del país. Es esencial que Costa Rica, al igual que otros países, persista en sus esfuerzos de mitigación y adaptación ante los retos futuros del cambio climático (Alvarado L., 2021).

En el escenario RCP8.5, se proyecta un aumento generalizado de la humedad relativa en todo el país, vinculado al calentamiento global. Las regiones del Pacífico experimentarán los incrementos más notables, especialmente en la península de Nicoya y el Pacífico Central. En estas áreas, el aumento será del 16% al 20% para los dos primeros períodos (2010-2039 y 2040-2069), y hacia finales de siglo, el incremento será ligeramente menor (12% a 16%). En la Zona Norte y la región Caribe, los aumentos de humedad serán inferiores al 10%, independientemente del período considerado (Alvarado L., 2021).

### **Nivel relativo del mar**

El calentamiento global, producto de la acumulación de GEI, ha desencadenado una serie de respuestas en los sistemas oceánicos y de la criósfera de la Tierra. La expansión térmica de los océanos y el derretimiento de las capas de hielo y glaciares contribuyen directamente al aumento del nivel del mar. Entre 1901 y 2018, el nivel medio del mar global se elevó en 0.20 [0.15 a 0.25] m, con una aceleración notable en las últimas décadas, siendo la influencia humana un motor probable de estos incrementos desde 1971. La tasa promedio de aumento del nivel del mar fue de 1.3 [0.6 a 2.1] mm año<sup>-1</sup> entre 1901 y 1971, aumentando a 1.9 [0.8 a 2.9] mm año<sup>-1</sup> entre 1971 y 2006, y aumentando aún más a 3.7 [3.2 a 4.2] mm año<sup>-1</sup> entre 2006 y 2018 (alta confianza). Este ascenso no es uniforme; varía regionalmente debido a factores como la topografía oceánica, las corrientes marinas y los patrones climáticos (IPCC, 2023).

Centroamérica, una región caracterizada por su biodiversidad y vulnerabilidad ante fenómenos climáticos, ha experimentado un aumento del nivel del mar superior al observado en otras regiones del Atlántico. Entre 1984 y 2015, las costas arenosas de esta región han retrocedido aproximadamente un metro anual, una cifra que pone en riesgo los ecosistemas costeros y las comunidades humanas que dependen de ellos. Este fenómeno no solo amenaza la integridad territorial, sino que también potencia la ocurrencia de eventos extremos como inundaciones y erosión costera, afectando la biodiversidad, la infraestructura y las economías locales (IPCC, 2023).

En relación con 1995-2014, es probable que el aumento del nivel medio del mar global bajo el escenario de emisiones de GEI SSP1-1.9 será de 0.15-0.23 m para 2050 y de 0.28-0.55 m para 2100; mientras que para el escenario de emisiones de GEI SSP5-8.5 es de 0.20-0.29 m para 2050 y de 0.63-1.01 m para 2100 (confianza media). Durante los próximos 2000 años, el nivel medio del mar global aumentará en aproximadamente 2-3 m si el calentamiento se limita a 1.5°C y 2-6 m si se limita a 2°C (baja confianza) (IPCC, 2023).

El cambio en el nivel medio del mar en el Golfo de Nicoya muestra una tendencia de incremento promedio de 0.776 mm/año para el período 1992-2022, mientras que para Puerto Limón el incremento promedio es de 0.915 mm/año (gráfico 4) lo que evidencia que las costas tanto del Pacífico como del Caribe se encuentran sufriendo transformaciones producto de este proceso de expansión térmica del mar y deshielo de los casquetes polares, entre otras, producidas por el calentamiento global del planeta (NASA-IPCC.2023)

El cuadro 3 muestra la tendencia de aumento del nivel del mar en Puerto de Limón y Golfo de Nicoya para el período 2050 y el gráfico 4 muestra la tendencia al año 2100 para ambas regiones.

### Cuadro 3

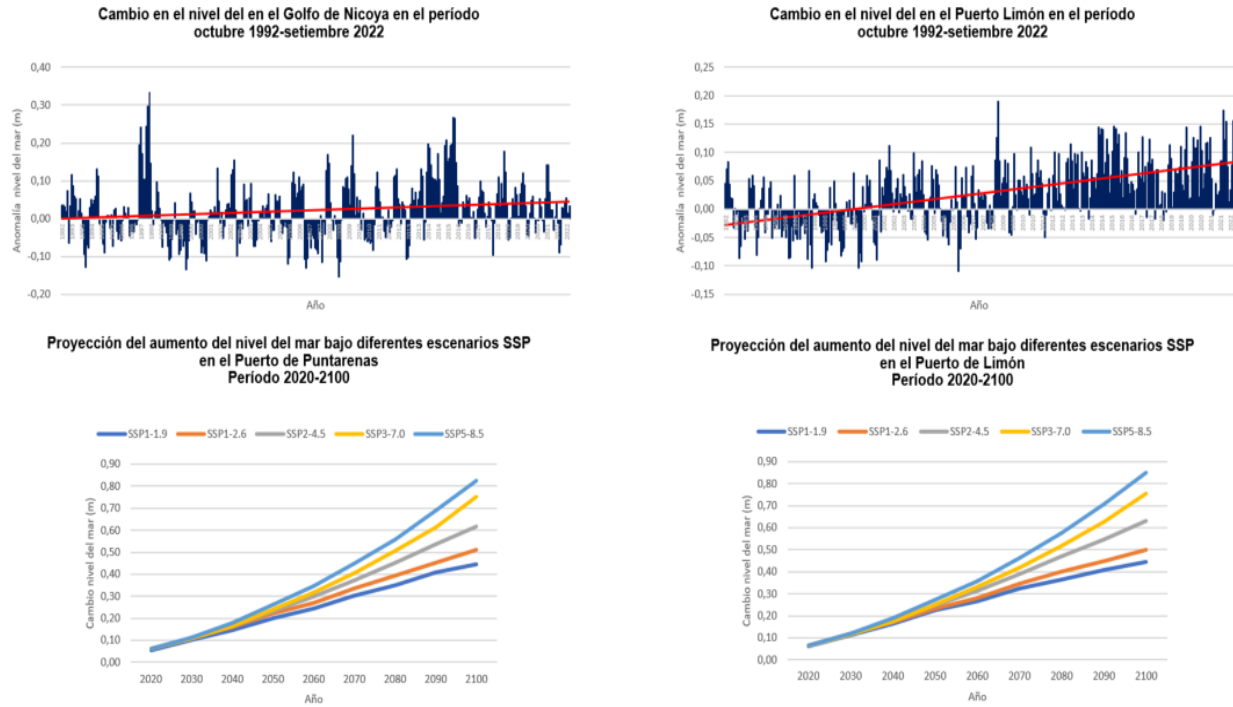
Escenarios de aumento del nivel del mar en el Puerto de Limón y Puerto de Puntarenas para el período 2030 a 2050 relativas al período 1995-2014 según escenarios de cambio climático del sexto informe de cambio climático del IPCC

Escenario	2030		2040		2050	
	Puerto Limón	Golfo de Nicoya	Puerto Limón	Golfo de Nicoya	Puerto Limón	Golfo de Nicoya
SSP1-1.9	0,11 m	0,10 m	0,16 m	0,15 m	0,22 m	0,20 m
SSP1-2.6	0,12 m	0,11 m	0,17 m	0,16 m	0,23 m	0,22 m
SSP2-4.5	0,12 m	0,11 m	0,17 m	0,16 m	0,25 m	0,23 m
SSP3-7.0	0,11 m	0,11 m	0,17 m	0,16 m	0,25 m	0,24 m
SSP5-8.5	0,12 m	0,11 m	0,19 m	0,18 m	0,27 m	0,26 m

Fuente: NASA-IPCC, 2023.

Gráfico 4

Cambio del nivel del mar histórico (1992-2022) para el Golfo de Nicoya (Izquierda) y Puerto Limón (Derecha) y proyección del aumento del nivel del mar bajo diferentes escenarios SSP-AR6 para el período 2020-2100 para el Golfo de Nicoya (Izquierda) y Puerto Limón (derecha)



Nota: Cambio del nivel del mar para escenarios SSP resultante de procesos en cuya proyección hay una confianza media. Las proyecciones son relativas a una línea base de 1995-2014. Se utiliza el Cuantil 50 de los datos.

Fuente datos escenarios AR6: Fox K., et al, 2021; Garner G., 2021

Fuente datos aumento nivel del mar histórico: NASA, 2023.

## Impactos probables

### Biodiversidad

Diversos estudios, basados tanto en datos históricos como en la modelación de escenarios climáticos, han evidenciado cambios en la distribución de especies y ecosistemas, vinculados a las alteraciones climáticas. No obstante, es crucial destacar que, a nivel nacional, son escasas las publicaciones que avalan los impactos del clima futuro sobre la biodiversidad.

## **Aves**

En la Cordillera de Talamanca, la relación entre el cambio climático y las aves se ha vuelto cada vez más crítica, mostrando una conexión tangible entre las alteraciones climáticas y la biodiversidad. Se prevé que, para 2070, la mayoría de las especies de aves (48 especies) experimentarán contracciones significativas en sus rangos geográficos, variando entre un promedio del 15% bajo un escenario de cambio climático moderado (RCP 2.6) y un 40% en un escenario más severo (RCP 8.5). Este escenario se agrava al considerar presiones adicionales como la pérdida de hábitat, lo que podría oscurecer drásticamente las perspectivas de conservación para estas especies, subrayando la urgencia de estrategias de conservación integradas y proactivas (Liu et al., 2020).

En el bosque nuboso de Monteverde, dos especies de Parulidae, *Myioborus torquatus* y *M. miniatus*, han elevado su distribución altitudinal hasta 1.710 m, casi 200 metros más que en estudios previos, en respuesta a un incremento en la temperatura mínima diaria y un aumento en el número de días secos consecutivos anuales durante las últimas cuatro décadas (Nitta. B., 2009). Este cambio en la distribución conlleva a que las especies lleguen a ocupar nuevos nichos ecológicos entrando en competencia con las especies residentes.

## **Bosques**

El bosque nuboso ha experimentado un incremento en la temperatura mínima diaria y un aumento en los días secos consecutivos anuales durante los últimos 40 años, afectando los períodos de floración de la mayoría de las especies, ya que estas florecen en relación con una combinación de enfriamiento estacional y períodos secos acumulados, los cuales han variado desde principios de la década de 1980 (Travers, S. E., & Dochtermann, N. A., 2022).

Se han llevado a cabo numerosos estudios enfocados en observar las alteraciones en las zonas de vida de Holdridge. Uno de estos estudios señala que es probable que los bosques tropicales experimenten cambios en la distribución de sus zonas de vida como consecuencia de las variaciones climáticas. Las zonas de vida situadas en elevaciones más altas demostraron ser más sensibles a las fluctuaciones de temperatura, mientras que aquellas en elevaciones más bajas mostraron una mayor sensibilidad a las variaciones en la precipitación. En un escenario

climático extremadamente húmedo y cálido, la diversidad de zonas de vida regionales se redujo de manera significativa (Enquist, C. A. F. (2002).

Un estudio adicional identificó un incremento notable en las temperaturas, específicamente de 2.6°C con una variabilidad espacial de  $\pm 0.4^\circ\text{C}$ , para Costa Rica hasta el año 2040, presentando variaciones locales, como temperaturas más elevadas proyectadas para el sur del Caribe costarricense. La precipitación anual media futura reveló condiciones ligeramente más húmedas ( $120 \pm 43$  mm/año), siendo más pronunciadas en el Caribe costarricense y el sur del Pacífico, sin un secado significativo en el norte de Costa Rica para 2040. Esto sugiere que los cambios en las zonas de vida son más propensos a ocurrir debido a temperaturas más elevadas y, en menor medida, a condiciones proyectadas más húmedas. Los cambios son más probables en elevaciones más altas, con una posible pérdida del ecosistema de selva tropical subtropical. Las proyecciones respaldan la disminución de los bosques tropicales secos y un leve incremento de los bosques tropicales húmedos y lluviosos en los corredores biológicos de las regiones más secas y húmedas, respectivamente. Para 2040, se proyecta una predominancia de los bosques tropicales húmedos en todo el país (aumento del 24% al 49%), en detrimento de otras zonas de vida (Birkel et al., 2021).

Las zonas de vida vinculadas a la elevación, así como el bosque seco estacional de tierras bajas, pueden ser especialmente vulnerables a futuros cambios climáticos. Es probable que las regiones geográficas en Costa Rica que albergan estas zonas de vida necesiten una atención especializada en términos de gestión y conservación ante los anticipados cambios climáticos.

Un estudio que emplea un sistema de clasificación de regiones fitogeográficas encontró que la mayoría experimentará una disminución en su probable rango de distribución. Sin embargo, algunas regiones, como la región seca del norte y la ladera húmeda del sureste del Caribe, presentan alta incertidumbre respecto a sus distribuciones futuras probables y la dirección de los cambios climáticos. Para propósitos de diseño de espacios de conectividad tomando en cuenta el cambio climático se encontró que las direcciones de la temperatura están dominadas por el gradiente altitudinal, ya que la altitud es el principal controlador de la temperatura en la

región y que la dirección de la precipitación no mostró patrones claros, limitando su uso para definir vías de conectividad (Fung E. et al., 2017).

Por otro lado, un estudio que evalúa la distribución del café con escenarios de cambio climático concluye que las tierras altas tienen una alta probabilidad de ser adecuadas para el café bajo todos los escenarios. Sin embargo, existe una superposición de áreas adecuadas para la producción de café y áreas forestales actuales, lo que sugiere que pueden surgir conflictos futuros entre la expansión del café y la conservación del bosque, especialmente porque muchas de estas áreas son actualmente Parques Nacionales u otras categorías de manejo de áreas silvestres protegidas (Coto F. et al., 2017).

### ***Fauna marina***

Los cambios en el clima tienen un impacto notable en la distribución de las ballenas jorobadas del Nordeste del Pacífico, con especial énfasis en la subpoblación de América Central. Se ha determinado una correlación entre eventos climáticos, como El Niño y las olas de calor marino, y la reducción de avistamientos de ballenas y sus crías en sus áreas reproductivas en Costa Rica. En períodos de calentamiento intensivo y prolongado, como el evento El Niño 2015-2016 y la ola de calor marino 2014-2016, se registraron drásticas disminuciones en las tasas de encuentro de pares de adultos y madre-cría. Además, las ballenas jorobadas, adaptándose a las alteraciones en la disponibilidad y distribución de presas inducidas por anomalías en la Temperatura Superficial del Mar (SST) y otros eventos climáticos, están reajustando su distribución local y optando por alimentarse en latitudes más altas o áreas más costeras. La persistencia de temperaturas elevadas en sus áreas de reproducción, ya de por sí entre las más cálidas del Pacífico Norte, podría propiciar futuros desplazamientos de hábitat (Pelayo G. et al. 2022).

Por otro lado, investigaciones realizadas en la Isla del Coco revelaron una significativa variabilidad de un lugar a otro en la presencia de especies de tiburones, aunque todas las localidades responden de manera similar ante los eventos de El Niño. Se concluye que El Niño repercute en la presencia y abundancia de especies específicas; por ejemplo, el tiburón martillo (*Sphyrna lewini*) y la raya moteada (*Taeniura meyeni*) disminuyen su presencia durante El Niño (Sibaja-Cordero, 2008). Esto sugiere que los posibles efectos de la variabilidad

climática sobre los recursos naturales del Parque Nacional Isla del Coco resultan en una disminución en la abundancia de especies vitales para el turismo, como el tiburón martillo. Esto podría traducirse en reducciones de hasta un 30% en los ingresos derivados de la existencia del PNIC, debido a la disminución de turistas (Moreno M., 2012).

## **Agricultura**

La agricultura constituye una de las actividades que más se prevé sufra afectaciones por los cambios en el clima, sin embargo, es poca la evidencia que hay en el país sobre los efectos a la diversidad de cultivos existentes.

### ***Palma aceitera***

Una de las actividades sobre las que se ha evaluado el impacto del cambio climático es en la producción de palma aceitera en la región del Pacífico Central de Costa Rica, destacando la importancia de abordar esta problemática desde una perspectiva integral y sostenible.

La investigación revela que, bajo los escenarios RCP 2.6 y RCP 8.5, se prevén déficits de precipitación y aumentos de temperatura en la mencionada región, los cuales se intensificarán a medida que avance el siglo. Además, se anticipa una intensificación de las olas de calor para el período 2080–2099 (RCP 8.5). Este fenómeno climático no solo afecta las condiciones ambientales, sino que también tiene un impacto directo en la textura y densidad del suelo, elementos cruciales para la producción agrícola. Los resultados del estudio muestran una disminución en los rendimientos de producción de palma aceitera, donde se espera una reducción en la producción del 7,86% para el período 2040-2059 (RCP 2.6) y del 37,86% para 2080-2099 (RCP 8.5), en comparación con la producción media de la línea base (Watson F., et al. 2023).

En ambos escenarios, se observa un incremento en los requerimientos hídricos del cultivo de palma aceitera durante la estación seca. A medida que el escenario se intensifica (menor precipitación y aumento de la temperatura), el agua disponible en el suelo disminuye, incrementando los requerimientos de riego de la palma aceitera (Watson F., et al. 2023).

## **Café**

El cultivo del café en Costa Rica ha sido un pilar fundamental tanto en su economía como en su cultura, destacándose como una de las actividades agrícolas más extensas y profundamente arraigadas en el país. A pesar de que las exportaciones de café representan un porcentaje relativamente pequeño del Producto Interno Bruto (PIB) y del total de ingresos por exportaciones, su impacto en la economía de los agricultores locales y sus familias es indiscutiblemente significativo (Coto F. et al., 2017).

Los pequeños productores de café en Costa Rica han notado cambios significativos en el clima, especialmente en las variaciones de temperatura y patrones de lluvia, complicando así la planificación de sus actividades productivas. La combinación de aumento de temperatura, alteración de los patrones de precipitación y la creciente incidencia de eventos hidrometeorológicos extremos afecta adversamente el cultivo de café. Estos cambios climáticos impactan no solo la producción de café de manera significativa, sino que también la variación en la precipitación puede influir en la floración, el tejido foliar y el ciclo de vida de plagas y enfermedades, entre otros aspectos (Viguera B., 2019).

A pesar de los impactos negativos del cambio climático en sus cultivos y modos de vida, los pequeños caficultores costarricenses han empezado a implementar diversas prácticas de manejo en sus fincas para adaptarse a estas nuevas condiciones. No obstante, los esfuerzos actuales parecen ser insuficientes para satisfacer sus necesidades de adaptación, destacando así la necesidad de promover la inclusión de acciones de adaptación más efectivas y generalizadas para incrementar su uso y eficacia (Viguera B., 2019).

En un estudio realizado en 2018 en 26 fincas, se observó que la mayoría de las fincas (57,7%) se encontraban en categorías de vulnerabilidad moderadamente crítica y crítica, y un 42,3% en categorías de vulnerabilidad y capacidad de adaptación moderada y regular. El aumento de la temperatura y los patrones irregulares de lluvia fueron las dos limitaciones más comunes en todos los sistemas de producción para ambos períodos. Dadas las condiciones climáticas naturales (altamente variables) de Turrialba, la producción de café fue afectada tanto directa como indirectamente por la variabilidad climática (Garnett F., 2021).

Una solución emergente para enfrentar el cambio climático es la utilización de variedades híbridas de café, las cuales han demostrado superar en productividad a las variedades tradicionales tanto en condiciones controladas como en plantaciones comerciales. Estas variedades no solo producen más, sino que también lo hacen con mayor estabilidad a través de diferentes entornos. Además, las variedades híbridas muestran una notable resistencia y tolerancia a condiciones adversas, como la calidad del suelo, plagas, enfermedades y variabilidad en las condiciones de sombra y sol. Sin embargo, a pesar de los beneficios evidentes, la adopción de variedades híbridas de café ha sido moderada debido a varios factores, incluyendo el costo de adquisición de las plántulas, que puede ser entre un 40% y 160% superior al de las variedades tradicionales. Aunque las variedades híbridas pueden generar un 47% más de producción de café, también requieren un 90% más de mano de obra y aumentan el costo de otros insumos en un 48%. La incertidumbre relacionada con el rendimiento a largo plazo de estas variedades también ha sido un factor disuasorio, especialmente para los pequeños agricultores. Es imperativo que las políticas y estrategias futuras se enfoquen en mitigar estos desafíos, proporcionando el apoyo necesario para facilitar una transición hacia el uso de variedades híbridas (Abraha G., 2023).

Estudios realizados bajo los escenarios RCPs 4.5 y 6.0 para el año 2070 han sido utilizados para proyectar las condiciones futuras del cultivo del café, proporcionando una visión de cómo las variaciones climáticas podrían afectar las áreas propicias para la producción de café en el país. Los resultados sugieren que las tierras altas de Costa Rica mantienen una alta probabilidad de ser adecuadas para el cultivo del café bajo todos los escenarios proyectados, mientras que la no idoneidad parece estar asociada principalmente con las tierras bajas. Este fenómeno puede atribuirse a las condiciones climáticas favorables que prevalecen en las altitudes elevadas, como temperaturas más frescas y patrones de lluvias más estables, que son propicias para el cultivo del café (Coto F. et al., 2017).

Sin embargo, los escenarios de cambio climático también revelan una alta superposición entre las áreas proyectadas como adecuadas para el café y las áreas forestales actuales. Este solapamiento plantea un dilema en términos de gestión del uso del suelo y conservación de la biodiversidad, ya que la expansión del cultivo del café podría amenazar los ecosistemas forestales existentes (Coto F. et al., 2017; Sain G., et al.2019).

Los modelos predicen una expansión del cultivo del café en la parte noroeste del país y una contracción a lo largo de las tierras altas del Caribe. Específicamente, la expansión de áreas potenciales para la producción de café esta principalmente ubicada en elevaciones intermedias en el lado de barlovento en las cordilleras de Tilarán y Guanacaste, donde actualmente existen parques nacionales. Este fenómeno podría generar tensiones entre los objetivos de conservación y los intereses agrícolas (Coto F. et al., 2017).

A pesar de los cambios previstos, la zona central de Costa Rica mostró una alta probabilidad de continuar sosteniendo el cultivo del café, lo que sugiere que, al menos en algunas regiones, la tradición cafetera del país puede perdurar a pesar de los desafíos climáticos (Coto F. et al., 2017).

### ***Caña de azúcar***

La caña de azúcar, un pilar crucial en la economía de Costa Rica se ve amenazada por un futuro lleno de incertidumbres, especialmente en el contexto del cambio climático. Las proyecciones sugieren que, si el cambio climático no estuviera presente, los rendimientos de este cultivo podrían aumentar potencialmente en un 29% entre 2010 y 2050. Sin embargo, con el cambio climático, la tendencia se invierte drásticamente, previendo una reducción de rendimientos de hasta un 9% en un escenario bajo de emisiones y, en el peor de los casos, de hasta un 18%. Esta disminución del 9 al 18% en los rendimientos, comparada con un escenario sin cambio climático, subraya la vulnerabilidad del sector agrícola frente a las fluctuaciones climáticas y los modelos biofísicos que demuestran un impacto significativo del cambio climático en los rendimientos de la caña de azúcar (Sain G., et al. 2019).

### **Producción láctea**

El estrés térmico en el ganado emerge como un problema significativo en el marco del cambio climático. El Índice de Temperatura-Humedad (THI), un indicador vital para el bienestar del ganado ya está superando límites preocupantes en algunas regiones de Costa Rica. Con un THI de 70 para el ganado lechero y 75 para el ganado de carne, identificado como el umbral donde comienzan las pérdidas de productividad, y con regiones como la mitad sur de Guanacaste ya experimentando un THI superior a 86, las perspectivas son preocupantes. La proyección de que el THI podría alcanzar 89 en esas ubicaciones para 2050, subraya la urgencia de abordar este problema (Sain G., et al. 2019).

Es imperativo que el gobierno y las instituciones pertinentes aseguren que los agricultores estén informados sobre las pérdidas de productividad asociadas con las temperaturas más altas y comiencen a desarrollar estrategias para mantener a su ganado fresco. Aunque proporcionar sombra mediante árboles puede ser una opción de bajo costo, es una solución parcial y se necesitarán estrategias más robustas para abordar este problema de manera efectiva (Sain G., et al. 2019).

### **Arroz**

El arroz de secano parece beneficiarse del cambio climático en algunas áreas del país, como en el área central del Pacífico de la provincia de Puntarenas y en el extremo sur de la provincia de Limón, en el lado del Caribe, que actualmente se caracterizan por una baja intensidad de cultivo y baja productividad. Sin embargo, algunas áreas de Guanacaste ven una disminución del 5-10 por ciento en los rendimientos entre 2000 y 2050 (Sain G., et al. 2019).

Se proyecta un patrón geográfico similar de ganancias e impactos negativos para el arroz irrigado, con Guanacaste pareciendo llevar la peor parte de los efectos del cambio climático, que en su mayoría están en el rango de promediar entre el 2 y el 5 por ciento. Entre 2000 y 2050, el promedio nacional para los rendimientos de arroz de secano no se estima que cambie significativamente debido al cambio climático. Sin embargo, los rendimientos irrigados pueden disminuir en un 3 por ciento (Sain G., et al. 2019).

Las temperaturas son más altas en Guanacaste que en muchas otras partes del país, y van a subir allí proporcionalmente a otras ubicaciones según tres de los cuatro modelos climáticos utilizados en este análisis. La reducción en el rendimiento allí es muy probablemente debido al estrés térmico. Una opción sería buscar desarrollar variedades de arroz tolerantes al calor para esa área. Otra opción sería trasladar parte de la producción de arroz a áreas más frescas, y tal vez desarrollar cultivos alternativos en Guanacaste. Pero el efecto climático negativo en el arroz es relativamente pequeño, por lo que la introducción de nuevas variedades es probablemente la mejor opción (Sain G., et al.2019).

### **Cuencas hidrográficas**

Estudios realizados en la cuenca del río Pejibaye, situada en Jiménez, provincia de Cartago, donde se utilizó una combinación de datos de precipitación y temperatura recopilados de estaciones meteorológicas entre los años 2000 y 2009, así como escenarios de cambio climático proyectados desde 2000 hasta 2099. A través de la calibración y validación de un modelo hidrológico utilizando diez años de datos diarios, los investigadores pudieron prever la respuesta de la cuenca en diferentes períodos futuros, específicamente 2040–2059 y 2080–2099. Los resultados indican que el cambio climático tendrá un impacto perceptible en el régimen de agua de la cuenca. Para el período 2040–2059, se prevé una disminución del 10,9% en la velocidad media del agua y una reducción de 0,1 metros en profundidad. Para el período 2080–2099, las proyecciones son aún más pronunciadas, anticipando una reducción del 11,3% en la velocidad media y una disminución de 0,14 metros en profundidad. Además, las mayores disminuciones en el área superficial del río por kilómetro se esperan en mayo (1710 m<sup>2</sup>) para 2040–2059 y abril (2250 m<sup>2</sup>) para 2080–2099 (Watson F., et al.2022). Estos cambios en la hidrología de la cuenca del río Pejibaye no solo tienen implicaciones ecológicas, sino también socioeconómicas. La reducción en el flujo de agua y los cambios en las características del río pueden afectar la biodiversidad local, así como la capacidad de la cuenca para contribuir al Proyecto Hidroeléctrico Angostura. Además, los cambios en los patrones de precipitación y flujo de agua pueden tener un impacto en los cultivos locales y, por ende, en la economía de la región (Watson F., et al.2022).

Un estudio que abarca las cuencas de Tempisque, Morote, Bebedero, Barrancas y Chirripó Pacífico, utilizando el modelo hidrológico GR2M y varios Modelos de Circulación General y Climáticos Regionales, exploró escenarios de cambio climático bajo los RCPs 2.6, 4.5 y 8.5, tomando como referencia el periodo 1961–1990. Se proyectan condiciones más húmedas en futuros cercano y medio bajo los RCP 2.6 y 4.5, y más secas en un futuro lejano bajo el RCP 8.5. Los cambios en el flujo de agua, dominados por las variaciones de precipitación proyectada, podrían resultar en inundaciones, sequías y escasez de agua más frecuentes en comparación con los patrones históricos (Mendez M., et al. 2022).

Un análisis de la variabilidad espacial de la escasez y estrés hídrico en Costa Rica reveló una marcada diferencia en la disponibilidad de agua, que no se alinea con las cuencas de uso intensivo. En áreas de alta demanda, se proyecta que más del 70% del suministro de agua será consumido bajo ciertos escenarios de cambio de cobertura terrestre y climático. Específicamente, la provincia de Guanacaste y el valle central, incluyendo San José, enfrentan un riesgo elevado de experimentar escasez y estrés hídricos en el futuro (Kayla D., et al. 2022).

Otro estudio centrado en las cuencas de Gato, Atirro y Platanillo en la Cordillera de Talamanca, que desembocan en el mar Caribe, utilizó un Modelo de Ruteo de Humedad del Suelo (SMR) para analizar la descarga de corrientes, seguido de un análisis de sensibilidad global. Los resultados indican que la deforestación tiene un impacto más pronunciado en el flujo de corrientes que los patrones alterados de precipitación y temperatura. La reforestación emerge como una estrategia viable para mitigar los efectos del cambio climático en la dinámica del flujo de corrientes en los trópicos, beneficiando la disponibilidad de agua, la geomorfología del canal y el hábitat acuático asociado con regímenes de flujo alterados (Joyal T. et al., 2023).

### **Sistemas costeros**

En las regiones de Cahuita y Moín en Costa Rica, se ha observado que las mareas astronómicas y el aumento proyectado del nivel del mar tienen un impacto significativo en la inundación de áreas críticas. En Cahuita, mareas superiores a 0.36 m ya comienzan a inundar áreas del Parque Nacional y en Moín, especialmente cerca del Muelle Petrolero, se prevén inundaciones en diversos escenarios futuros. Con un nivel de inundación por mareas de 1.36 m, proyectado

para 2070, y de 2.32 m, para 2100, se anticipan inundaciones extensas en Moín, afectando infraestructuras clave como los puertos de RECOPE y APM Terminals. En Cahuita, escenarios de 1.32 m y 1.36 m resultarían en inundaciones en el área principal del parque nacional, mientras que un escenario de 2.36 m aislaría a la comunidad local. La inundación en Moín tiende a comenzar por el estero, mientras que en Cahuita comienza por el sector del parque nacional, ambos puntos son de baja elevación, lo que facilita las inundaciones frecuentes durante las mareas altas. Además, las tormentas, tanto locales como distantes, pueden exacerbar las inundaciones, especialmente cuando coinciden con períodos de marea alta, y el oleaje resultante puede acelerar la erosión y alterar la morfología costera más allá de los escenarios pasivos descritos, presentando desafíos adicionales para estas áreas en el futuro (Lizano M., y Lizano O. 2022).

Por otra parte, la aguja costera de Puntarenas enfrenta desafíos significativos relacionados con la inundación del mar, especialmente en áreas de baja elevación como esteros y zonas cercanas a la línea del tren. Las inundaciones en estas áreas son propensas a ocurrir durante ascensos paulatinos o extraordinarios del nivel de marea, afectando principalmente a los asentamientos cercanos. Bajo escenarios de aumento del nivel del mar de 150 cm - 200 cm, se prevé que para el año 2090, las áreas circundantes al estero estarán inundadas y, después del 2100, sectores tradicionalmente afectados por mareas máximas podrían estar permanentemente bajo agua, con niveles que varían entre 40 cm y 100 cm. Esto es especialmente crítico para barrios cercanos al estero y áreas adyacentes a puntos neurálgicos como el Mercado Municipal y los Bancos de Costa Rica y Nacional. Además, el fenómeno de El Niño (ENOS) y las tormentas, tanto locales como distantes, también presentan amenazas, especialmente cuando coinciden con períodos de marea alta, exacerbando las inundaciones y afectando la morfología costera. Las mareas extraordinarias, que ocurren aproximadamente cada 4.65 años, pueden causar inundaciones significativas, especialmente cuando superan los 3 metros, como se ha observado en años anteriores (Lizano A., et al. 2010).

Las playas de Costa Rica, tanto en la costa del Pacífico (incluyendo la Isla del Coco) como en las del Caribe, están experimentando significativos procesos de erosión. Especialmente en playas abiertas, la erosión se muestra más acelerada, requiriendo intervenciones inmediatas.

Este fenómeno está influenciado por diversos factores océano-meteorológicos, entre los que se encuentran mareas astronómicas, oleajes extraordinarios, el Fenómeno de El Niño y el calentamiento global antropogénico. Además, se plantea la posibilidad de que efectos geodinámicos estén teniendo un impacto en las costas. A medida que se proyecta un aumento en el nivel del mar en los próximos 100 años debido al cambio climático antropogénico, la urgencia de abordar este problema crece (Lizano O, 2013).

Otros estudios realizados desde la provincia central de Limón hasta la desembocadura del río Sixaola en el cantón de Talamanca muestran variaciones significativas en la línea costera que han ocurrido en las últimas décadas debido a diversos efectos del cambio climático y otros factores. Para determinar la variación de la costa, el estudio utilizó imágenes aéreas de varios años (1960, 1976, 1998, 2005) e imágenes satelitales más recientes (2011, 2018, 2023). Se produjeron 1547 transectos ortogonales separados por 50 m, utilizando como línea base el límite de protección continental de 200 metros establecido por la Ley sobre la Zona Marítimo Terrestre de Costa Rica donde se estimó el desplazamiento espacial y temporal de la línea costera. El estudio reveló que entre 1960 y 2023, el 70,14% de los transectos mantuvieron tasas erosivas, particularmente concentradas en áreas como el Parque Nacional Cahuita, Puerto Viejo-Cocles, Manzanillo y Gandoca. Los desplazamientos de la línea costera por acreción ocurrieron principalmente en áreas cercanas o influenciadas por ríos como Banano, Estrella y Sixaola.

## **Emisiones de gases de efecto invernadero (gei)**

### **Emisiones GEI según inventarios nacionales**

En 2021 Costa Rica presenta la Cuarta Comunicación Nacional a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático donde se estiman las emisiones y absorciones de GEI para el país al año 2017; adicionalmente se revisan y actualizan ediciones anteriores, recalculando las emisiones de 1990 y 2016 (MINAE.2021).

En 2017, las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) fueron de 14.477,6 Gg de CO<sub>2</sub> eq, excluyendo el sector FOLU. Las estimaciones netas de FOLU son absorciones y equivalen a un 20,5% del total bruto de emisiones. Las emisiones netas, contabilizando el FOLU, fueron 11.509,2 Gg de CO<sub>2</sub> eq. Los diversos sectores presentaron variaciones significativas (MINAE.2021):

**Sector energía:** Las emisiones totales fueron de 7.981,6 Gg de CO<sub>2</sub> eq, marcando un incremento del 1,4% respecto a 2016 y un notable aumento del 176,2% desde 1990. El transporte fue la categoría con el mayor aumento de emisiones desde 1990, con un 243%.

**Sector procesos industriales y uso de productos (IPPU):** Este sector registró emisiones de 1.394,7 Gg de CO<sub>2</sub> eq, con un incremento del 5,8% respecto al INGEI 2015 y un aumento del 157,04% desde 1990, siendo la industria de los minerales la principal contribuyente.

**Sector agrícola:** Las emisiones fueron de 2.962,8 Gg de CO<sub>2</sub> eq, desglosadas en 65,95 Gg de CO<sub>2</sub>, 101,04 Gg de CH<sub>4</sub> y 2,50 Gg de N<sub>2</sub>O. Aunque las emisiones se redujeron desde 1990 hasta 2005, desde entonces han mostrado estabilidad con leves fluctuaciones. Más del 62,3% de las emisiones provienen de la fermentación entérica.

**Sector silvicultura y otros usos de la tierra (FOLU):** Este sector absorbió -2.968,35 Gg CO<sub>2</sub> eq, actuando como un sumidero neto de CO<sub>2</sub>. Las emisiones disminuyeron un 110% respecto a 1990 y un 688% respecto a 2015. El 64% de las emisiones y absorciones de GEI en 2017 correspondieron a tierras forestales.

**Sector residuos:** Las emisiones totales fueron de 2.138,5 Gg de CO<sub>2</sub> eq, con un aumento del 0,9% respecto a 2016 y del 110,3% desde 1990. Las emisiones de carbono negro debido a la incineración abierta de residuos alcanzaron 0,047 Gg.

Estos datos reflejan la diversidad y complejidad de las fuentes de emisiones de GEI, subrayando la necesidad de estrategias de mitigación específicas para cada sector para abordar de manera efectiva el cambio climático.

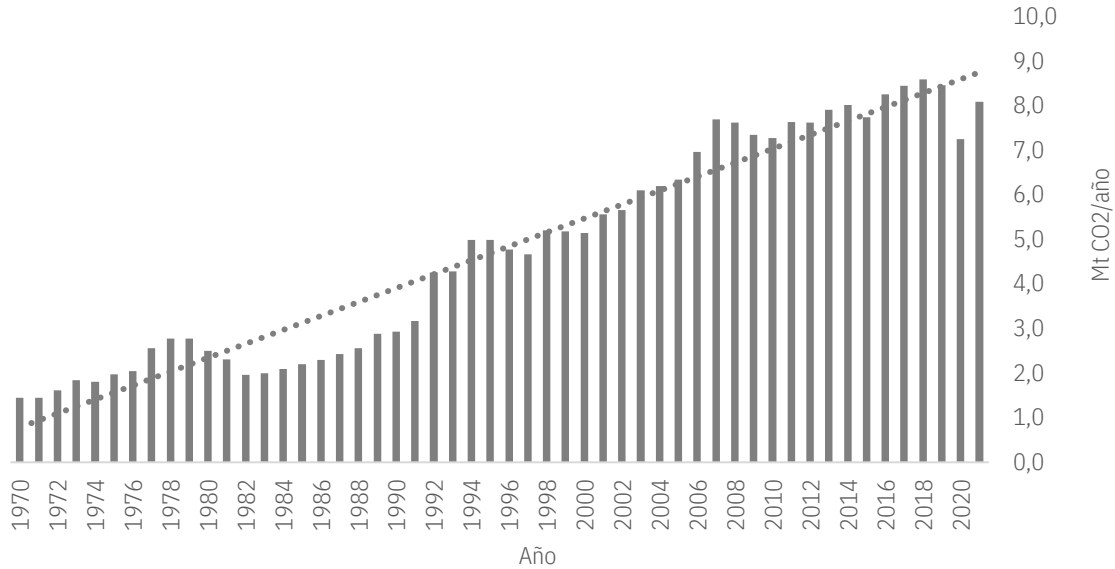
## **Emisiones GEI según monitoreo global**

Anualmente el Centro Común de Investigación (JRC), de la Comisión Europea publica las emisiones globales de CO<sub>2</sub> de todos los países del mundo. En su informe se presentan las series temporales de emisiones de CO<sub>2</sub> fósil de la Base de Datos de Emisiones para la Investigación de la Atmósfera Global (EDGAR) desde 1970 hasta 2021, junto con las emisiones y remociones de CO<sub>2</sub> provenientes del uso de la tierra y la silvicultura para el período de 1990 a 2020. El informe utiliza a la vez directamente las emisiones de CO<sub>2</sub> de combustibles fósiles calculadas por la AIE (Asociación Internacional de Energía) cuando es apropiado, en lugar de calcularlas a partir de las estadísticas subyacentes del uso de energía, para asegurar una mayor coherencia con los datos de la AIE.

La gráfica 5 muestra las emisiones totales de Costa Rica en el período 1970-2021. Es claro que las emisiones de CO<sub>2</sub> presentan un crecimiento sostenido al año 2019 con una leve tendencia a la baja en los años de la pandemia 2020 y 2021.

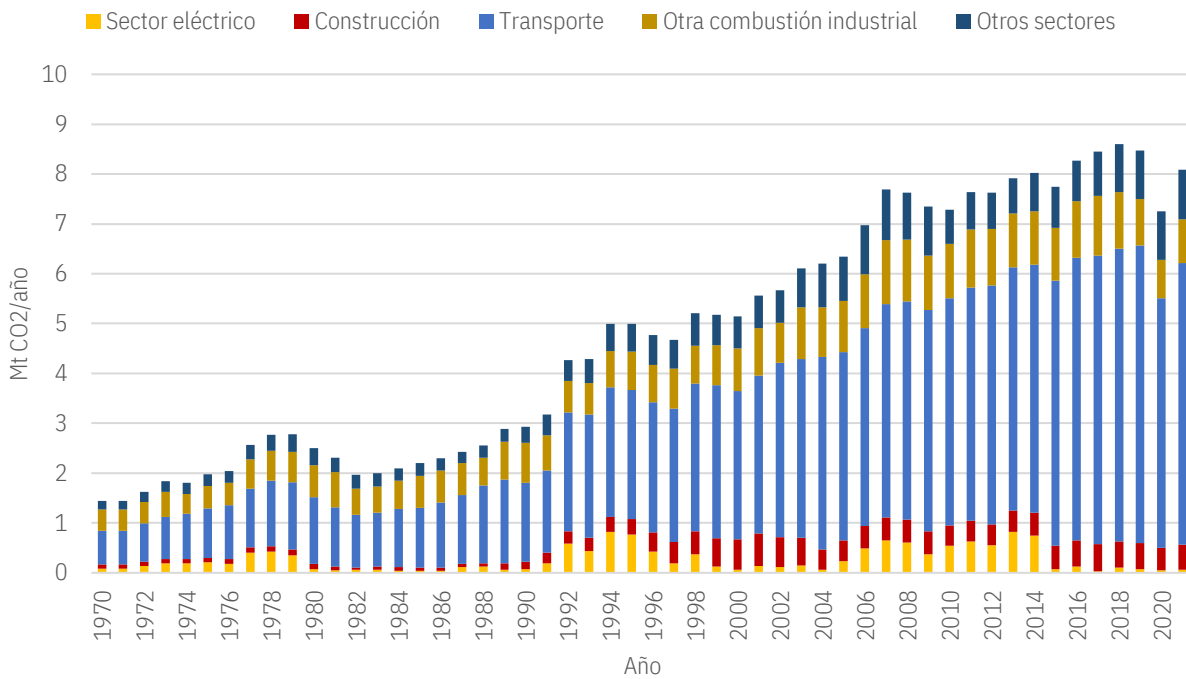
Las emisiones totales por sector muestran que el sector que más crece en emisiones desde 1990 en el sector transporte (256%), seguido del sector de construcción (238%) y otros sectores (206%) para un crecimiento total de todos los sectores de un 176% entre los años 1990 y 2021. Es importante hacer notar que el sector energía es el único que ha mostrado una tendencia a la disminución en sus emisiones (gráfica 5 y cuadro 4) Crippa D., et al (2022).

**Gráfico 5**  
Emisiones totales en Costa Rica. 1970-2021  
(Mt CO<sub>2</sub>/año)



Fuente: Crippa D., et al., 2022.

**Gráfico 6**  
Emisiones totales en Costa Rica, por sector. 1970-2021  
(Mt CO<sub>2</sub> por año)



Fuente: Crippa D., et al., 2022.

Cuadro 4

Cambio en las emisiones totales por sector para diferentes períodos en Costa Rica

Sector	2021 vs 1990	2021 vs 2005	2021 vs 2020
Energía	↘ -9%	↘ -73%	↗ +13%
Otra combustión industrial	↗ +10%	↘ -15%	↗ +13%
Construcción	↗ +238%	↗ +21%	↗ +13%
Transporte	↗ +256%	↗ +50%	↗ +13%
Otros sectores	↗ +206%	↗ +11%	→ +3%
Todos los sectores	↗ +176%	↗ +27%	↗ +12%

Fuente: Crippa D., et al., 2022.

## Impacto de los fenómenos naturales a nivel nacional

Como se ha mencionado anteriormente Costa Rica se encuentra en una región climática que, de manera periódica, experimenta eventos meteorológicos con notables impactos. Estos eventos, que incluyen ciclones tropicales, fenómenos de baja presión en el mar Caribe, influencia de la Zona de Convergencia Intertropical, frentes fríos, ondas del Este, y los períodos de El Niño y La Niña, influyen en la intensidad y duración de las precipitaciones, mareas y vientos. Es esta variabilidad climática la que ha llevado a que la mayoría de las emergencias nacionales estén vinculadas a inundaciones, deslizamientos, marejadas, "trombas marinas", corrientes de resaca, tsunamis y "cabezas de agua", sucediendo en cualquier época del año CNE (2015).

La vulnerabilidad de Costa Rica ante estos eventos ha tenido consecuencias significativas en términos económicos y sociales. Entre 1998 y 2018, las lluvias intensas y las sequías causaron daños valorados en más de 3.166 millones y 183 millones de dólares, respectivamente. Al desglosar estos daños por ámbito, las zonas rurales han sido las más afectadas, con pérdidas ascendiendo a más de 2.029 millones, seguidas de las zonas urbanas con 639 millones y áreas sin clasificar con 681 millones MIDEPLAN (2019).

La magnitud de estos daños es alarmante. Diversos estudios nacionales proyectan que, si Costa Rica continúa en la senda actual de acumulación creciente de riesgos, las pérdidas económicas y sociales superarán la capacidad del país. Para el 2030, las pérdidas podrían alcanzar más de 7 mil millones de dólares, y para el 2050, esta cifra se eleva a casi 30 mil millones. Estas proyecciones indican que el número de eventos declarados emergencias nacionales podría duplicarse para 2030 y aumentar ocho veces para 2050 MIDEPLAN (2019).

A nivel global, la Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción de los Desastres, a través de su "Informe de Evaluación Global sobre la Reducción del Riesgo de Desastres (GAR)", realiza análisis que marcan tendencias en la condición del riesgo de los países. Para Costa Rica, el GAR-2015 estima que las "Pérdidas Anuales Esperadas" por amenazas múltiples alcanzarán una suma anual de 280 millones de dólares. Estas cifras, aunque preocupantes, resaltan la urgente necesidad de implementar estrategias de adaptación y resiliencia MIDEPLAN (2019).

Es imperativo que Costa Rica reconozca la gravedad de estos desafíos y actúe en consecuencia. Las proyecciones económicas, junto con los riesgos asociados a eventos climáticos, subrayan la necesidad de políticas públicas que promuevan la sostenibilidad y reduzcan la vulnerabilidad. La inversión en infraestructura resiliente, la planificación urbana y rural considerando el cambio climático, y la promoción de prácticas agrícolas sostenibles son solo algunas de las medidas que podrían mitigar los efectos adversos de estos fenómenos.

## Referencias bibliográficas

- Abraha G., Turreira N., Ortiz D., Georget F., Skovmand A. (2023). New coffee varieties as a climate adaptation strategy: Empirical evidence from Costa Rica. *World Development Sustainability*, 2(2023), 1–11.
- Aguilar, E., Peterson, T.C., Ramírez Obando, P., Frutos, R., Retana, J.A., Solera, M., Soley, J., González García, I., Araujo, R.M., Rosa Santos, A., Valle, V.E., Brunet, M., Aguilar, L., Álvarez, L., Bautista, M., Castañón, C., Herrera, L., Ruano, E., Sinay, J.J., Sánchez, E., Hernández Oviedo, G.I., Obed, F., Salgado, J.E., Vázquez, J.L., Baca, M., Gutiérrez, M., Centella, C., Espinosa, J., Martínez, D., Olmedo, B., Ojeda Espinoza, C.E., Núñez, R., Haylock, M., Benavides, H. and Mayorga, R. (2005). Changes in precipitation and temperature extremes in Central America and northern South America, 1961–2003. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 110, D23.  
<https://doi.org/10.1029/2005JD006119>
- Amador, J. A. (2008). The intra-Americas sea low-level jet: Overview and future research. *Annals of the New York Academy of Sciences*. 1146 (1): 153-188. Doi: 10.1196/annals.1446.012
- Amador, J. A., Durán-Quesada, A. M., Rivera, E. R., Mora, G., Sáenz, F., Calderón, B., Mora, N. (2016). The easternmost tropical Pacific. Part II: Seasonal and intraseasonal modes of atmospheric variability. *Rev. Biol. Trop.* 64 (Supplement 1): S23-S57.
- Alfaro, E. J., Chourio, X., Muñoz, Á. G., Mason, S. J. (2018). Improved seasonal prediction skill of rainfall for the Primera season in Central America. *International Journal of Climatology*. 38: e255-e268. Doi: 10.1002/joc.5366
- Alvarado Gamboa, Luis Fernando. (2021). *Proyecciones de Cambio Climático regionalizadas para Costa Rica (Escenarios RCP-2.6 y RCP-8.5)*. San José, Costa Rica: IMN-PNUD.
- Biasutti, M., Sobel, A., Camargo, S., & Creyts, T. (2012). Projected changes in the physical climate of the Gulf Coast and Caribbean. *Climatic Change*, 112(3), 819–845.

- Birkel, Christian & Dehaspe, Joni & Chavarría-Palma, Andrés David & Venegas-Cordero, Nelson & Capell, René & Durán-Quesada, Ana. (2021). Projected climate change impacts on tropical life zones in Costa Rica. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*. 46. 030913332110470. 10.1177/03091333211047046.
- Castillo R. (2021). La oscilación antártica: su influencia en la variabilidad interanual de la precipitación en Costa Rica. *Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex.Fis. Nat.* 45(176):875-900, julio septiembre de 2021. Doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1434>
- Castillo M., Piedra L., Pereira J., Sierra L., Carvajal J. (2023). Variación espacial y multitemporal de la línea de costa en playas arenosas del Caribe sur de Costa Rica. *Investigaciones Geográficas -Instituto de Geografía - UNAM*, 111, 1–17.
- Crippa M., Guizzardi D., Banja M., Solazzo E., Muntean M., Schaaf E., Pagani F., Monforti-Ferrario F., Olivier, J.G.J., Quadrelli, R., Grassi, G., Rossi, S., Oom, D., Branco, A., San-Miguel, J., Vignati, E. (2022) CO2 emissions of all world countries - 2022 Report, EUR 31182 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2022, ISBN 978-92-76-55802-6, doi: 10.2760/07904, JRC130363.
- Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (CNE). (2015). “Política Nacional de Gestión del Riesgo 2016-2030”. San José, C.R.
- Coto Fonseca, Alberto & Rojas, Carlos & Molina-Murillo, Sergio. (2017). Climate change-based modeling of potential land use arrangements for coffee (*Coffea arabica*) and forest in Costa Rica. *Agricultural Engineering International: The CIGR e-journal*. 19
- Enquist, C. A. F. (2002). Predicted regional impacts of climate change on the geographical distribution and diversity of tropical forests in Costa Rica. *Journal of Biogeography*, 29(4), 519–534.
- Fox-Kemper, B., H. T. Hewitt, C. Xiao, G. Aðalgeirsdóttir, S. S. Drijfhout, T. L. Edwards, N. R. Golledge, M. Hemer, R. E. Kopp, G. Krinner, A. Mix, D. Notz, S. Nowicki, I. S. Nurhati, L. Ruiz, J-B. Sallée, A. B. A. Slangen, Y. Yu, 2021, Ocean, Cryosphere and Sea Level Change. In: *Climate Change (2021): The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate*

Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In press.

Fung, E., Imbach, P., Corrales, L. *et al.* Mapping conservation priorities and connectivity pathways under climate change for tropical ecosystems. *Climatic Change* **141**, 77–92 (2017). <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1789-8>

Garnett F., Virginio E., Detlefsen G., Cerda R. (2021). Vulnerabilidad y capacidad adaptativa de fincas cafetaleras de Turrialba, Costa Rica. *Agroforestería En Las Américas*, 51, 1–11.

Giorgi, F. (2006). *Climate change hot-spots*. 33(April), 1–4.  
<https://doi.org/10.1029/2006GL025734>

Hastenrath, S., & Polzin, D. (2013). Climatic variations in Central America and the Caribbean. *International Journal of Climatology*, 33(6), 1348–1356.  
<https://doi.org/10.1002/joc.3515>

Hidalgo H., Alfaro E., Quesada A. (2022). *Frontiers in Hidrology*. Future Changes in Simulated Streamflow in Costa Rica from CMIP6 Climate Models, 1.

IPCC, (2021): Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.

IPCC, 2023: *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 184 pp., doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.

Imbach, P., Molina, L., Locatelli, B., Roupsard, O., Mahé, G., Neilson, R., Corrales, L., Scholze, M., & Ciais, P. (2012). Modeling potential equilibrium states of vegetation and terrestrial

- water cycle of 46esoamerica under climate change scenarios. *Journal of Hydrometeorology*, 13(2). <https://doi.org/10.1175/JHM-D-11-023.1>
- Joyal, T.; Fremier, A.K.; Boll, J. Modeled Forest Conversion Influences Humid Tropical Watershed Hydrology More than Projected Climate Change. (2023). *Hydrology*, 10, 160. <https://doi.org/10.3390/hydrology10080160>
- Kayla D. Stan, Arturo Sanchez-Azofeifa, Ralf Ludwig, Sustainability of Costa Rica's water supply under climate change scenarios, *Environmental Science & Policy*, Volume 136, 2022, Pages 67-77, <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2022.05.021>
- Karnauskas, K. B., Seager, R., Giannini, A., Busalacchi, A. J. (2013). A simple mechanism for the climatological midsummer drought along the Pacific coast of Central America. *Atmósfera*. 26 (2): 261-281. Doi:10.1016/S0187-6236(13)71075-0
- Karmalkar, A., Bradley, R., & Diaz, H. (2011). Climate change in Central America and Mexico: Regional climate model validation and climate change projections. *Climate Dynamics*, 37(3), 605–629. <https://doi.org/10.1007/s00382-011-1099-9>
- Liu, Z., Sandoval, L., Sherman, L., & Wilson, A. (2020). Vulnerability of Elevation-Restricted Endemic Birds of the Cordillera de Talamanca (Costa Rica and Panama) to Climate Change. (<https://doi.org/10.1101/2020.09.11.293134>)
- Lizano A, Melvin A. Lizano O. (2010). Creación de escenarios de inundación en la Ciudad de Puntarenas ante el aumento del nivel del mar InterSedes: Revista de las Sedes Regionales, vol. XI, núm. 21, 2010, pp. 215-229
- Lizano, O. (2013). Erosión en las playas de Costa Rica, incluyendo la Isla del Coco. *Intersedes*, XIV (27), 1–27.
- Lizano M., L. O. (2022). Creación de escenarios ante el aumento del nivel del mar, para las localidades de Moín y Cahuita, Limón, Costa Rica. *Revista Geográfica de América Central*, 68(1), 103–126.
- Magaña, V., Amador, J. A., Medina, S. (1999). The midsummer drought over Mexico and

- Central America. *Journal of Climate*. 12 (6): 1577-1588. Doi: 10.1175/1520-0442(1999)012<1577:TMDOMA>2.0.CO;2
- Malhi, Y., & Wright, J. (2004). Spatial patterns and recent trends in the climate of tropical rainforest regions. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 359(1443), 311–329. <https://doi.org/10.1098/rstb.2003.1433>.
- Maldonado, T. and Alfaro, E. (2012). Revisión y comparación de escenarios de cambio climático para el Parque Nacional Isla del Coco, Costa Rica. *Rev. biol. trop*, Nov (2012), vol.60, suppl.3, p.83-112. ISSN 0034-7744
- Mendez, M.; Calvo-Valverde, L.-A.; Imbach, P.; Maathuis, B.; Hein-Grigg, D.; Hidalgo-Madriz, J.-A.; Alvarado-Gamboa, L.-F (2022). Hydrological Response of Tropical Catchments to Climate Change as Modeled by the GR2M Model: A Case Study in Costa Rica. *Sustainability* 2022, 14, 16938. <https://doi.org/10.3390/su142416938>
- Mendez M., Maathuis, B., Hein-Griggs, D. & Alvarado G., L., (2020). Performance Evaluation of Bias Correction Methods for Climate Change Monthly Precipitation Projections over Costa Rica. *Water* 12(2), 482. <https://doi.org/10.3390/w12020482>
- Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE), M. (2021). *Cuarta Comunicación Nacional. Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático*.
- Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica (MIDEPLAN) (2019). Costa Rica impacto de los fenómenos naturales para el período 1988-2018, por sectores, provincias, cantones y distritos. San José, CR: MIDEPLAN, 2019.
- Moreno-Díaz, Mary Luz. Actividades socioeconómicas en el Parque Nacional Isla del Coco, Costa Rica y posibles efectos de la variabilidad climática. *Rev. biol. trop*, Nov 2012, vol.60, suppl.3, p.113-129. ISSN 0034-7744
- Nakaegawa, T., Kitoh, A., Murakami, H., & Kusunoki, S. (2013). Annual maximum 5-day rainfall total and maximum number of consecutive dry days over Central America and the Caribbean in the late twenty-first century projected by an atmospheric general circulation model with three different horizontal resolutions. *Theoretical and Applied Climatology*, 1–14. <https://doi.org/10.1007/s00704-013-0934-9>

- Nakaegawa, T., Kitoh, A., Kusunoki, S., Murakami, H., & Arakawa, O. (2014). Hydroclimate changes over Central America and the Caribbean in a global warming climate projected with 20-km and 60-km mesh MRI atmospheric general circulation models. *Papers in Meteorology and Geophysics*, 65, 15–33. <https://doi.org/10.2467/mripapers.65.15>
- Neelin, J. D., Münnich, M., Su, H., Meyerson, J. E., & Holloway, C. E. (2006). Tropical drying trends in global warming models and observations. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 103(16), 6110–6115. <https://doi.org/10.1073/pnas.0601798103>
- Nitta, Brad, (2009). Altitudinal distribution and niche partitioning of two Redstart species in Monteverde (Parulidae). *Tropical Ecology and Conservation* [Monteverde Institute]. 36. [https://digitalcommons.usf.edu/tropical\\_ecology/36](https://digitalcommons.usf.edu/tropical_ecology/36)
- Pelayo-González L, Herra-Miranda D, Pacheco-Polanco JD, Guzmán HM, Goodman S and Oviedo L (2022) Decreases in encounter rate of endangered Northeast Pacific humpback whales in Southern Costa Rica: Possible changes in migration pattern due to warming events. *Front. Mar. Sci.* 9:927276. doi: 10.3389/fmars.2022.927276
- Ranasinghe, R., A. C. Ruane, R. Vautard, N. Arnell, E. Coppola, F. A. Cruz, S. Dessai, A. S. Islam, M. Rahimi, D. Ruiz Carrascal, J. Sillmann, M. B. Sylla, C. Tebaldi, W. Wang, R. Zaaboul, (2021). Climate Change Information for Regional Impact and for Risk Assessment. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press
- Rauscher, S., Giorgi, F., Diffenbaugh, N., & Seth, A. (2008). Extension and Intensification of the Meso-American mid-summer drought in the twenty-first century. *Climate Dynamics*, 31(5), 551–571.

- Sáenz, F. & Amador, J.A. (2016). Características del ciclo diurno de precipitación en el Caribe de Costa Rica. *Revista de Climatología*, 6: 21-34.
- Sain G., Thomas T., Cenacchi N. (2019). Climate Change, Agriculture, and Adaptation Options for Costa Rica. IFRI Discussion Paper 01528
- Sibaja-Cordero, J.A. 2008. Tendencias espacio temporales de los avistamientos de fauna marina en los buceos turísticos (Isla del Coco, Costa Rica). *Rev. Biol. Trop.* 56 (Supl. 2): 113-132.
- Travers, S. E., & Dochtermann, N. A. (2022). Flowering cues in a Costa Rican cloud forest: analyzing the effect of climate. bioRxiv <https://doi.org/10.1101/2022.07.20.500362>
- Viguera B., Alpízar F., Harvey C-, Martínez R., Saborío M. (2019). Percepciones de cambio climático y respuestas adaptativas de caficultores costarricenses de pequeña escala. *Agronomía Mesoamericana*, 30(2), 333–351
- Watson-Hernández, F.; Guzmán-Arias, I.; Chavarría-Pizarro, L.; Quesada-Alvarado, F. (2022). The Effect of Climate Change on the Water Supply and Hydraulic Conditions in the Upper Pejibaye River Basin, Cartago, Costa Rica. *Hydrology*, 9, 76. <https://doi.org/10.3390/hydrology9050076>.
- Watson-Hernández, F.; Serrano-Núñez, V.; Gómez-Calderón, N.; Pereira da Silva, R. (2023). Quantification and Evaluation of Water Requirements of Oil Palm Cultivation for Different Climate Change Scenarios in the Central Pacific of Costa Rica Using APSIM. *Agronomy* 2023, 13, 19. <https://doi.org/10.3390/agronomy13010019>.
- Xu, C., Widén, E., & Halldin, S. (2005). Modelling hydrological consequences of climate change—Progress and challenges. *Advances in Atmospheric Sciences*, 22(6), 789–797. <https://doi.org/10.1007/bf02918679>.

## Bases de datos

Earth, B. (2022). Country-Level Warming Projections [Data set]. In *Actionable Climate Science for Policymakers*. <https://berkeleyearth.org/>

Garner, G. G., T. Hermans, R. E. Kopp, A. B. A. Slangen, T. L. Edwards, A. Levermann, S. Nowicki, M. D. Palmer, C. Smith, B. Fox-Kemper, H. T. Hewitt, C. Xiao, G. Aðalgeirsdóttir, S. S. Drijfhout, T. L. Edwards, N. R. Golledge, M. Hemer, R. E. Kopp, G. Krinner, A. Mix, D. Notz, S. Nowicki, I. S. Nurhati, L. Ruiz, J-B. Sallée, Y. Yu, L. Hua, T. Palmer, B. Pearson, (2021). IPCC AR6 Sea-Level Rise Projections. Version 20210809. PO.DAAC, CA, USA. Dataset accessed [2023-10-6]

NASA. (2023). Sea Level Anomaly (Version (2205) [Data set]. In NASA Sea Level Portal. <https://sealevel.nasa.gov/data-analysis-tool>

NASA-IPCC. (2023). IPCC 6th Assessment Report Sea Level Projections [Data set]. In Sea Level Projection Tool. <https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool>