



Evaluación de riesgo climático para identificar estrategias robustas de adaptación en el sector del agua en Bolivia



Implementada por:

giz Deutsche Gesellschaft
für Internationale
Zusammenarbeit (GIZ) GmbH



Esta publicación, “Evaluación de riesgo climático para identificar estrategias sólidas de adaptación para el sector del agua en Bolivia”, ha sido elaborada por el Instituto Potsdam para la Investigación sobre el Impacto del Cambio Climático (PIK), con el apoyo de la Cooperación Alemana a través de la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH y su Programa de Gestión Integral con Enfoque de Cuenca (PROCUENCA).

La GIZ implementa medidas de desarrollo en Bolivia por encargo del Ministerio Federal para la Cooperación Económica y Desarrollo (BMZ) de Alemania. Las ideas expresadas en este texto son de exclusiva responsabilidad de sus autores/as y no comprometen la línea institucional de la GIZ. Se autoriza la reproducción total o parcial de este documento, sin fines comerciales y citando debidamente la fuente.

Los mapas incluidos en este informe son meramente informativos y no constituyen descripciones legales. Los mapas no representan una opinión sobre las fronteras o el territorio de ningún país, departamento o municipio.

Derechos de autor

@ Archivo GIZ PROCUENCA Bolivia

Autores/as

Fred Hattermann, Carlos Fernández, Stephanie Gleixner,
Nele Gloy, Anne Gaedecke, Christoph Gornott (PIK)

Andrea Salinas, Génesis Nava, Carlos Saavedra (GIZ)

Juliane Kaufmann, Matti Carlsburg,
Steffen Noleppa (HFFA Research)

Fecha

Febrero 2023

Fotografías

Archivo GIZ/PROCUENCA

Traducción del inglés

Nicole Nucinkis

Diseño gráfico

Miguel Faber

Judith Santander

Agradecimientos

Varias instituciones, colegas y expertos han contribuido al desarrollo de este estudio proporcionando datos, colaborando en la elaboración de mapas, realizando revisiones y aportando con valiosos criterios para la interpretación de los resultados. Los autores quedan especialmente agradecidos a:



Dirección de Planificación, Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego

- Oscar Meave
- Neftalí Chapi
- Daniel Becerra
- Paola Padilla
- Mario Lourenco



Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología

- Lucia Walper
- Leo Pereira



Gobierno Autónomo Departamental de Santa Cruz

- Carina Castro
- Alejandro Araujo
- Dayske Shoji
- Adita Montaña
- Celia Capobianco
- Ruth Untoja
- José Tarima
- Nancy Tito



Gobierno Autónomo Departamental de Tarija

- Alan Echart
- Omar Rodríguez

Expertos:

- Gustavo Ayala – Stockholm Environment Institute (modelación hidrológica)
- Eduardo Noriega (modelación climatológica)
- Juan Vargas (riego tecnificado y cultivos de alto valor)
- Wolf Rolón (ganadería sostenible)
- Carla Mendizábal – Conservation Strategy Fund (análisis costo-beneficio)
- Estela Herbas – Universidad Católica Boliviana “San Pablo” (restauración de bosques)

Personal de la GIZ:

Sören Rüd, Miriam Seeman, Nicole Stuber, Boris Hinojosa, Adrián Castillo, Erik Arancibia, Daniel Leguía, Yuri Vildoza, Mario Veizaga, Pablo Molina, Sergio Villa Gómez, Bianca Diez, Lia Escobar, Deborah Orellana, Katerin Brieger, Judith Santander.

Personal de PIK:

Ylva Hauf



Presentación

Bolivia es uno de los países más afectados por los impactos hidrológicos inducidos por el cambio climático. Según el Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2022), a menos que los países se pongan a la altura de los desafíos y se adapten lo antes posible, los resultados serán el aumento de pobreza, escasez de agua, pérdidas agrícolas y altos niveles de migración. Por ello, el gobierno nacional, los gobiernos departamentales y los municipios están diseñando estrategias de adaptación nacionales, sectoriales y subnacionales y, en ese contexto, necesitan información fiable sobre las condiciones climáticas previstas a nivel regional, así como evaluaciones específicas respecto a la conveniencia de las inversiones planificadas para la adaptación.

Para responder a esta necesidad, la GIZ y el Instituto de Potsdam para la Investigación del Impacto del Cambio Climático (PIK) han desarrollado un estudio de riesgo climático centrado en las cuencas de los ríos Guadalquivir, en Tarija, y San Martín y Paraguá, en Santa Cruz. La descripción del impacto climático se centra en la evolución de las tendencias de temperatura y precipitación, la disponibilidad de agua en el futuro y los cambios en la productividad agrícola y ganadera. Asimismo, se evaluó la rentabilidad de cinco estrategias específicas de adaptación a modo de ejemplos de cómo el cambio climático futuro podría afectar las inversiones planificadas para el corto plazo.

De hecho, y a pesar de haber utilizado modelos climáticos de vanguardia para este estudio, persiste una enorme incertidumbre sobre la intensidad y frecuencia de los cambios climáticos en Tarija y Santa Cruz, en las próximas siete décadas. En este contexto, varias experiencias valiosas, lecciones aprendidas y recomendaciones han surgido durante el desarrollo del estudio y se han incluido en este informe para ampliar la frontera de la investigación climática en Bolivia.

Esperamos que los resultados de este estudio ayuden a los tomadores de decisiones a lograr una mejor comprensión de los riesgos climáticos –un elemento importante en cualquier proyecto climático financiado por donantes internacionales– para la implementación exitosa de planes y políticas como las Contribuciones Nacionalmente Determinadas (NDC, 2021-2030), el Plan Plurinacional de Recursos Hídricos (PPRH, 2021-2025), la Estrategia Departamental de Cambio Climático y Seguridad Hídrica de Santa Cruz (EDCC, 2022-2050) y los Planes Territoriales de Desarrollo Integral (PTDI) a nivel municipal.

Bernhard Bösl

Director Residente Bolivia y Paraguay
Deutsche Gesellschaft für Internationale
Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Prof. Dr. Johan Rockström

Director
Instituto Potsdam para la Investigación
del Impacto del Cambio Climático (PIK)

Resumen

Bolivia se enfrenta y seguirá enfrentándose a varios retos relacionados con el cambio climático, como el retroceso de los glaciares, graves sequías e inundaciones. Por ello, se ha desarrollado el análisis de las proyecciones climáticas y una evaluación del riesgo climático para identificar estrategias de adaptación robustas para el sector del agua en Bolivia. El objetivo de este estudio es evaluar los cambios climáticos futuros utilizando un conjunto de diez modelos climáticos, con sesgo ajustado y escala reducida, del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP6, por su sigla en inglés) utilizado por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por su sigla en inglés).

El aumento promedio de la temperatura que se recoge en este estudio, de +2,5 °C (SSP1-2,6), +4,7 °C (SSP3-7,0) y +5,8 °C (SSP5-8,5), en el futuro lejano (2065-2095), coincide con las proyecciones basadas en las simulaciones del CMIP5, que van de +2,5 a +5,9 °C para fines del siglo XXI. La proyección de menos precipitaciones en las tierras bajas también fue similar utilizando las simulaciones del CMIP5. Los cambios en las precipitaciones varían geográficamente; se proyectan menos precipitaciones en las tierras bajas del norte del país, y más en la parte norte del Altiplano y en las laderas del sudeste de los Andes. Es probable que la frecuencia de las sequías extremas aumente continuamente a lo largo del siglo XXI, en todos los escenarios de calentamiento.

Las proyecciones muestran que el cambio climático puede tener graves repercusiones en los recursos hídricos y en los sectores relacionados con el agua. Si bien existe una alta certeza de que las temperaturas medias anuales, los días calurosos, las noches tropicales y los eventos extremos de sequía están aumentando en número e intensidad, hay menos certeza, como en muchas otras regiones del mundo, sobre el cambio en las precipitaciones. Las proyecciones de precipitación media anual muestran una tendencia a disminuir en Santa Cruz, mientras que se proyecta un aumento de las precipitaciones en Tarija, bajo los escenarios de calentamiento global moderado y alto.

Como resultado de lo anterior, los impactos sobre los recursos hídricos y la vegetación varían, y las medidas de adaptación de las Contribuciones Nacionalmente Determinadas (NDC, por su sigla en inglés), del Plan Plurinacional de Recursos Hídricos (PPRH) y de las políticas locales deberían ser flexibles ante los diferentes cambios del clima en las regiones. Mientras en Tarija hay una tendencia a una mayor disponibilidad de agua (escenarios de calentamiento elevado, SSP 3-7,0 y SSP5-8,5), pero con una enorme incertidumbre e incluso una tendencia a una menor disponibilidad de agua bajo un escenario de cambio climático moderado (SSP1-2,6), todos los escenarios muestran una menor disponibilidad de agua en las tierras bajas de Santa Cruz, lo cual empeora a medida que incrementa la temperatura.

Resumen de las tendencias climatológicas

Indicador	Bolivia	Santa Cruz	Tarija
Temperatura media anual	↑	↑	↑
Días calurosos	↑	↑	↑
Noches tropicales	↑	↑	↑
Días con helada	↓	No aplica	↓
Precipitación media anual	↓	↓	↑ SSP3 y SSP5
Frecuencia de días con fuerte precipitación	↑ SSP5	-	↑ SSP3 y SSP5
Intensidad de las precipitaciones fuertes	↑ SSP5	-	↑ SSP3 y SSP5
Frecuencia de las sequías extremas	↑	↑	↑

Resumen de las tendencias hidrológicas

Indicador	San Martín/Paraguá	Guadalquivir
Descarga anual	↓	↑ SSP3 y SSP5
Evapo-transpiración	↑	↑
Caudal alto	↑ SSP5	↑
Caudal bajo	↓	↑
Rendimiento de cultivos	↓	↑ SSP3 y SSP5

Certidumbre: porcentaje de modelos que coinciden en la tendencia

Bajo (≤50 %)	Medio (≥50 %)	Alto (≥80 %)	Muy alto (≥90 %)
-----------------	------------------	-----------------	---------------------

Mensajes principales

1. Los resultados del estudio reflejan cuán relevante e importante es la mitigación del cambio climático global: los impactos sobre los recursos hídricos y los eventos hidroclimatológicos extremos ya son severos bajo un escenario de calentamiento global moderado, pero son masivos bajo un escenario de aumento alto de la temperatura global.
2. En promedio, se prevé que la temperatura en Bolivia aumentará más de +2,5 °C hasta fines del siglo XXI. Esto significa que habrá un aumento en el número e intensidad de las temperaturas anuales, los días calurosos, las noches tropicales y los eventos de sequía extrema.
3. Las proyecciones de precipitación muestran una mayor incertidumbre general. Las proyecciones de precipitación media anual muestran una tendencia a la disminución en Santa Cruz, mientras que se proyecta un ligero aumento de las precipitaciones en Tarija en el marco de un calentamiento global alto.
4. Se puede esperar una fuerte disminución (–11 % a –29 %) del caudal de los embalses de Concepción y Guapomó (Santa Cruz), mientras que el caudal de la represa San Jacinto (Tarija) será muy variable de un año a otro.
5. Los cambios en los patrones climáticos actuales se producirán especialmente entre septiembre y febrero, que es un periodo clave en el ciclo agrícola. Los impactos sobre el rendimiento de los cultivos pueden ser diferentes en las dos regiones: mientras el rendimiento de cultivos como la soja podría disminuir en Santa Cruz, otras especies como el sorgo podrían beneficiarse del aumento general de la temperatura. En Tarija, el rendimiento de los cultivos puede aumentar de manera general. Si se gestiona de forma inteligente, esto puede generar más ingresos para los agricultores locales.
6. Las condiciones hidrológicas en Santa Cruz varían considerablemente después de que ocurren incendios forestales. El panorama general es que las zonas quemadas son propensas a una escorrentía superficial a veces mucho mayor (e inundaciones) y a veces a una recarga de aguas subterráneas mucho menor (y sequías locales). Lo decisivo es la rapidez con la que se recupera la vegetación, y si se gestiona el seguimiento de las zonas y cómo se hace. Son necesarios más estudios para investigar y cuantificar el impacto combinado de los incendios forestales y el cambio climático.
7. Son necesarios nuevos estudios para comprender mejor los impactos del clima, aunque es posible que solo ayuden a reducir la incertidumbre en tanto se basen en observaciones de campo. Tarija se encuentra en la interfaz de regiones con aumento (tierras altas) y disminución (tierras bajas) de las precipitaciones, por lo que son importantes las medidas de “sin remordimientos”.
8. Para mejorar la comprensión de los procesos hidrológicos en Bolivia es imperativo aumentar y mantener la red de estaciones hidrometeorológicas.



Índice

Capítulo 1. Introducción	10
1.1 Objetivos	12
1.2 Áreas de estudio	12
1.3 Organización del estudio	15
Capítulo 2. Métodos y datos	17
2.1 De los modelos climáticos a las consecuencias regionales para los recursos hídricos y los procesos hidrológicos	17
2.1.1 Los escenarios del cambio climático	17
2.1.2 El modelo ecohidrológico SWIM	19
2.1.3 Limitaciones y fuentes de incertidumbre	20
2.2 Condiciones climáticas actuales en Bolivia	22
Capítulo 3. Cambio climático en Bolivia y en las cuencas	25
3.1 Bolivia	26
3.2 Departamento de Santa Cruz	33
3.3 Departamento de Tarija	37
Capítulo 4. Impactos en la hidrología	42
4.1 Santa Cruz: impactos del cambio climático en las cuencas San Martín y Paraguá	43
4.2 Tarija: impactos del cambio climático en la cuenca del río Guadalquivir	49
Capítulo 5. Reflexiones finales	55
5.1. Discusión	55
5.2 Comentarios finales	57
Referencias	59
Anexo	62

Lista de Figuras

Figura 1. Indicador de sequía de aguas subterráneas poco profundas.....	10
Figura 2. Áreas de estudio.....	12
Figura 3. Municipios y uso de la tierra de la cuenca Guadalquivir	13
Figura 4. Municipios y uso de la tierra de las cuencas San Martín y Paraguá.....	14
Figura 5. Cadena de modelos para simular los impactos del clima en el ciclo del agua.....	17
Figura 6. Los escenarios SSP del conjunto de escenarios usados por el IPCC	18
Figura 7. Tendencias de temperatura y precipitación en Santa Cruz comparando el conjunto de datos del CMIP5 y el CMIP6.	21
Figura 8. Tendencias de temperatura y precipitación en Tarija, comparando el conjunto de datos del CMIP5 y el CMIP6.	21
Figura 9. Regímenes de precipitación y temperatura de 1985-2015..	22
Figura 10. Cambios proyectados en la temperatura media anual del aire, los días muy calurosos, las noches tropicales, y los días de heladas	26
Figura 11. Cambios proyectados en la temperatura media estacional de Bolivia	27
Figura 12. Cambios proyectados en la temperatura media anual a nivel nacional para los tres diferentes escenarios SSP.....	27
Figura 13. Cambios proyectados en días muy calurosos a nivel nacional.....	28
Figura 14. Cambios proyectados en las noches tropicales a nivel nacional	28
Figura 15. Cambios proyectados en los días de heladas a nivel nacional.....	29
Figura 16. Cambios proyectados en la precipitación media anual para Bolivia.	29
Figura 17. Cambios proyectados en la precipitación media estacional para Bolivia.....	30
Figura 18. Cambios proyectados en la precipitación media anual a nivel nacional.....	30
Figura 19. Cambios proyectados en la frecuencia de días de precipitación fuerte a nivel nacional.....	31
Figura 20. Cambios proyectados en la intensidad de precipitaciones fuertes a nivel nacional.....	31
Figura 21. Cambios proyectados en la frecuencia de eventos de sequía extrema durante el siglo XXI	32
Figura 22. Cambios proyectados en la frecuencia de eventos de sequía extrema en el futuro.....	32
Figura 23. Cambios proyectados en la temperatura media anual, los días muy calurosos, y las noches tropicales para Santa Cruz.....	33
Figura 24. Cambios proyectados en la temperatura media estacional de Santa Cruz.....	34
Figura 25. Cambios proyectados en la precipitación media anual, la frecuencia de los días de precipitación fuerte y la intensidad de la precipitación.....	34
Figura 26. Cambios proyectados en la precipitación media estacional de Santa Cruz	35
Figura 27. Cambios proyectados en la frecuencia de eventos de sequía extrema para Santa Cruz.....	36
Figura 28. Cambios proyectados en la temperatura media anual del aire, los días muy calurosos, las noches tropicales, y los días de heladas para Tarija	37
Figura 29. Cambios proyectados en comparación con el promedio de 1985-2015 en la temperatura media estacional para Tarija para diferentes escenarios de calentamiento global. Aquí se muestra la mediana multimodelo y los intervalos de confianza de 66 % (rango probable) y 90 % (rango muy probable).	38
Figura 30. Cambios proyectados en la precipitación media anual, la frecuencia de días de precipitación fuerte, y la intensidad de la precipitación fuerte para Tarija	39
Figura 31. Cambios proyectados en la precipitación media estacional para Tarija	39
Figura 32. Cambios proyectados en la frecuencia de eventos de sequía extrema para Tarija.....	40
Figura 33. Las cuencas Guadalquivir, San Martín y Paraguá con sus respectivas áreas de calibración en el modelo SWIM	42

Figura 34. Desempeño de la simulación vs. caudales observados en las diferentes estaciones hidrométricas.....	43
Figura 35. Cambio en la descarga anual bajo cambio climático hasta mediados de siglo y fin de siglo	44
Figura 36. Cambio de la descarga anual en tres estaciones con tres SSP	45
Figura 37. Cambios relativos en la descarga media mensual en tres estaciones simulados por SWIM.....	46
Figura 38. Cambio en los indicadores de bajo caudal y alto caudal en la estación de aforo Príncipe da Beira.....	47
Figura 39. Rendimiento de los cultivos de soja y de los pastizales en Santa Cruz	48
Figura 40. Desempeño de la simulación vs. caudales observados en dos estaciones hidrométricas.....	49
Figura 41. Nivel y volumen del agua de la represa de San Jacinto, simulado por SWIM.	50
Figura 42. Cambio en la descarga para el escenario de calentamiento moderado y calentamiento alto, hasta mediados y finales de siglo.....	50
Figura 43. Cambios en la descarga anual en las estaciones de la represa de San Jacinto, Algarrobito y Aguas Blancas.....	51
Figura 44. Cambios relativos en la descarga promedio mensual en tres estaciones simulados por SWIM.....	52
Figura 45. Cambio relativo en la descarga en la represa de San Jacinto y en la estación de aforo Algarrobito simulados por SWIM	52
Figura 46. Indicadores de caudal bajo y alto en la represa de San Jacinto.....	53
Figura A1: Ciclo anual de la precipitación y la temperatura media del aire para Bolivia, Santa Cruz y Tarija inferior).....	62

Lista de Tablas

Tabla 1. Comparación de SWIM con otros modelos hidrológicos usados en Bolivia	19
Tabla 2. Variación de la temperatura media anual en Santa Cruz para diferentes escenarios futuros considerando los tres SSP de cambio climático.....	33
Tabla 3. Variación de la precipitación media anual en Santa Cruz para los diferentes escenarios futuros, considerando los tres SSP de cambio climático.	35
Tabla 4. Variación de la temperatura media anual en Tarija para los diferentes escenarios futuros, considerando los tres SSP de cambio climático.....	38
Tabla 5. Cambios promedio de la afluencia del agua en los embalses seleccionados.....	48

Lista de siglas

ACB	Análisis de costo-beneficio
ACE	Análisis de costo-efectividad
ANA	Agencia Nacional del Agua del Brasil
APMT	Autoridad Plurinacional de la Madre Tierra
AR5	Quinto Informe de Evaluación (Fifth Assessment Report)
AR6	Sexto Informe de Evaluación (Sixth Assessment Report)
BMZ	Ministerio Federal para la Cooperación Económica y Desarrollo (Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung)
CMIP	Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (Coupled Model Intercomparison Project)
COP26	26a Conferencia de las Partes ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
COPERNICUS	El Programa de Observación de la Tierra de la UE
ENSO	El Niño-Oscilación del Sur (El Niño-Southern Oscillation)
ETa	Evapotranspiración real (Actual Evapotranspiration)
GAD	Gobierno Autónomo Departamental
GAM	Gobierno Autónomo Municipal
GCM	Modelo Climático Global (Global Climate Model)
GEI	Gases de efecto invernadero
GMET	Herramienta de ensamble meteorológico en grilla (Gridded Meteorological Ensemble Tool)
GRACE-FO	Continuación del Experimento de Clima y Recuperación Gravitatoria (Gravity Recovery and Climate Experiment Follow-On)
IPCC	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (Intergovernmental Panel on Climate Change)
ISIMIP	Proyecto de intercomparación de modelos de impacto intersectorial (Inter-Sectoral Impact Model Inter-comparison Project)
MMaYA	Ministerio de Medio Ambiente y Agua
MODIS	Espectro-radiómetro de imágenes de resolución moderada (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)
NASA	Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (National Aeronautics and Space Administration)
NDC	Contribuciones Nacionalmente Determinadas (Nationally Determined Contributions)
NSE	Coefficiente de eficiencia Nash-Sutcliffe
PBIAS	Porcentaje de sesgo (Percent bias)
PDCG	Plan Director de la Cuenca del Río Guadalquivir
PPRH	Plan Plurinacional de Recursos Hídricos

PROCUENCA	Programa de Gestión Integral con Enfoque de Cuenca
PTDI	Plan Territorial de Desarrollo Integral
RCP	Trayectorias de Concentración Representativas (Representative Concentration Pathways)
SEDEGIA	Servicio Departamental de Gestión Integral del Agua
SENAMHI	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología
SIG	Sistema de Información Geográfica
SPEI	Índice Estandarizado de Precipitación-Evapotranspiración (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index)
SPI	Índice Estandarizado de Precipitación (Standardized Precipitation Index)
SSP	Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (Shared Socioeconomic Pathways)
SWAT	Herramienta de Evaluación de Suelo y Agua (Soil and Water Assessment Tool)
SWIM	Modelo Integrado de Suelo y Agua (Soil and Water Integrated Model)
VRHR	Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego
WEAP	Sistema de Evaluación y Planificación Hídrica (Water Evaluation and Planning System)
W5E5	Set de datos de forzamiento meteorológico global (Global Meteorological Forcing Dataset)

Capítulo 1. Introducción

Muchos países del mundo, incluyendo Bolivia, se verán gravemente afectados por el cambio climático y sus impactos en los recursos hídricos, con posibles efectos graves para la subsistencia y el bienestar de la población y las sociedades locales. El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático –IPCC, por su sigla en inglés– (2022) menciona que por cada incremento adicional del calentamiento global (por ejemplo, 1 °C), los cambios se hacen más grandes en diversas variables climáticas y en impactos adversos, y las pérdidas y daños causados también se intensifican. Además, la eficacia de las opciones de adaptación disponibles disminuye con cada incremento del calentamiento. A esto se suma que el mundo no avanza con la suficiente rapidez en la reducción de emisiones ni en sus esfuerzos de adaptación. Por lo tanto, la urgencia de la acción climática crece año tras año.

El cambio climático afecta a los ecosistemas, a las sociedades humanas y a las economías de varias maneras, y el agua es el principal medio a través del cual se sienten estos impactos. Este fenómeno reduce la previsibilidad de la disponibilidad y la calidad de los recursos hídricos del mundo.

Además, genera un aumento de la frecuencia y la magnitud de los fenómenos extremos, como olas de calor, precipitaciones sin precedentes, tormentas y marejadas (UNESCO, 2020).

El uso mundial del agua se ha sextuplicado en los últimos 100 años y sigue aumentando a un ritmo constante del 1 % anual debido al crecimiento de la población, el desarrollo económico y los cambios en los patrones de consumo (UNESCO, 2020).

Aunque el monitoreo periódico y las observaciones in situ son fundamentales para describir el estado de los recursos hídricos, los datos son escasos en muchas regiones del mundo. Por ello, se utilizan modelos, imágenes de satélite y sus productos derivados para describir el ciclo del agua y los impactos del cambio climático, y para predecir las condiciones futuras.

Las observaciones de la Tierra mediante los datos del satélite GRACE-FO, por ejemplo, muestran un almacenamiento anormalmente bajo de aguas subterráneas en amplias zonas en el centro y este de Sudamérica, incluidas las tierras bajas de la cuenca del Amazonas (Figura 1).

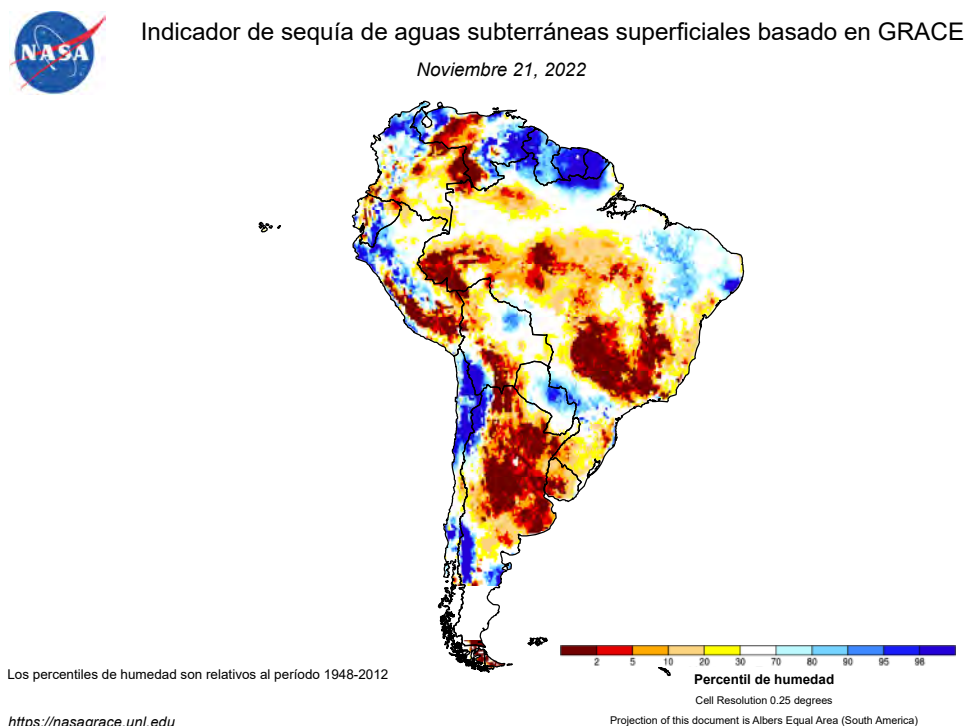


Figura 1. Indicador de sequía de aguas subterráneas poco profundas, con base en el producto GRACE de la NASA. Fuente: National Drought Mitigation Center (2022).

La Figura 1 muestra el estado actual de los recursos hídricos subterráneos en Sudamérica en noviembre de 2022, basado en los datos del satélite GRACE-FO e integrado con otras observaciones. Los indicadores de sequía describen las condiciones actuales de humedad o sequedad, expresadas en un percentil que muestra la probabilidad de ocurrencia para ese lugar y época del año. Esto está en consonancia con la disminución observada en las precipitaciones, como, por ejemplo, la señalada por Ossio *et al.* (2021), que conduce, junto con el aumento de la evapotranspiración –estimulada por el aumento de las temperaturas– a una menor filtración y recarga de las aguas subterráneas.

Los impactos relacionados con el agua suelen verse reforzados, paralelamente, por las decisiones políticas y de gestión. Esto implica que los desafíos son arduos, pero también son oportunidades únicas para que las comunidades cooperen, aprendan y se adapten juntas.

El Acuerdo de París estableció el ambicioso objetivo mundial de combatir el cambio climático y adaptarse a sus efectos. El Acuerdo entró en vigor el año 2020, centrándose en garantizar que los compromisos mundiales consideren adecuadamente las medidas de adaptación y mitigación que se aplicarán en la versión actualizada de las Contribuciones Nacionalmente Determinadas (NDC). Por lo tanto, las NDC incluyen las acciones que los países pretenden llevar a cabo para alcanzar los objetivos a largo plazo del Acuerdo de París.

El enfoque de abajo hacia arriba de las NDC permite a los países definir sus prioridades y estrategias nacionales, en base a sus propias capacidades y vulnerabilidades, para hacer frente al cambio climático, mientras que el anclaje del Acuerdo de París se hace a nivel nacional.

Casi todas las NDC (incluyendo las de Bolivia) identifican el agua como un componente central de su trabajo de adaptación y algunas también vinculan el agua al suministro de energía sostenible, la seguridad alimentaria y la restauración de los bosques (Climate Watch, 2022). Si bien el agua tiene un papel central en la resiliencia ante el cambio climático, el reconocimiento explícito del agua como factor esencial –en el sentido de que se requiere

una gestión resiliente y robusta del agua para lograr la mitigación y la adaptación al clima– no se menciona ampliamente y es un elemento clave para la efectividad de la implementación de políticas, programas y proyectos.

Las NDC de Bolivia abordan la adaptación en los sectores de agua, energía y agricultura. Asimismo, la Autoridad Plurinacional de la Madre Tierra (APMT) está trabajando actualmente en la elaboración de una hoja de ruta sobre cómo operacionalizar las metas de adaptación y los indicadores específicos para informar en el marco de los mecanismos de transparencia del Acuerdo de París, por ejemplo, respecto a los sectores priorizados o las necesidades de inversión y los beneficios.

Sin embargo, hasta la fecha, **el país carece de análisis exhaustivos que proyecten los riesgos climáticos y que puedan generar una base de información útil para la implementación y la planificación de las inversiones de las NDC.** Para solucionar este cuello de botella, son necesarias, en todos los sectores y especialmente en el sector del agua: (1) las proyecciones de los impactos climáticos en los ecosistemas, la economía y la sociedad y (2) la evaluación de las inversiones de adaptación para hacer frente a los riesgos climáticos y meteorológicos, por ejemplo, a través de un análisis de costo-beneficio (ACB).



1.1 Objetivos

Para lograr la seguridad hídrica se necesitan planes adaptativos; es decir, planes que mantengan las opciones abiertas para realizar cambios cuando sea necesario. Loucks y van Beek (2017) y otros autores aplican el concepto de gestión adaptativa y reconocen que, frente a la incertidumbre, una buena toma de decisiones debe tener dos características:

ser robusta; es decir, una decisión adecuada tanto para situaciones habituales como extremas;

lograr adaptarse bien a nuevas circunstancias, con el menor costo.

En este contexto, el objetivo de esta evaluación es apoyar el diseño de políticas hídricas y estrategias de adaptación robustas, a través del aporte de nuevas evidencias sobre el cambio climático futuro

en Bolivia, así como la evaluación de opciones de inversión específicas.

Asimismo, para el análisis integral del riesgo climático, se toma en cuenta las siguientes dos dimensiones:

Dimensión de impacto: identificar el alcance del riesgo climático mediante el estudio de las repercusiones biofísicas y socioeconómicas asociadas en múltiples escenarios.

Dimensión de acción: desarrollo de escenarios específicos de inversión y opciones/estrategias de adaptación, incluyendo el cálculo de costos subyacentes a los diferentes escenarios (inversión en adaptación vs. no actuar) y la construcción de la dimensión del impacto en el sector del agua.

1.2 Áreas de estudio

Tomando en cuenta la diversidad fisiográfica de Bolivia y las áreas de intervención del programa PROCUENCA, se han seleccionado tres cuencas hidrográficas para el estudio: San Martín y Paraguá (Santa Cruz), y Guadalquivir (Tarija) (Figura 2).

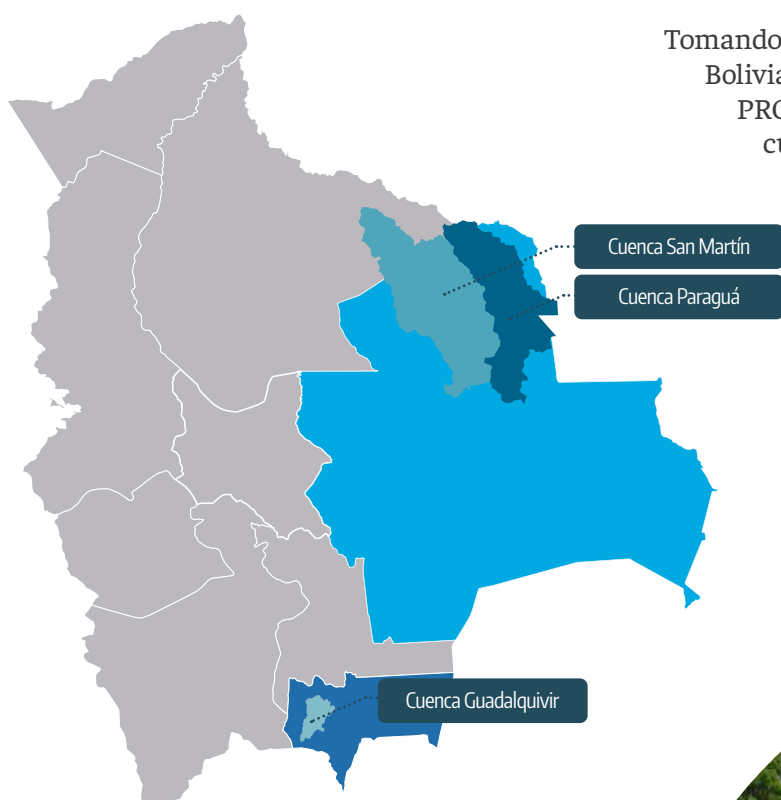


Figura 2. Áreas de estudio.



Cuenca del río Guadalquivir

La cuenca del río Guadalquivir se encuentra en el departamento de Tarija y ocupa un área de 3.334 Km²; está dividida en la parte baja (aprox. 1.595 m.s.n.m.), la media y la parte alta (hasta 4.750 m.s.n.m.).

Abarca cuatro municipios: Padcaya, Tarija, Uriondo y Villa San Lorenzo (Figura 3). Se proyecta que la población crecerá a 460.945 habitantes hasta el año 2050 (Gutiérrez *et al.*, 2021).

Debido a su ubicación geográfica, a los pies de la Cordillera Oriental, la cuenca Guadalquivir alberga una gran riqueza de especies y recursos naturales. Se han identificado 452 especies de plantas, incluyendo 109 plantas medicinales y 149 forrajeras, entre otras. También es el hogar de, por lo menos, 412 especies de animales silvestres, incluyendo peces, anfibios, reptiles, aves y mamíferos (Moya *et al.*, 2021).

Se considera que la actividad agrícola en la cuenca es la que tiene mayor potencial. De los 167 centros poblados identificados por el Censo 2012, 156

desarrollan actividades agropecuarias. Asimismo, la pesca artesanal y recreativa se practica en la represa San Jacinto (Gutiérrez, 2021).

De acuerdo con el Plan Director de la Cuenca del Río Guadalquivir (PDCG), los principales problemas son: mala planificación urbana y crecimiento acelerado de la ciudad de Tarija, manejo inadecuado de los suelos, uso elevado de agroquímicos, ineficiencia de los sistemas de riego y la pérdida de cultivos por la mayor recurrencia de eventos climáticos extremos. El cambio de uso del suelo ha causado impacto negativo en las funciones ambientales, afectando la integridad de los sistemas de vida en la cuenca e incluso la salud de las personas. La sobreexplotación de las aguas subterráneas y la calidad del agua son otros problemas importantes en esta cuenca. Como consecuencia, la contaminación del agua ha aumentado (Plataforma Interinstitucional de la Cuenca del Río Guadalquivir, 2021).

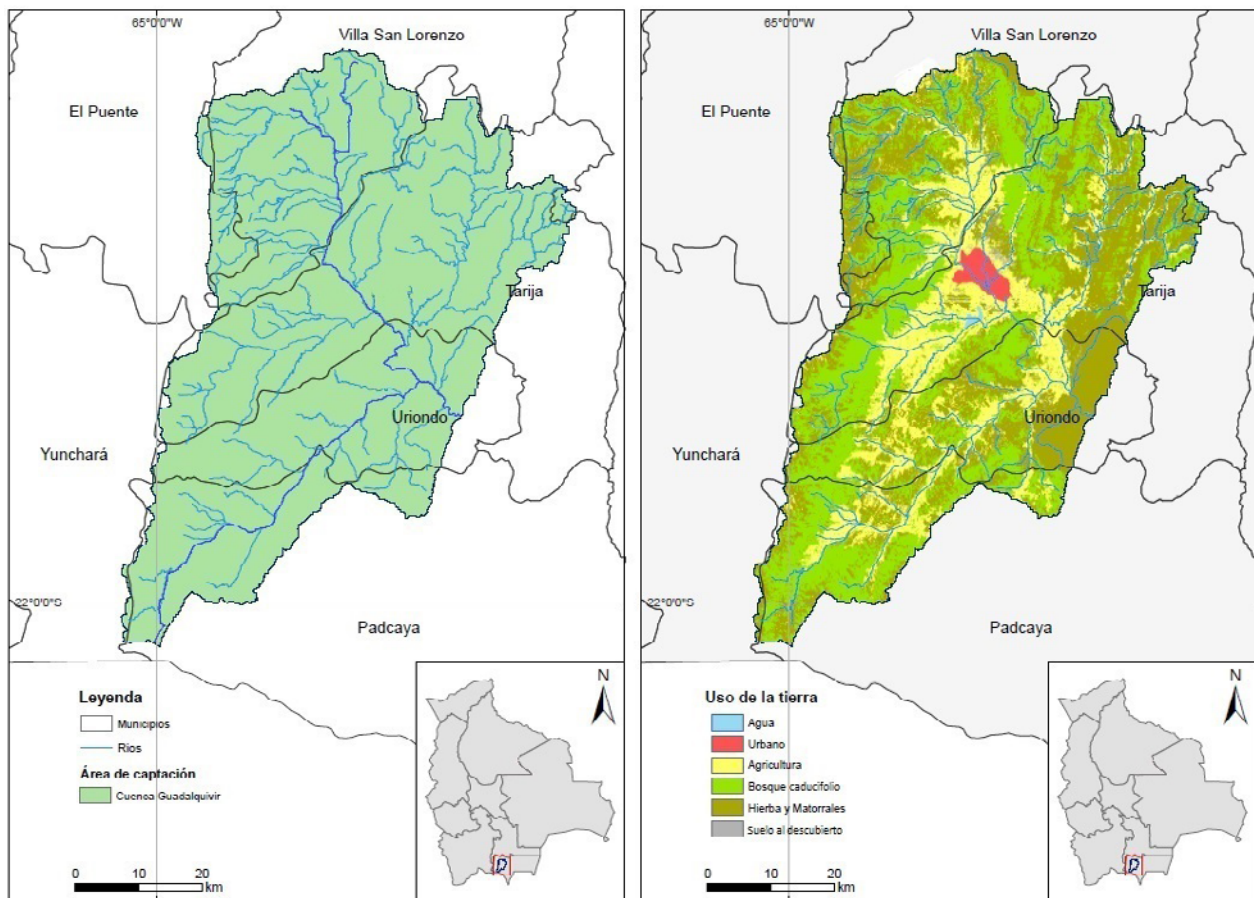


Figura 3. Municipios (izq.) y uso de la tierra (der.) de la cuenca Guadalquivir. Fuente: GAD Tarija (2022).

Cuencas de los ríos San Martín y Paraguá

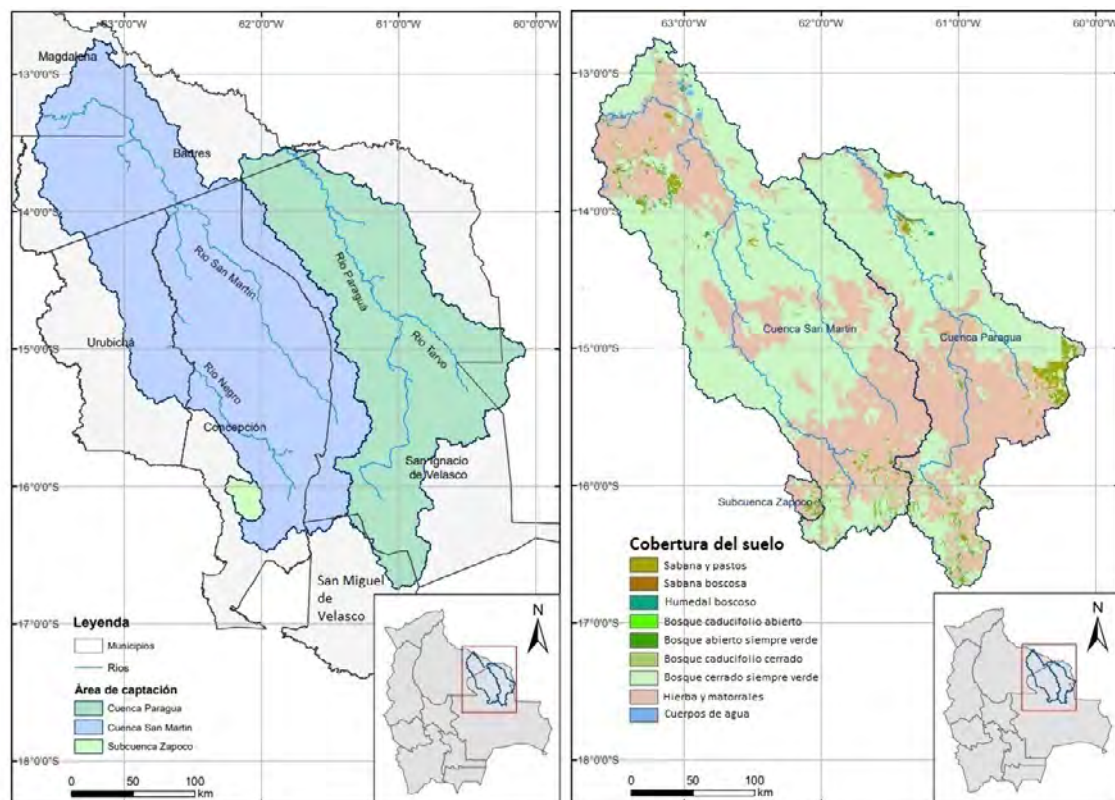
Estas cuencas se encuentran en la región de la Chiquitanía Norte del departamento de Santa Cruz y forman parte de la gran cuenca del Amazonas. La cuenca del río San Martín cubre un área de 33.156 Km² y la cuenca del río Paraguá un área de 27.171 Km² (Figura 4).

La cuenca San Martín se ubica entre los municipios de Concepción, San Ignacio de Velasco, San Miguel de Velasco y Urubichá, con una población de 11.127 habitantes. La cuenca Paraguá está entre los municipios de San Ignacio de Velasco y San Miguel de Velasco, con una población de 42.713 habitantes (GIZ, 2022a).

Zapocó es una subcuenca del río Blanco y tiene un área de 704 Km² (GIZ, 2022a). Si bien no está conectada a la cuenca San Martín, es un área crítica para la provisión de agua al municipio de Concepción, por lo que ha sido incluida en esta evaluación. Por razones prácticas, de aquí en adelante, se entiende que la denominación cuencas San Martín y Paraguá incluye la subcuenca Zapocó.

Estas cuencas se extienden sobre grandes áreas forestales con gran cantidad de recursos maderables y no maderables. Los ecosistemas de la región cumplen funciones ambientales como la provisión de agua dulce, el almacenamiento de carbono, el control de la erosión del suelo, y la regulación del clima y los recursos genéticos (FUNDECO y GIZ, 2020). Existen especies maderables importantes, como la mara (*swietenia macrophylla*), el cedro (*cedrela odorata*), el roble (*amburana cearensis*), el tajibo (*tabebuia spp.*), el cambará (*cedrelinga catenaeformis*); y otras especies no maderables, como el asaí, el cusi, la palma real, el guapá, la uña de gato, entre otras (FUNDECO y GIZ, 2020).

Se estima que la cuenca San Martín alberga alrededor de 50 tipos de anfibios, 78 reptiles, 700 aves, 124 mamíferos y 300 especies de peces. Algunas especies endémicas son el mono “Chichilo”, el águila “Arpía colorida” y la “Rana chiquitana”. A estos se suma un importante grupo de abejas nativas, las meliponas o sin aguijón (GIZ, 2022b).



La cuenca Paraguá alberga una gran variedad de flora como el soto, el cuchi, la palmera real, entre otros. En cuanto a la fauna, hay aproximadamente 100 especies de mamíferos, como el jaguar, el tigre, el mono tití y el tatú. Hay más de 600 tipos de aves, incluyendo la paraba, el tucán, el matico y el tordo. También hay 70 especies de reptiles, como el caimán negro, la tortuga de tierra, el sicurí; y hay 250 especies de peces, como el surubí y el pacú (GIZ, 2022b).

En la cuenca existen seis áreas protegidas: Parque Nacional Noel Kempff Mercado; área protegida departamental “Reserva de Vida Silvestre Ríos Blanco y Negro”; Reserva Municipal del Patrimonio Natural y Cultural de Copaibo; Área Municipal Protegida “Orquídeas del Encanto”; Área Municipal Protegida de San Ignacio; y Reserva Forestal del Bajo Paraguá. Su objetivo es promover la conservación de la biodiversidad y reducir los efectos de la deforestación y del crecimiento de la frontera agrícola, de las quemas y los incendios forestales, entre otros (GIZ, 2022b).

Las actividades económicas se centran en la agricultura, la ganadería y la silvicultura. La región tiene un gran potencial forestal vinculado a la biodiversidad del bosque chiquitano, considerado un bosque único en el mundo por sus características de transición entre la selva amazónica y el bosque seco chaqueño (GIZ, 2021). Sin embargo, la región está sujeta a varias amenazas debido a las actividades antropogénicas desarrolladas en las partes altas. Algunas de ellas son: los incendios forestales, el uso insostenible de la tierra y de los recursos naturales (madera, ganado), la extracción forestal ilegal y el comercio de fauna silvestre, la expansión de la frontera agrícola y la pérdida de biodiversidad (desde insectos polinizadores hasta mamíferos).

1.3 Organización del estudio

Aunque los resultados del estudio son relevantes, sobre todo, para los tomadores de decisiones y sus asesores, otros profesionales e investigadores podrían estar interesados en una comprensión más profunda de la cadena de impacto climático (desde la dinámica terrestre hasta la viabilidad económica). El mundo académico podría comparar el rendimiento de los nuevos modelos climáticos e hidrológicos y adaptar el enfoque metodológico. Para responder a los diferentes públicos, los resultados del estudio se presentan en:

1. El informe central (este documento) que incluye los resultados de la modelación climática e hidrológica;
2. Cinco notas de política (policy briefs) que incluyen el

análisis económico de cinco medidas de adaptación: restauración de bosques; ganadería sostenible; riego tecnificado; cambio a cultivos de alto valor; y gestión de la represa San Jacinto, Tarija; y

3. Un documento metodológico que explica los detalles del análisis realizado, incluyendo las fuentes de datos, la resolución del modelo, entre otros.

Las notas de política y el documento metodológico se publican en forma separada a este documento.

Los capítulos de este informe central están organizados de la siguiente manera:

Capítulo 2. Métodos y datos

En este capítulo se describe la metodología general para pasar de los modelos climáticos globales a las consecuencias regionales para el balance hídrico y los procesos hidrológicos; se describen los avances recientes en la investigación sobre cambio climático y adaptación a nivel global y regional; y se presenta brevemente el modelo ecohidrológico SWIM (Modelo Integrado de Suelo y Agua) aplicado.

Capítulo 3. Cambio climático en Bolivia y sus cuencas

En este capítulo se identifican los cambios en las condiciones climáticas futuras en Bolivia utilizando la última generación de escenarios de cambio climático y varios indicadores ampliamente utilizados. Los cambios proyectados en los indicadores climáticos fueron examinados para tres escenarios de alta prioridad contemplados en el Sexto Informe de Evaluación (AR6) del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2021). Se analizaron los datos climáticos proyectados para mostrar la gama de posibles condiciones climáticas futuras en el futuro cercano y en el futuro lejano en relación con un período de referencia (1985-2015).

Capítulo 4. Impactos en la hidrología

Este capítulo describe la implementación del modelo ecohidrológico SWIM para traducir los cambios en el clima, descritos en el Capítulo 3, en cambios en los procesos hidrológicos y la disponibilidad de recursos hídricos en las cuencas Guadalquivir, San Martín y Paraguá.

Capítulo 5. Reflexiones finales

En este capítulo se analizan los resultados del estudio y se proveen algunas reflexiones y recomendaciones para la aplicación de los mismos en la planificación y política pública.



Capítulo 2. Métodos y datos

2.1 De los modelos climáticos a las consecuencias regionales para los recursos hídricos y los procesos hidrológicos

Los modelos nos ayudan a resolver problemas complicados y a comprender sistemas complejos como el sistema climático global o el ciclo hidrológico de una cuenca hidrográfica. Para determinar los impactos del cambio climático global en los recursos hídricos regionales y en los extremos hidrológicos, se suele aplicar una cadena de modelos que van desde los modelos climáticos globales, pasando por los modelos climáticos regionales, hasta los modelos ecohidrológicos de cuenca.

En la Figura 5, la primera capa es el **modelo climático global** (GCM, por su sigla en inglés), que simula el clima global y las consecuencias de un supuesto aumento de los gases de efecto invernadero (“escenario de emisiones”). Sus resultados brindan el insumo para la segunda capa: **modelos climáticos regionales dinámicos o estadísticos** que describen el clima regional a escalas de hasta unos pocos kilómetros. Los campos meteorológicos generados, por ejemplo, de precipitación y temperatura, pero también de radiación, humedad y viento, son entonces el insumo para impulsar modelos de sistemas hidrológicos de complejidad variable, que simulan los procesos individuales del ciclo hidrológico a escala de hasta decenas o cientos de metros.



Figura 5. Cadena de modelos para simular los impactos del clima en el ciclo del agua.

Sin embargo, el resultado de los modelos regionales dinámicos, en la mayoría de los casos, está afectado por sesgos respecto al clima observado, por lo que, a menudo, es necesaria una corrección del sesgo antes de poder aplicar los datos climáticos en los modelos de impacto.

El último modelo en la cadena son los llamados **modelos de impacto**, que, en nuestro caso, es el modelo hidrológico. Al tomar en consideración las características del paisaje de las cuencas, como las propiedades del suelo, el uso de la tierra y el relieve, reproducen el patrón de paisaje de una cuenca hidrográfica. En este estudio se utilizó el modelo ecohidrológico SWIM (Modelo Integrado de Suelo y Agua). El presente capítulo ofrece una breve descripción del mismo y en el documento metodológico se amplía la información.

2.1.1 Los escenarios del cambio climático

Para el sexto informe del IPCC (AR6) se ha desarrollado un nuevo conjunto de escenarios climáticos llamados las Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP, por su sigla en inglés). Estos nuevos escenarios representan narrativas para diferentes vías de desarrollo socioeconómico posibles a nivel mundial, las cuales dan lugar a diferentes aumentos de las concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, conduciendo a diferentes niveles de calentamiento global. Las SSP corresponden aproximadamente a los escenarios de las Trayectorias de Concentración Representativa (RCP, por su sigla en inglés) del anterior informe del IPCC (AR5).

Dado que los cambios en las emisiones de GEI y en el forzamiento radiativo¹ son comparables, esto permite hacer una comparación directa de las simulaciones del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados, CMIP5 y CMIP6 (por sus siglas en inglés). A diferencia de los escenarios RCP, los nuevos escenarios basados en las SSP proporcionan fundamentos económicos y sociales para los patrones de emisión y los cambios asumidos en el uso del suelo (MIT, 2020).

¹ MIT (2020) explica el término: “El forzamiento radiativo es lo que ocurre cuando la cantidad de energía que entra en la atmósfera de la Tierra es diferente de la cantidad de energía que sale de ella. La energía viaja en forma de radiación: la radiación solar que entra en la atmósfera desde el sol y la radiación infrarroja que sale en forma de calor. Si entra más radiación a la Tierra que la que sale -como ocurre actualmente-, la atmósfera se calentará. Esto se llama forzamiento radiativo porque la diferencia de energía puede forzar cambios en el clima de la Tierra”.

Se definieron cinco escenarios SSP básicos. En general, el calentamiento global aumenta de SSP1 a SSP5.

SSP1. La trayectoria sostenible y “verde” describe un mundo que logra cada vez más la sostenibilidad. Se preservan los bienes comunes globales y se respetan los límites de la naturaleza. La política se centra más en el bienestar humano que en el crecimiento económico. Se reducen las desigualdades de ingresos entre los Estados y dentro de ellos. El consumo se orienta a minimizar el uso de materiales y energía.

SSP2. La “mitad del camino” o trayectoria intermedia hace una extrapolación del desarrollo global pasado y actual hacia el futuro. Las tendencias de los ingresos en los distintos países difieren significativamente. Existe cierta cooperación entre los Estados, pero se expande muy poco. El crecimiento demográfico mundial es moderado y se estabiliza en la segunda mitad del siglo. Los sistemas medioambientales se enfrentan a una cierta degradación.

SSP3. Rivalidad regional: el resurgimiento del nacionalismo y de los conflictos regionales hace que las cuestiones globales pasen a un segundo plano. Las políticas se centran cada vez más en cuestiones de seguridad nacional y regional. Disminuyen las inversiones en educación y desarrollo tecnológico. La desigualdad aumenta. Algunas regiones sufren daños medioambientales severos.

SSP4. La desigualdad: la brecha es cada vez mayor entre las sociedades desarrolladas que cooperan a nivel mundial y las que están estancadas en una etapa de desarrollo inferior, con bajos ingresos y un bajo nivel de educación. Las políticas medioambientales consiguen atacar los problemas locales en algunas

regiones, pero no en otras.

SSP5. Desarrollo basado en combustibles fósiles: los mercados mundiales están cada vez más integrados, lo que da lugar a innovaciones y avances tecnológicos. Sin embargo, el desarrollo social y económico se basa en la intensificación de la explotación de los recursos de combustibles fósiles, con un alto porcentaje de carbón y un estilo de vida de alto consumo energético en todo el mundo. La economía mundial crece y los problemas medioambientales locales, como la contaminación atmosférica, se enfrentan con éxito.

En este estudio, se aplicaron los escenarios SSP1-2,6, SSP3-7,0 y SSP5-8,5 del último informe del IPCC (2021) para cubrir una gama lo más amplia posible de condiciones futuras realistas. Estos escenarios abarcan una serie de niveles de forzamiento radiativo (que van de 2,6 a 8,5 W/m²) en 2100.

El SSP1-2,6 se aproxima a la meta del Acuerdo de París, que limita el calentamiento global a 2 °C por encima de los niveles preindustriales. El escenario se caracteriza por la disminución de las emisiones de GEI hasta llegar al nivel neto cero en 2050, seguido de niveles variables de emisiones netas negativas de CO₂ (IPCC, 2021).

El escenario SSP5-8,5 calentamiento global extremo, con continuidad en el desarrollo elevado de los combustibles fósiles a lo largo del siglo XXI y, en consecuencia, con un fuerte aumento de las emisiones de GEI.

Cabe mencionar que también existe el escenario SSP1-1,9 (aún más optimista que el SSP1-2,6), pero dadas las actuales trayectorias de emisiones, es bastante improbable que se alcance.

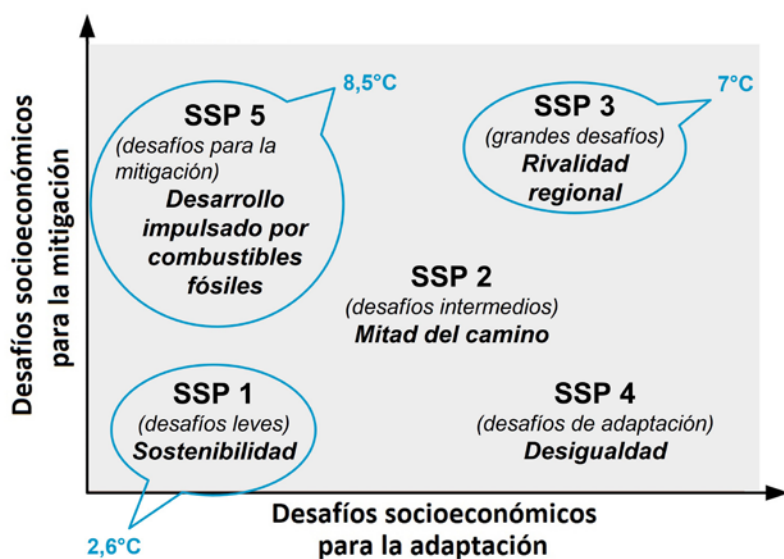


Figura 6. Los escenarios SSP del conjunto de escenarios usados por el IPCC (O'Neill et al., 2016)

2.1.2 El modelo ecohidrológico SWIM

El modelo ecohidrológico SWIM se desarrolló para investigar los impactos de los cambios en el clima y en el uso de la tierra a escala regional, es decir, la escala en que se manifiestan los impactos del cambio climático y se planifican y aplican las medidas de adaptación (Krysanova *et al.*, 2015, Hattermann *et al.*, 2005).

El modelo integra todos los procesos hidrológicos, vegetales y de gestión relevantes e interconectados, como la generación de escorrentía, el crecimiento de las plantas, los ciclos de los nutrientes y el carbono, y la erosión. A esto se añade la gestión del agua y los patrones de cultivo y rendimientos agrícolas. Por tanto, el enfoque permite simular todos los procesos interrelacionados en el marco de un único modelo, con intervalos diarios y tomando en cuenta retroalimentaciones (Figura 5).

El modelo SWIM incluye módulos que permiten analizar temas específicos. El módulo de gestión del agua permite la simulación de reservorios para la protección contra inundaciones, el suministro de agua y el control de caudales bajos. También es posible estudiar opciones de riego y las líneas de transmisión. El módulo de agricultura incluye la simulación de secuencias de cultivo, fertilización y cosecha, así como los ciclos de nutrientes asociados.

El módulo de vegetación simula el crecimiento dinámico de diferentes tipos de bosques, así como de pastizales y matorrales.

SWIM utiliza un esquema de desagregación en tres niveles, desde la cuenca, a la subcuenca, hasta el hidrotopo (también conocido como unidad hidrológica), que generalmente opera a intervalos diarios. La configuración del modelo y el post-procesamiento se apoyan en una interfaz del Sistema de Información Geográfica (SIG). Los resultados se presentan en forma de series temporales y mapas para un grupo de variables.

El presente estudio se centra en los procesos naturales relacionados con el agua y las plantas, y con las opciones de gestión, mientras que la calidad del agua no se ha investigado (para más información, ver el documento metodológico).

En la Tabla 1 se presenta una breve comparación de SWIM con otros modelos hidrológicos que se utilizan en Bolivia. En muchos casos, los resultados de los modelos orientados a procesos como SWIM se utilizan como insumo para otros modelos, como el Sistema de Evaluación y Planificación Hídrica (WEAP, por su sigla en inglés) que se enfoca más en la gestión del agua.

Modelo	SWIM /SWAT	WEAP	HydroBID
Enfoque	Centrado en la modelación integrada del agua, la vegetación, y la gestión y la retroalimentación.	Centrado en la gestión y planificación del agua, laboratorio para examinar estrategias alternativas de desarrollo, y la gestión del agua.	Se centra en la gestión y planificación del agua para simular la hidrología y la gestión de los recursos hídricos en la región de América Latina y el Caribe.
Distribución espacial	Semidistribuido; con el hidrotopo como unidad de simulación más pequeña, toma en consideración la distribución espacial de los suelos y la cubierta vegetal.	Semidistribuido; con subcuencas como unidades de simulación más pequeñas. Los suelos y el uso de la tierra son agregados a nivel de subcuenca.	Abarca toda la región de América Latina y el Caribe. A esta escala, los suelos y el uso de la tierra se agregan a nivel de subcuenca.
Detalle del proceso	Más basado en la física y orientado a los procesos; intervalo diario.	Alta proporción de supuestos conceptuales; intervalo diario a anual.	Alta proporción de supuestos conceptuales; intervalo diario a anual.
Promotor	Instituto Potsdam para la Investigación del Impacto del Cambio Climático www.pik-potsdam.de/en/institute/departments/climate-resilience/models/swim	Instituto de Medio Ambiente de Estocolmo www.weap21.org	Banco Interamericano de Desarrollo www.iadb.org/en/water-and-sanitation/about-hydro-bid

Tabla 1. Comparación de SWIM con otros modelos hidrológicos usados en Bolivia

El modelo SWIM ha sido aplicado en varios proyectos a nivel mundial para investigar las consecuencias del cambio climático y del uso de la tierra en el nexo agua-energía-alimentación y en los extremos hidrológicos (ver Hattermann *et al.*, 2011 y 2014; para una visión general, Krysanova *et al.*, 2015). Asimismo, ha formado parte de varios estudios de intercomparación de modelos (ver Hattermann *et al.*, 2017 y 2018).

Las condiciones hidrológicas actuales en las cuencas de los ríos Guadalquivir, San Martín y Paraguá se modelaron utilizando como insumo el modelo SWIM e información meteorológica en grilla del conjunto de datos W5E5 (Lange *et al.*, 2021). Se utilizaron los datos de precipitación y temperatura de W5E5 dado que coinciden muy bien con los del conjunto de datos GMET, que se basa en las observaciones de campo del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI). Asimismo, las simulaciones de modelos climáticos globales, utilizadas para explorar los cambios proyectados en los componentes del balance hídrico y el flujo del agua, se corrigieron por sesgo y se hizo la reducción de escala utilizando W5E5.

2.1.3 Limitaciones y fuentes de incertidumbre

Como se ha mencionado en la sección de objetivos, la planificación para la seguridad hídrica requiere un enfoque adaptativo, ya que no existe certeza absoluta sobre la Trayectoria Socioeconómica Compartida (SSP) que tomará el mundo, el cambio climático resultante y los impactos a nivel local. Los modelos pueden servir de apoyo a la planificación y la toma de decisiones, pero para utilizarlos eficazmente hay que conocer sus limitaciones.

Las incertidumbres en los datos de los escenarios climáticos y los impactos hidrológicos derivados de estos pueden ser considerables (Blöschl *et al.*, 2010). Además de las incertidumbres inherentes a los propios modelos climáticos y de impacto que fueron utilizados, el cálculo de promedios, así como la falta de retroalimentación entre los tres modelos ordenados jerárquicamente en la Figura 5, conducen a incertidumbres adicionales.

En general, los modelos matemáticos son sólo una abstracción del entorno físico y los datos de insumo que el modelo hidrológico necesita y utiliza, además de los datos meteorológicos, que representan los procesos hidrológicos y los flujos de agua (como los datos de suelos, vegetación y elevación), también suelen estar sujetos a incertidumbres.

La mayor incertidumbre relacionada con el modelo



climático se presenta en la interfaz entre las regiones en las que las precipitaciones aumentan con gran certeza y aquellas regiones en las que las precipitaciones disminuyen con gran certeza. Diferentes modelos climáticos, en su mayoría, establecen la zona de transición en lugares diferentes. Esto, por supuesto, también tiene impactos en el resultado hidrológico (Hattermann *et al.*, 2018).

Tampoco se sabe con certeza cómo evolucionarán las emisiones de los GEI a lo largo de este siglo, ya que varias vías de desarrollo son posibles, desde “seguir con lo de siempre” hasta esfuerzos para “evitar lo máximo posible”. Esto se debe a que la evolución futura de los factores socioeconómicos (tamaño de la población, desarrollo económico y prosperidad, y también patrones de estilo de vida, tecnología, etc.) son en gran medida imprevisibles y no se les puede asignar probabilidades objetivas.

Por ello, para mapear los rangos de probabilidad o las incertidumbres existentes que inicialmente son desconocidas en los impactos climáticos, se propone aplicar una serie de escenarios en las evaluaciones de impacto, en vez de un único escenario. De esta manera, pueden mapearse las diferencias en el curso de las futuras concentraciones de GEI en la atmósfera. Del mismo modo, las diferencias en los impactos climáticos simulados por los respectivos modelos pueden ser analizadas mediante comparaciones de modelos (IPCC, 2014). Sin embargo, en la investigación del impacto climático se puede intentar limitar el rango de resultados posibles y, de este modo, también la incertidumbre del modelo y escenarios, mediante la incorporación de más información al análisis (añadiendo observaciones locales, conocimientos empíricos, dependencias basadas en la física, mayor resolución de simulaciones, teorías estadísticas, etc.).

En este estudio, se utilizaron los resultados de diez GCM para tres escenarios con el fin de explorar el rango de incertidumbre en las proyecciones de impacto climático y así sacar conclusiones robustas.

En las Figuras 7 y 8 se muestra el rango de incertidumbre en las tendencias de temperatura y precipitación en Santa Cruz y Tarija, comparando el conjunto completo de datos de los CMIP5 y CMIP6, y los datos de los GCM ISIMIP3b aplicados bajo condiciones climáticas RCP8,5. Aquí se muestran las diferencias de los valores medios para los periodos 1971-2000 y 2071-2100.

Para proveer de insumos a la planificación adaptativa, el informe se centra en la **gama de cambios posibles** y no en valores discretos que podrían diferir entre distintas simulaciones de los modelos.

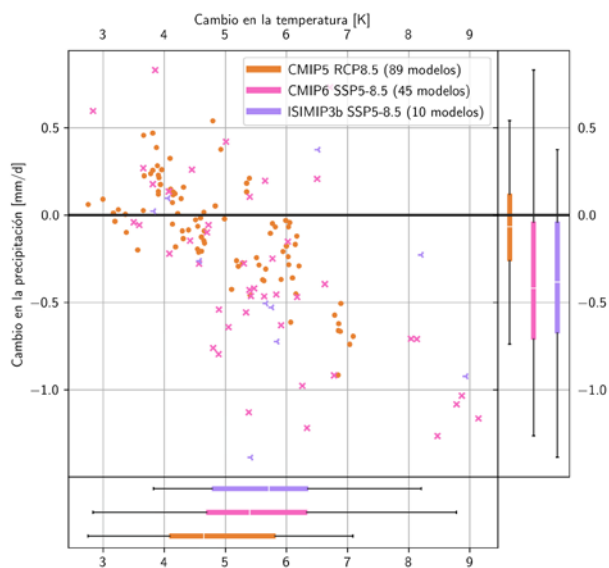


Figura 7. Tendencias de la temperatura y la precipitación en el departamento de Santa Cruz, comparando el conjunto de datos del CMIP5 y el CMIP6 y los datos aplicados del GCM ISIMIP3b, en condiciones climáticas RCP8,5.

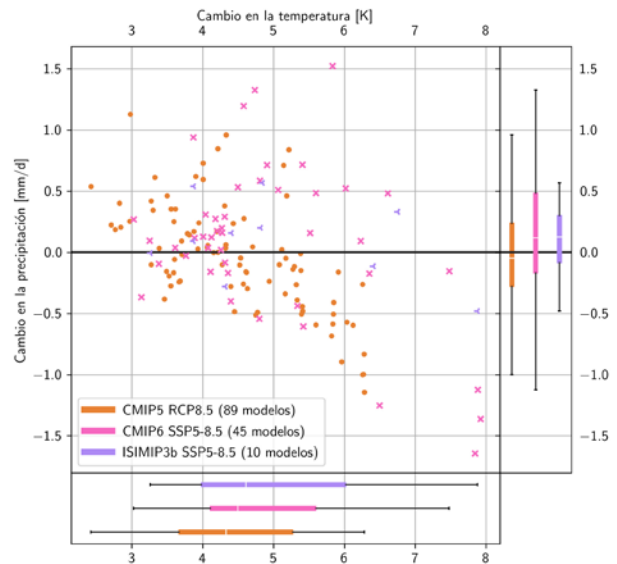


Figura 8. Tendencias de la temperatura y la precipitación en el departamento de Tarija, comparando el conjunto de datos del CMIP5 y el CMIP6 y los datos aplicados del GCM ISIMIP3b, en condiciones climáticas RCP8,5.

Los resultados muestran que todos los conjuntos de datos tienen una tendencia similar en Santa Cruz, donde la tendencia de la precipitación es más fuerte en el CMIP6, mientras que para Tarija la tendencia de la precipitación media de los escenarios CMIP5 a CMIP6 es diferente. Sin embargo, también es visible la enorme incertidumbre sobre Tarija, al tiempo que hay una tendencia a menos precipitación con temperaturas más altas en los datos de todos los escenarios.

2.2 Condiciones climáticas actuales en Bolivia

Bolivia presenta condiciones hidroclimáticas complejas debido a sus zonas climáticas diferentes y a la cordillera de los Andes que actúa como barrera topográfica para el flujo cálido y húmedo procedente de la región amazónica, lo cual provoca fuertes diferencias locales y regionales en el clima.

El país tiene tres regiones claramente diferenciadas: las tierras bajas con elevaciones de hasta 500 m.s.n.m. (alrededor de 60 % del país); el Altiplano y las montañas andinas con elevaciones superiores a 3500 m.s.n.m. (alrededor de 16 % de Bolivia); y los

valles y las laderas de las montañas andinas que abarcan el 24 % restante del territorio boliviano (Abadi *et al.*, 2020).

El clima varía desde el tropical en el noreste, semiárido en el sudeste, bosques tropicales montañosos a lo largo de las laderas orientales de los Andes, y tierras altas áridas al oeste (Velpuri *et al.*, 2016). La precipitación media anual (y temperatura) es de unos 1285 mm (22 °C) en Bolivia, 1300 mm (25 °C) en la región de Santa Cruz, y 745 mm (19 °C) en la región de Tarija (Figura 9).

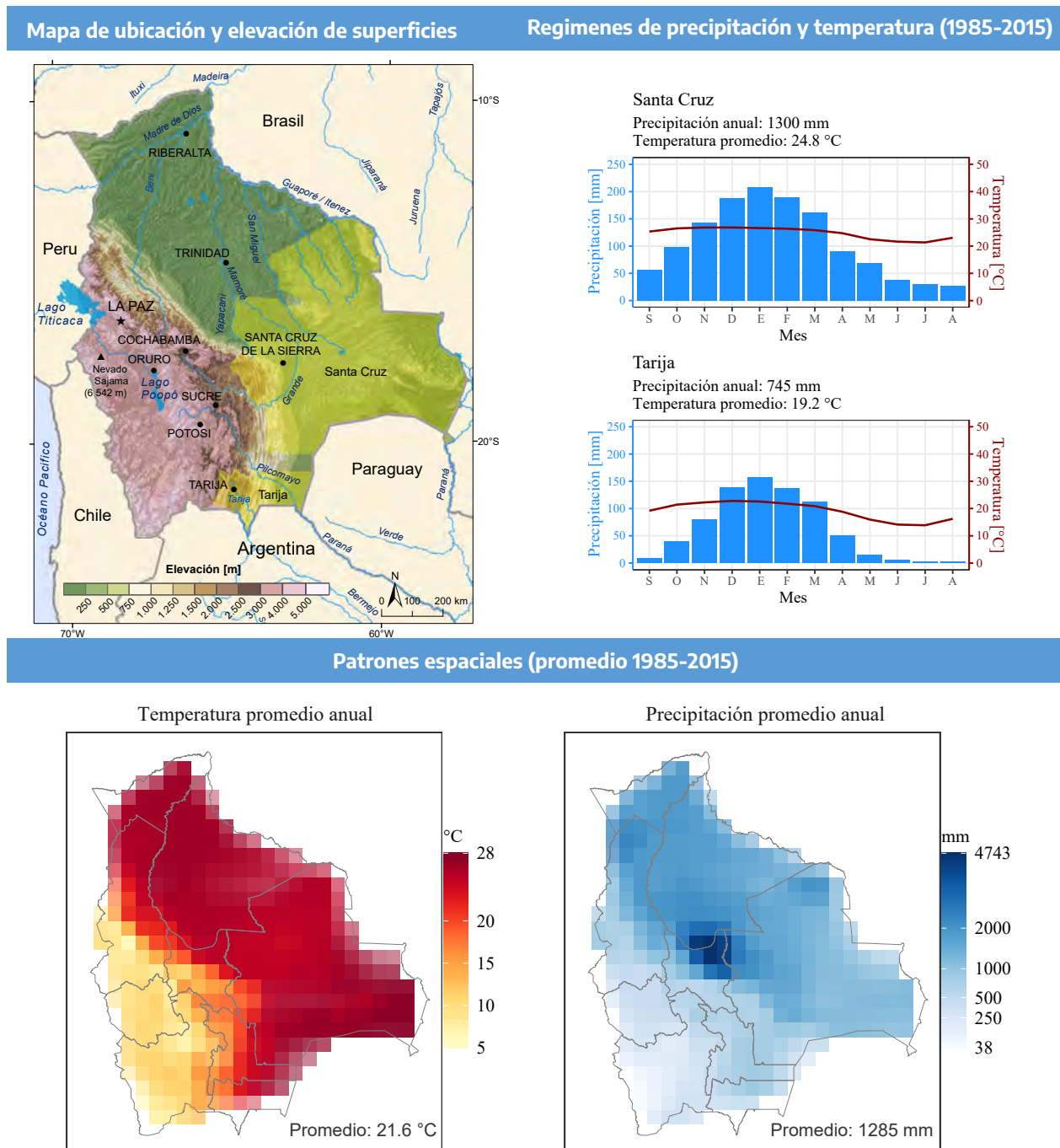


Figura 9. Bolivia: Regímenes de precipitación y temperatura de 1985-2015. Elaboración propia.



Los patrones espaciales de la temperatura media anual y de la precipitación total anual se muestran en la Figura 9. El patrón de la temperatura está fuertemente influenciado por la elevación (y por la topografía, la altura y el gradiente). Las temperaturas más altas se dan en las tierras bajas y las más bajas en el Altiplano y en las cadenas montañosas circundantes.

Asimismo, las regiones del norte son más cálidas que las del sur. El patrón espacial de las precipitaciones se caracteriza por un fuerte gradiente este-oeste. En la parte norte de las tierras bajas se produce una mayor cantidad de precipitaciones que en la parte sur. Las cantidades más altas de precipitación (alrededor de 5000 mm/año) se registran en el lado este de la Cordillera Oriental. El Altiplano recibe la menor cantidad de precipitaciones dentro de Bolivia (entre 250 y 750 mm/año). El régimen de precipitaciones anuales en Bolivia es de carácter unimodal. La estación húmeda es relativamente corta en los Andes, como ocurre en la cuenca del Guadalquivir, y más larga en las tierras bajas, como en las cuencas amazónicas de San Martín y Paraguará (Figura 9). Por ello, la corta temporada de lluvias, que dura de noviembre a marzo en las cuencas andinas, determina en gran medida la temporada agrícola.

En Bolivia, la gran variabilidad espacial de la precipitación es modulada por la interacción entre los patrones de circulación a gran escala (por ejemplo, la migración latitudinal de la Zona de Convergencia Intertropical Atlántica, los Sistemas Monzónicos Sudamericanos, y el área de alta presión atmosférica en Bolivia), los patrones locales (por ejemplo, el transporte ascendente y descendente de humedad), así como la compleja orografía andina (Espinoza *et al.*, 2020; Garreaud, 2009; Segura *et al.*, 2020). Además, el Niño-Oscilación del Sur (ENSO) es un modulador clave de la hidroclimatología a lo largo de los Andes,

en escalas de tiempo interanuales (Poveda *et al.*, 2020). En general, durante la fase cálida de ENSO se producen menos precipitaciones en los Andes bolivianos (Canedo-Rosso *et al.*, 2019; Seiler *et al.*, 2013a), mientras que en las tierras bajas se producen mayores cantidades de precipitaciones y un mayor número de eventos extremos durante ambas fases (fría y cálida) de ENSO (Seiler *et al.*, 2013a).

La temperatura media anual del aire ha aumentado en 0,1 °C por década desde mediados del siglo XX en Bolivia (Seiler *et al.*, 2013a), con tendencias más elevadas en los Andes y el Altiplano, donde el calentamiento ha alcanzado entre 0,15 y 0,25 °C por década en las temperaturas máximas anuales y de la estación cálida (López-Moreno *et al.*, 2016).

La precipitación ha aumentado (2,5 mm por año) durante el período 1981-2018 en la región del Altiplano (Segura *et al.*, 2020; Torres-Batló y Martí-Cardona, 2020). El mayor aumento de la precipitación se ha detectado en la parte noroeste del Altiplano durante la estación de lluvias. Sin embargo, se registró una tendencia negativa de la duración de la estación de lluvias a razón de -0,4 días por año (Torres-Batló and Martí-Cardona, 2020).

Por lo tanto, los cambios climáticos ocurridos (aumento de la temperatura y reducción de la duración de la estación lluviosa) podrían tener graves consecuencias para los recursos hídricos de los ecosistemas andinos. Hasta el momento, no se han reportado cambios en las precipitaciones sobre la cuenca amazónica boliviana; no obstante, como resultado del aumento de la temperatura del aire, se han observado incrementos en la evapotranspiración y una disminución del rendimiento hídrico (Heerspink *et al.*, 2020).



Capítulo 3. Cambio climático en Bolivia y en las cuencas

Este capítulo identifica los cambios en las condiciones climáticas futuras en Bolivia utilizando la última generación de escenarios de cambio climático junto con diversos indicadores que son ampliamente utilizados. Los cambios proyectados en los indicadores climáticos se examinaron para tres escenarios de alta prioridad de las Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP). En concreto, se trata de los escenarios SSP1-2,6, SSP3-7,0, y SSP5-8,5, que abarcan una amplia gama de posibles niveles de calentamiento global en 2100.

Se utilizaron registros diarios de precipitación, temperatura media, temperatura máxima y temperatura mínima, ajustados por sesgo, procedentes de un conjunto de diez modelos climáticos del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados² (CIMIP, por su sigla en inglés). Se analizaron los datos climáticos proyectados para mostrar la gama de posibles condiciones climáticas futuras en un:

- Futuro cercano (década de 2030; 2015-2045)
- futuro medio o mediados de siglo (década de 2050; 2035-2065)
- futuro lejano (década de 2080; 2065-2095)

Cada uno de estos tiempos se pone en relación con el clima actual, utilizado como periodo de referencia(2000; 1985-2015).

Los datos climáticos simulados de los diez modelos climáticos se utilizan para analizar el efecto de los tres escenarios diferentes de calentamiento global. La mediana del conjunto proporciona un estimado conservador de los posibles cambios climáticos, mientras la dispersión del conjunto da una estimación de la incertidumbre. Los análisis de proyección del cambio climático se basan en promedios de 31 años³, lo que significa, por ejemplo, que la temperatura media anual en 2030 se calcula como promedio de la temperatura media entre 2015 y 2045.

Dado que el clima es un fenómeno regional, el análisis de los cambios futuros se realiza a nivel nacional y departamental. Sobre esa base, se describen luego los impactos en el ciclo hidrológico a nivel de cuenca. Los

indicadores climáticos analizados son:

- Temperatura media anual del aire
- número de días muy calurosos al año (temperatura máxima superior a 35 °C)
- número de noches tropicales al año (temperatura mínima superior a 20 °C)
- días de heladas (temperatura mínima inferior a 0 °C)
- precipitación anual total
- frecuencia e intensidad de eventos de precipitaciones fuertes
- frecuencia de eventos de sequía extrema

El indicador de intensidad de las precipitaciones fuertes es la precipitación diaria máxima de un año. El indicador de la frecuencia de las precipitaciones fuertes es el número de días que superan un cierto umbral. El umbral se define como el percentil 95 de días con precipitación (definido por los días con más de 0,1 mm de precipitación) durante el período de referencia 1985-2015 para cada celda de la grilla.

El Índice Estandarizado de Precipitación-Evapotranspiración (SPEI, por su sigla en inglés) (Vicente-Serrano et al., 2010), se utilizó como medida de sequías meteorológicas. El SPEI representa el balance hídrico climático, esto es, la diferencia mensual entre la precipitación y la evapotranspiración potencial (Thornthwaite, 1948) que se calcula a diferentes escalas de tiempo. Matemáticamente, el SPEI es similar al Índice de Precipitación Estandarizado (SPI, por su sigla en inglés), pero incluye el rol de la temperatura y, por lo tanto, es apropiado para evaluar los efectos del cambio climático en la sequía, en el contexto del calentamiento global. Cuando el valor del SPEI es menor o igual a -2 ($SPEI \leq -2$), se considera evento de sequía extrema (Shekhar and Shapiro, 2019). En este estudio, el SPEI se calculó para un espacio de tiempo de 6 meses (SPEI-6), el cual se suele utilizar como indicador de reducción del caudal y de almacenamiento en los reservorios.

² Por razones prácticas, los modelos no se explican aquí. Se puede encontrar más información en el documento metodológico que complementa este texto.

³ Las variables climáticas (como la temperatura y las precipitaciones) muestran una gran variabilidad anual. Para analizar los cambios climáticos a largo plazo, en lugar de las variabilidades anuales, se comparan entre sí las medias de las variables climáticas a lo largo de 20 a 40 años.

3.1 Bolivia

Temperatura del aire

En comparación con el periodo de referencia, las proyecciones de la temperatura del aire muestran (a) un claro aumento de la temperatura media anual en los tres escenarios SSP durante el siglo XXI. Esta

tendencia de calentamiento contribuirá a que haya (b) más días muy calurosos, así como (c) noches tropicales, mientras que se espera que haya (d) menos días de heladas, en todos los escenarios del futuro.

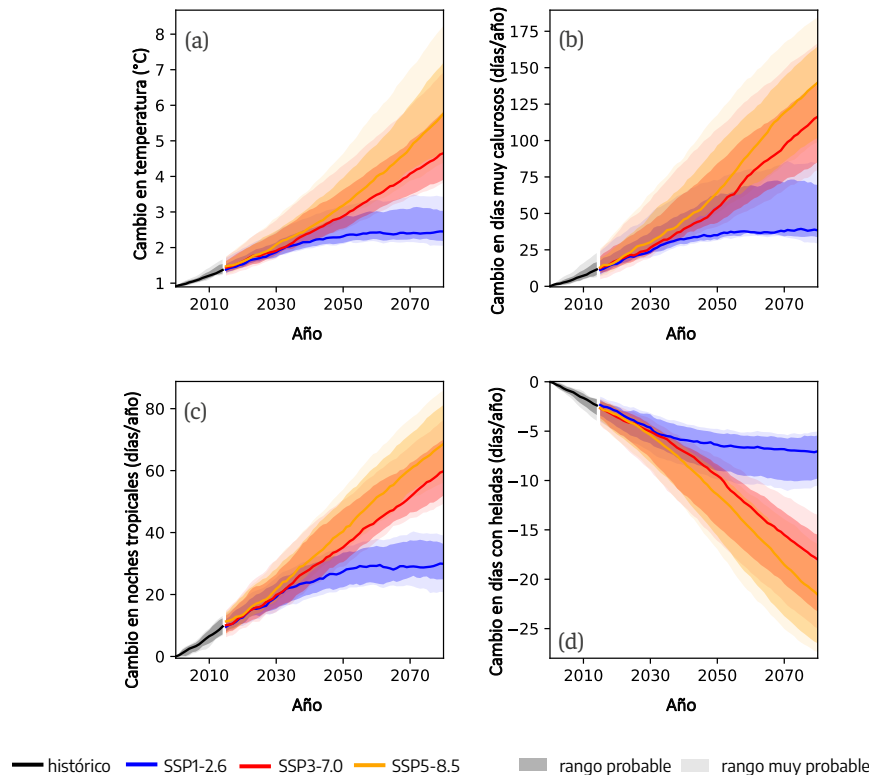


Figura 10. Cambios proyectados en comparación con la media de 1985-2015 en (a) la temperatura media anual del aire, (b) los días muy calurosos, (c) las noches tropicales, y (d) los días de heladas durante el siglo XXI, diferenciados por trayectoria de escenario SSP para Bolivia.

Las líneas y las áreas sombreadas muestran los percentiles multimodelo de los valores medios de 31 años bajo SSP1-2,6 (azul), SSP3-7,0 (rojo) y SSP5-8,5 (naranja).

Las líneas representan la mejor estimación definida por la mediana del conjunto de los diez modelos climáticos, y las áreas sombreadas representan los rangos de incertidumbre de los cambios proyectados, definidos por los intervalos de confianza del 66 % (rango probable) y del 90 % (rango muy probable).

Siguiendo cada uno de los escenarios de calentamiento global, las proyecciones climáticas comienzan a divergir después de la década de 2030. Los escenarios SSP3-7,0 y SSP5-8,5 muestran un aumento constante de la temperatura del aire, mientras que la tendencia al calentamiento del escenario SSP1-2,6 se estabiliza después de la década de 2050.

En comparación con el periodo de referencia es muy probable que, en los distintos escenarios futuros, los cambios previstos en la temperatura media anual sean: 2-3,4 °C (SSP1-2,6); 3,8-6,9 °C (SSP3-7,0) y 4,4-8,2 °C (SSP5-8,5).

Luego, de acuerdo con la mediana multimodelo, se proyecta que la temperatura anual en Bolivia, en promedio, aumente bajo los diferentes escenarios en: 2,5 °C (SSP1-2,6), 4,7 °C (SSP3-7,0), y 5,8 °C (SSP5-8,5) para el futuro lejano (2065-2095). Se han observado resultados similares en las proyecciones de calentamiento futuro (en un rango de +2,5 °C a +5,9 °C) basadas en las simulaciones del CMIP5 (Seiler et al., 2013b).

La temperatura del aire aumenta en todas las estaciones, y el mayor incremento se produce durante septiembre-noviembre.

En la Figura 11, a continuación, se muestra la mediana multimodelo y los intervalos de confianza del 66 % (rango probable) y del 90 % (rango muy probable). El cambio de temperatura del aire aumenta notablemente en todos los meses del año a partir

del futuro cercano (2015-2045). Sin embargo, en el escenario más optimista SSP1-2,6, el comportamiento de la temperatura se estabiliza hacia el futuro lejano.

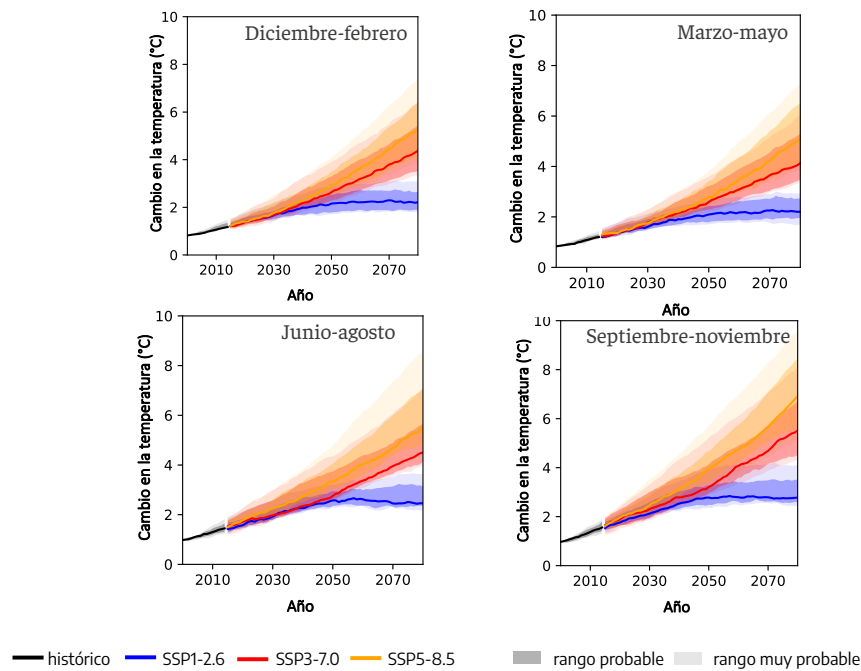


Figura 11. Cambios proyectados en comparación con la media de 1985-2015 en la temperatura media estacional de Bolivia para diferentes escenarios de calentamiento climático.

Desde el punto de vista geográfico, el mayor aumento de la temperatura del aire se proyecta para el Altiplano sur y las tierras bajas al norte del país.

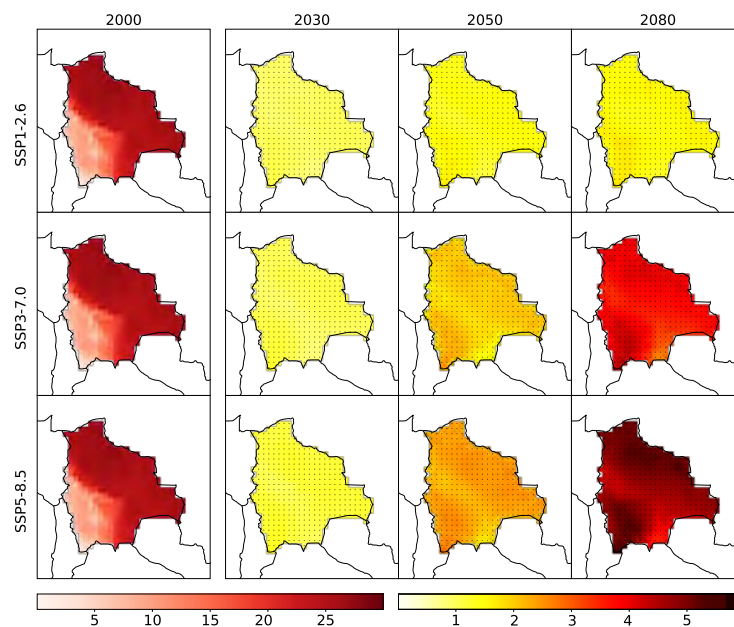


Figura 12. Cambios proyectados en la temperatura media anual a nivel nacional para los tres diferentes escenarios SSP.⁴

⁴ Los colores muestran las medianas multimodelo de los valores promedios de 31 años bajo el SSP1-2,6 (fila superior), el SSP3-7,0 (fila central) y el SSP5-8,5 (fila inferior) para diferentes periodos de los 31 años (el año central se indica encima de cada columna). Los colores de la columna de la izquierda muestran estos valores para un periodo de referencia (barra de color a la izquierda). Los colores de las demás columnas muestran las diferencias con respecto a este periodo de referencia (barra de color a la derecha). La presencia de un punto en las demás columnas indica que al menos 75 % de todos los modelos coinciden en la diferencia.

Para el futuro cercano (2030; 2015-2045) y los tres escenarios SSP, no se prevén cambios significativos en la temperatura media anual. En los casos de mediados del siglo (2050; 2035-2065) y el futuro lejano (2080; 2065-2095), se produce un gran aumento de la temperatura en relación con el periodo de referencia (2000; 1985-2015), por lo que los niveles alcanzados son alarmantes.

Asimismo, se proyectan más días muy calurosos sobre la ladera este de los Andes y las tierras bajas, con cambios mucho más pronunciados sobre la zona climática tropical de las tierras bajas del norte en los escenarios SSP3-7,0 y SSP5-8,5 y para los periodos de mediados de siglo y futuro lejano.

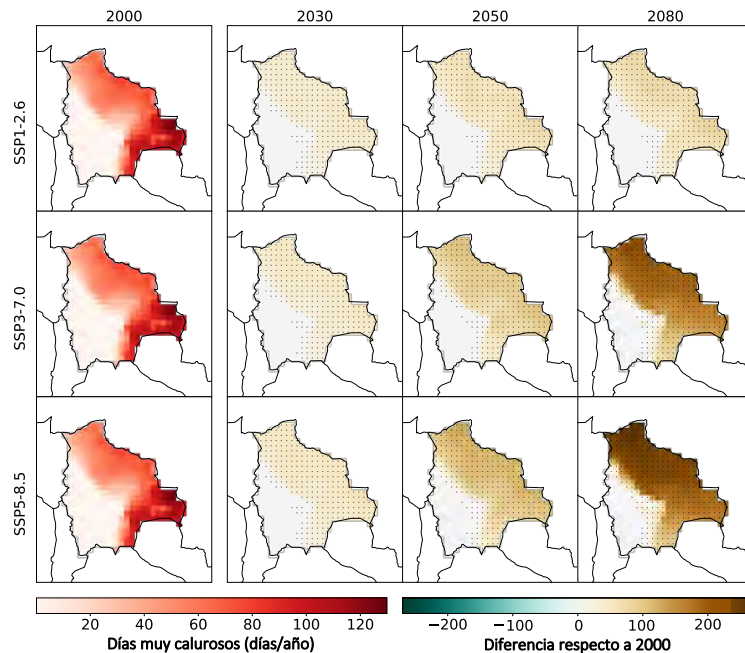


Figura 13. Cambios proyectados en los días muy calurosos (temperatura máxima diaria superior a 35 °C) a nivel nacional para los tres diferentes escenarios SSP.

Igualmente, se prevé que las noches tropicales también aumenten en la ladera este de los Andes y en las tierras bajas. Los cambios en las noches

tropicales son más pronunciados en las tierras bajas del sur y en la ladera este de los Andes.

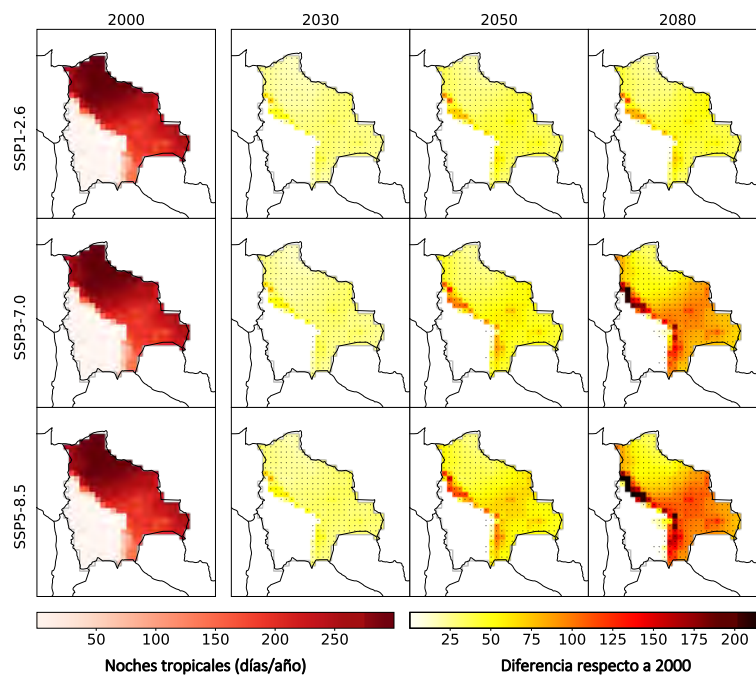


Figura 14. Cambios proyectados en las noches tropicales (temperatura mínima diaria del aire superior a 20 °C) a nivel nacional para los tres escenarios diferentes SSP.

En cuanto al número de días de heladas, se prevé una fuerte disminución en la región del Altiplano.

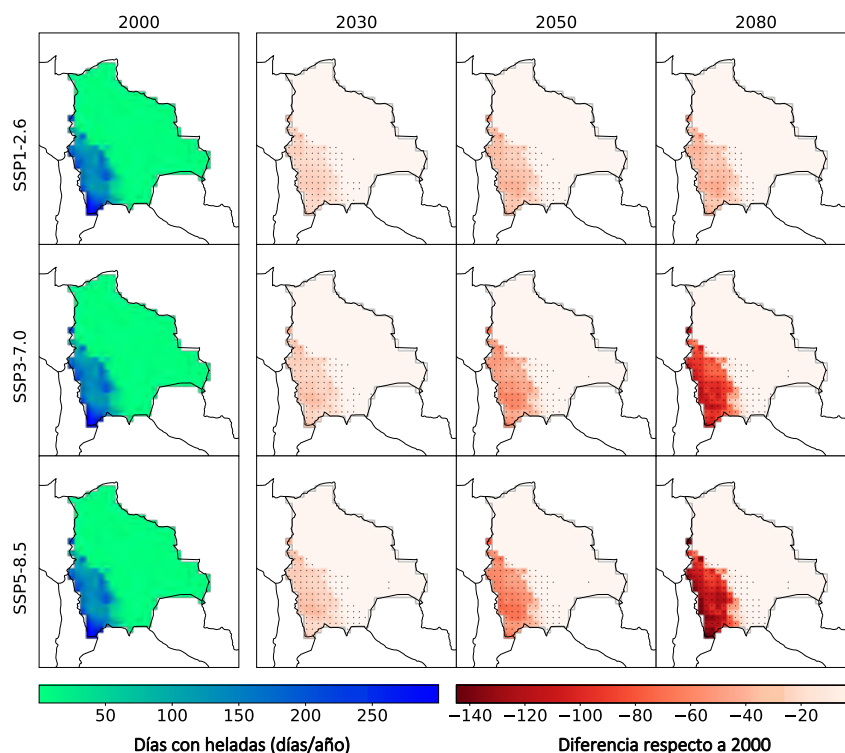


Figura 15. Cambios proyectados en los días de heladas (temperatura mínima diaria por debajo de 0 °C) a nivel nacional para los tres diferentes escenarios SSP.

Precipitación

La mediana multimodelo indica una tendencia negativa en las cantidades de precipitación proyectadas bajo los diferentes escenarios (a), con una disminución promedio de 30 mm (SSP1-2,6), 68 mm (SSP3-7,0) y 67 mm (SSP5-8,5) para el futuro lejano (2065-2095), en relación con el periodo de referencia. Asimismo, los cambios en (b) la frecuencia de los

días de precipitación fuerte, y (c) en la intensidad de la precipitación fuerte presentan incertidumbres importantes (mayor dispersión del conjunto) cuando se promedian para todo el país. Aquí se muestra la mediana multimodelo y los intervalos de confianza del 66 % (rango probable) y del 90 % (rango muy probable).

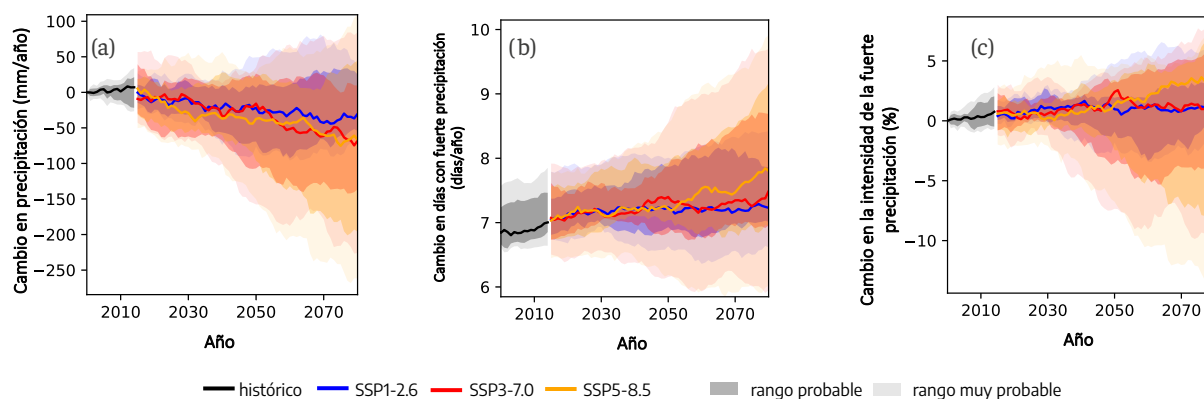


Figura 16. Cambios proyectados en comparación con el promedio de 1985-2015 en la precipitación media anual para Bolivia.

La gran dispersión del conjunto sugiere una gran incertidumbre en las proyecciones de precipitación en todo el conjunto de modelos. Se prevé que la precipitación disminuya durante los meses más

húmedos, a nivel nacional y especialmente entre septiembre y noviembre, en los escenarios SSP3-7,0 y SSP5-8,5.

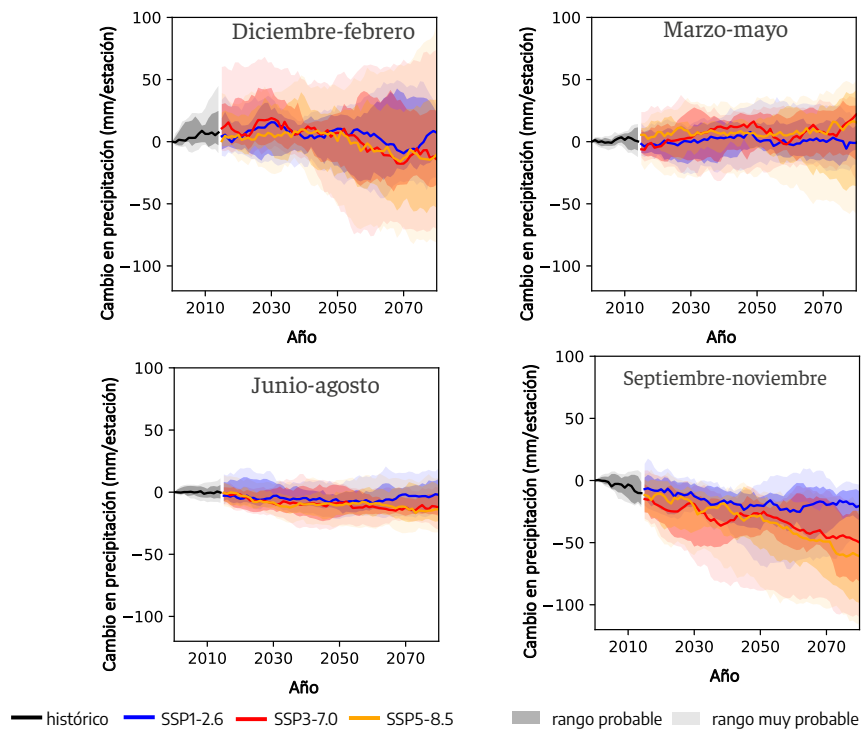


Figura 17. Cambios proyectados en comparación con la media de 1985-2015 en la precipitación media estacional para diferentes escenarios de calentamiento climático a nivel nacional.

Durante los meses de diciembre a febrero, las precipitaciones tienden a disminuir en la segunda mitad del siglo, en todos los escenarios. Entre marzo y agosto, las precipitaciones se mantienen, en general, sin cambios, con una tendencia a un aumento de precipitaciones en los escenarios SSP3-7,0 y SSP5-8,5, en el periodo marzo-mayo.

Por otra parte, los cambios previstos en las precipitaciones difieren según las regiones. Se hace hincapié en las zonas con una alta confianza en la proyección de las precipitaciones (más del 75 % de los modelos CMIP6 coinciden en el sentido del cambio), marcadas con puntos, especialmente en los escenarios de mayores emisiones.

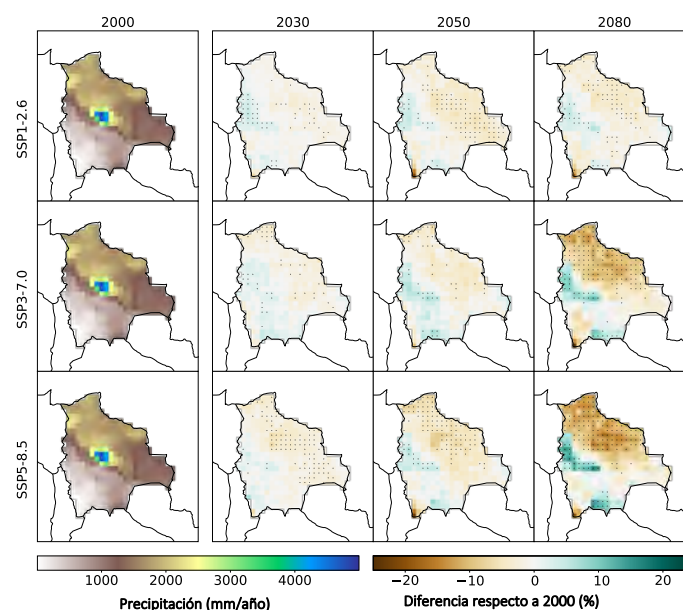


Figura 18. Cambios proyectados en la precipitación media anual a nivel nacional para los tres diferentes escenarios de SSP.

Se prevén menos precipitaciones en las tierras bajas del norte del país, donde también se prevé el mayor aumento de la temperatura. Estas proyecciones podrían tener implicaciones negativas en el ecosistema de los bosques tropicales y en los recursos hídricos.

Se proyectan más precipitaciones en la parte norte del Altiplano boliviano y en las laderas al sudeste de los

Andes, donde se encuentra el departamento de Tarija.

No obstante, la distribución espacial de los cambios proyectados revela que los modelos CMIP6 coinciden en proyectar más días de precipitaciones fuertes e intensidad de precipitaciones fuertes sobre los Andes bolivianos para finales del siglo XXI, bajo los escenarios SSP3-7,0 y SSP5-8,5 (Figuras 19 y 20).

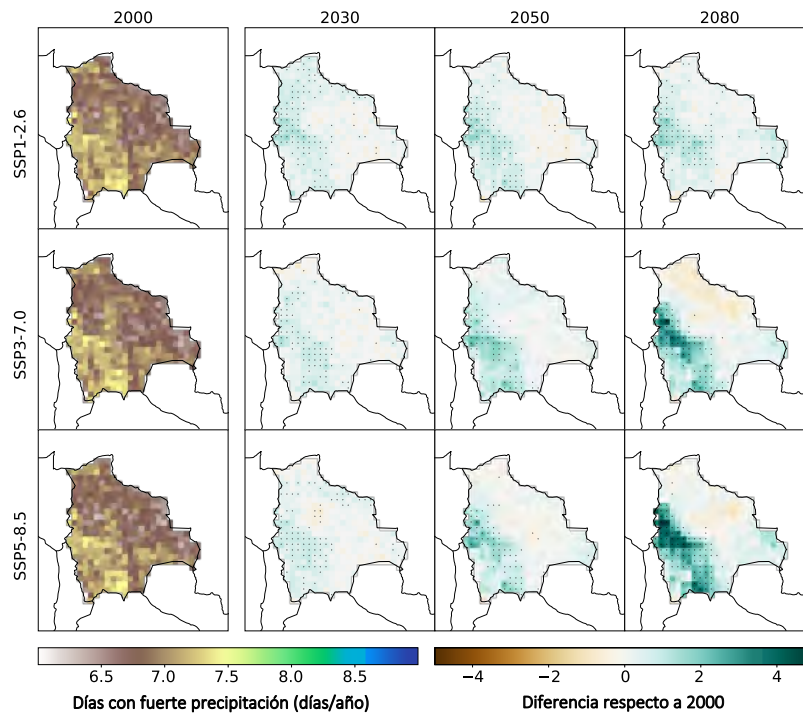


Figura 19. Cambios proyectados en la frecuencia de días de precipitación fuerte a nivel nacional para los tres escenarios diferentes de SSP.

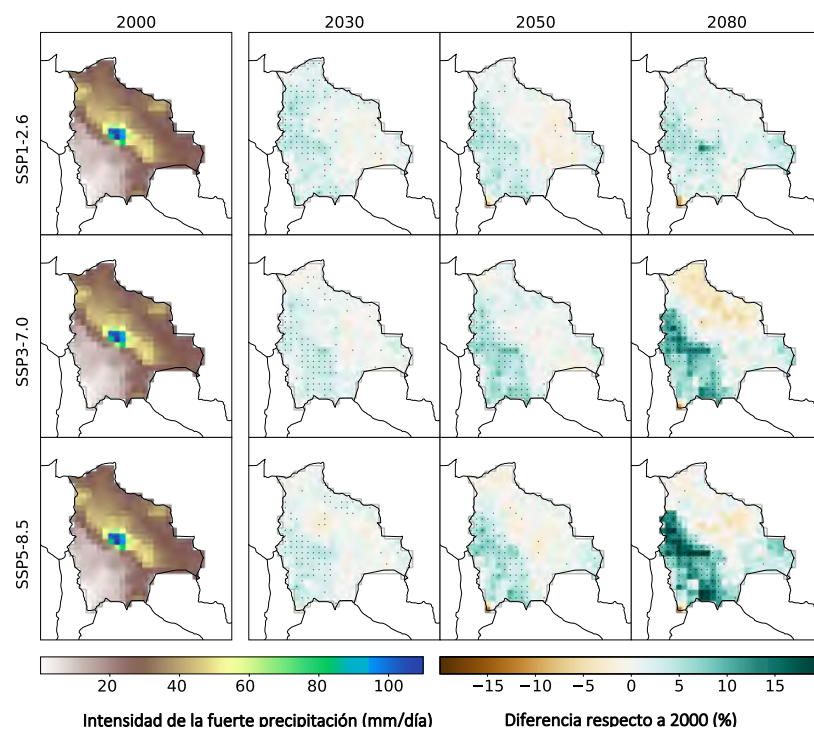


Figura 20. Cambios proyectados en la intensidad de precipitaciones fuertes a nivel nacional para los tres escenarios diferentes de SSP.

Sequía

Es probable que la frecuencia de las sequías extremas, aquí representada por el Índice de Precipitación-Evapotranspiración Estandarizado (SPEI), aumente en Bolivia en el futuro. El aumento se produce más rápidamente después de la década de 2030 en los escenarios SSP3-7,0 y SSP5-8,5, mientras que en el

escenario SSP1-2,6 se prevé una ligera disminución después de la década de 2050 (Figura 21). Aquí se muestra la mediana multimodelo y los intervalos de confianza del 66 % (rango probable) y del 90 % (rango muy probable).

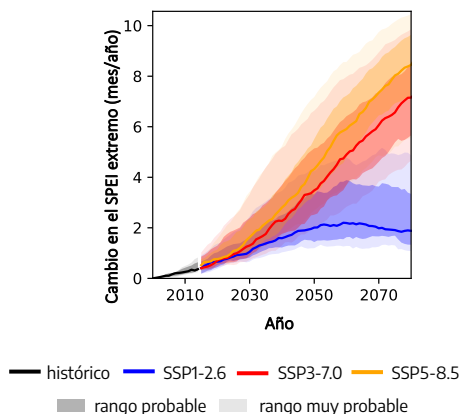


Figura 21. Cambios proyectados en comparación con el promedio de 1985-2015 en la frecuencia de eventos de sequía extrema (Índice de Precipitación-Evapotranspiración Estandarizado [SPEI] ≤ -2) durante el siglo XXI, diferenciados por escenarios SSP para Bolivia.

Para el futuro lejano (década de 2080), es probable que la frecuencia de las sequías extremas aumente en 2 meses/año (SSP1-2,6), 7 meses/año (SSP3-7,0) y 8 meses/año (SSP5-8,5), en comparación con el período de referencia. Los patrones se caracterizan

por un aumento de los eventos de sequía extrema en toda Bolivia, con cambios muy pronunciados en las laderas orientales de los Andes, las tierras bajas y la parte sudoeste del Altiplano (Figura 22).

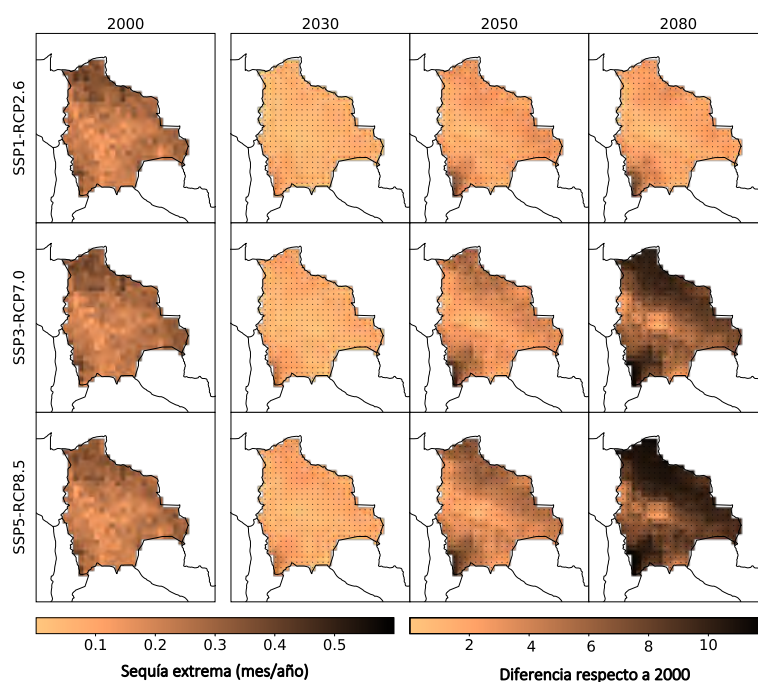


Figura 22. Cambios proyectados en la frecuencia de eventos de sequía extrema (Índice de Precipitación-Evapotranspiración Estandarizado [SPEI] ≤ -2) en el futuro cercano (década de 2030; 2015-2045), a mediados de siglo (década de 2050; 2035-2065) y en el futuro lejano (década de 2080; 2065-2095), en relación con el período de referencia (década de 2000; 1985-2015), para los tres escenarios diferentes de SSP.

En resumen, los resultados muestran un claro aumento de la frecuencia de las sequías extremas a lo largo del siglo XXI bajo todos los escenarios de calentamiento global considerados. Estos resultados

sugieren que Bolivia se enfrentará a un aumento sin precedentes de los eventos de sequía extrema a finales del siglo XXI, particularmente bajo los escenarios SSP3-7,0 y SSP5-8,5.



3.2 Departamento de Santa Cruz

Temperatura del aire

Las proyecciones climáticas muestran un claro aumento de la temperatura media anual bajo todos los escenarios SSP evaluados a lo largo del siglo XXI (Figura 23a) en el departamento de Santa Cruz. El

aumento de la temperatura del aire también conduce a más días muy calurosos (Figura 23b) y más noches tropicales (Figura 23c) en el futuro.

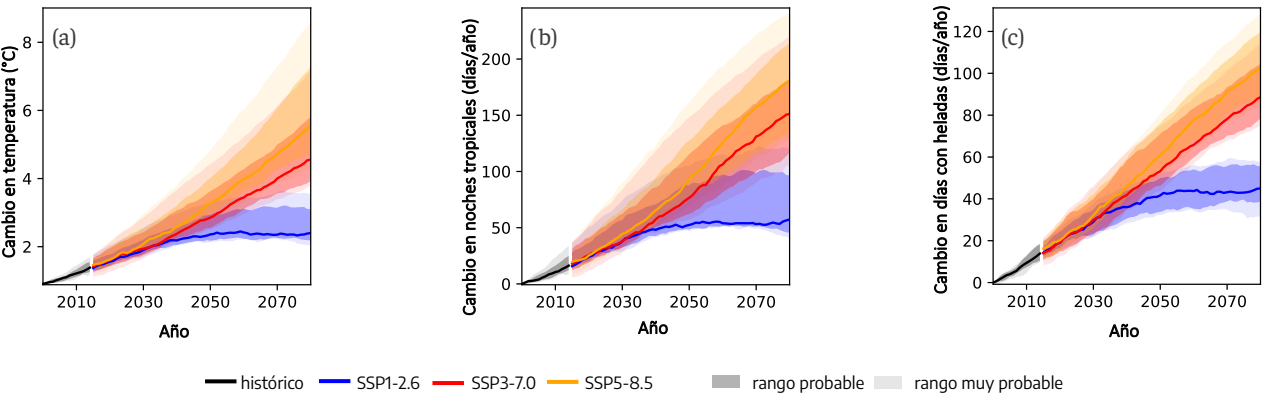


Figura 23. Cambios proyectados en comparación con la media de 1985-2015 en (a) la temperatura media anual, (b) los días muy calurosos, y (c) las noches tropicales durante el siglo XXI, diferenciados por escenarios SSP para Santa Cruz. Aquí se muestra la mediana multimodelo y los intervalos de confianza del 66 % (rango probable) y del 90 % (rango muy probable).

Para los diferentes escenarios futuros existe una variación significativa en la temperatura promedio anual bajo los tres escenarios de cambio climático.

En la Tabla 2 se indican los valores obtenidos como promedios.

Escenario futuro	Temperatura media anual (°C/año)		
	SSP1-2,6	SSP3-7,0	SSP5-8,5
Cercano (década 2030; 2015-2045)	+1,9	+ 1,9	+ 2,1
Mediano (década 2050; 2035-2065)	+ 2,4	+ 2,9	+3,3
Lejano (década 2080; 2065-2095)	+ 2,4	+ 4,6	+ 5,6

Tabla 2. Variación de la temperatura media anual en Santa Cruz para diferentes escenarios futuros considerando los tres SSP de cambio climático.

Asimismo, se proyecta un aumento de los días muy calurosos en 57, 151 y 181 bajo los escenarios SSP1-2,6, SSP3-7,0 y SSP5-8,5, respectivamente, para el futuro lejano, en relación al período de referencia. De forma

similar, se prevé que las noches tropicales aumenten en 50, 89 y 103 en los escenarios SSP1-2,6, SSP3-7,0 y SSP5-8,5, respectivamente.

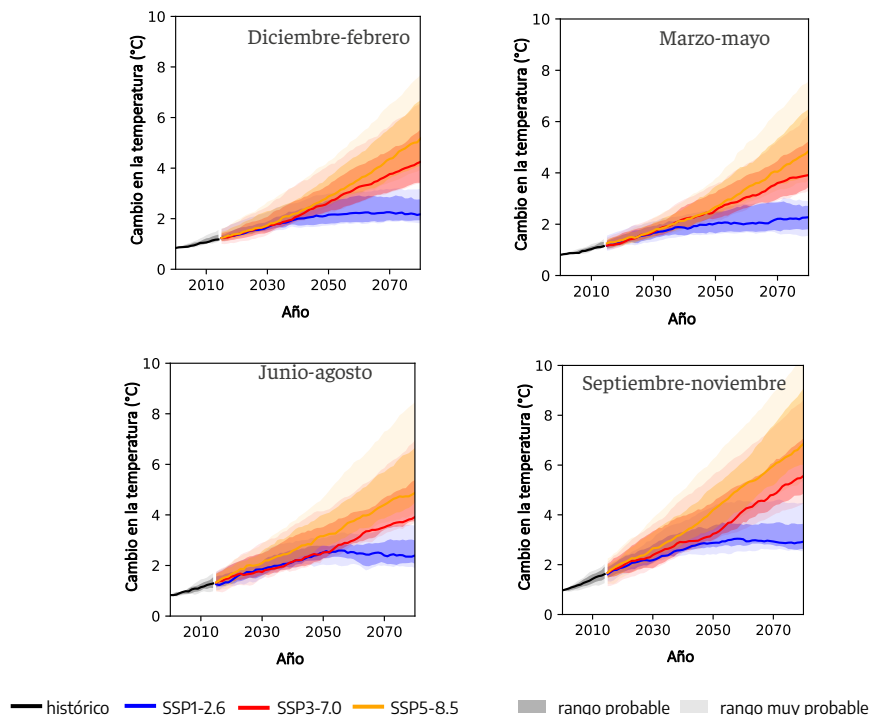


Figura 24. Cambios proyectados en comparación con la media de 1985-2015 en la temperatura media estacional de Santa Cruz para diferentes escenarios de calentamiento climático. Aquí se muestra la mediana multimodelo y los intervalos de confianza del 66 % (rango probable) y del 90 % (rango muy probable).

En general, los cambios proyectados en la temperatura son mayores en Santa Cruz que en Tarija. La temperatura aumenta en todas las estaciones y el

mayor incremento se produce entre septiembre y noviembre (Figura 24).

Precipitación

La mediana multimodelo indica una tendencia general negativa en las precipitaciones previstas en todos los escenarios evaluados, aunque la tendencia se estabiliza después de la década de 2050 en el escenario SSP1-2,6 (Figura 25a). La mediana

multimodelo indica que no hay cambios significativos en la frecuencia de los días de precipitaciones fuertes (Figura 25b), ni en la intensidad de las precipitaciones fuertes (Figura 25c) en todos los escenarios futuros.

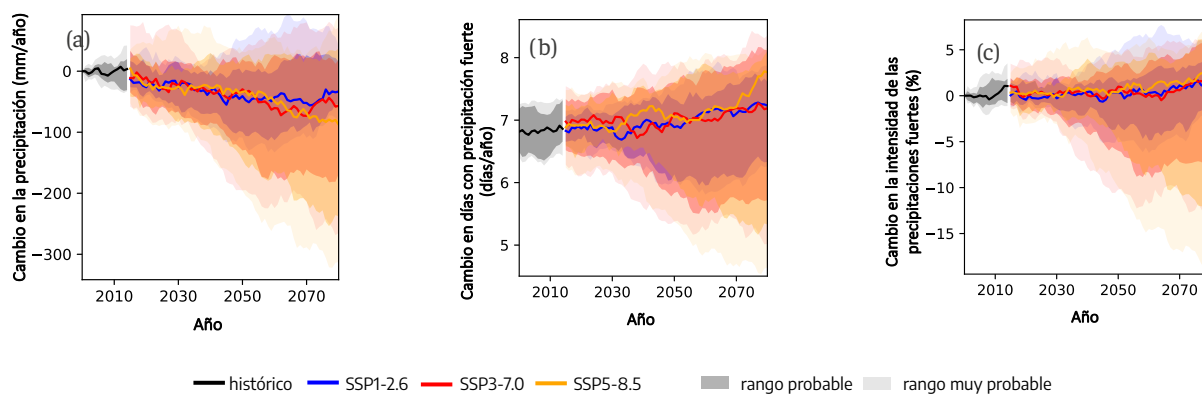


Figura 25. Cambios proyectados en comparación con el promedio de 1985-2015 en: (a) la precipitación media anual, (b) la frecuencia de los días de precipitación fuerte y (c) la intensidad de la precipitación fuerte durante el siglo XXI, diferenciados por escenarios SSP para Santa Cruz. Aquí se muestra la mediana multimodelo y los intervalos de confianza del 66 % (rango probable) y del 90 % (rango muy probable).

Para los diferentes escenarios futuros existe una variación significativa en la precipitación media anual, bajo los tres escenarios de cambio climático.

La Tabla 3 muestra los valores promedios obtenidos con algunas anomalías.

Escenario futuro	Precipitación media anual (mm/año)		
	SSP1-2,6	SSP3-7,0	SSP5-8,5
Cercano (década 2030; 2015-2045)	- 26.6	- 24	- 24.9
Mediano (década 2050; 2035-2065)	- 40.9	- 29.7	- 34
Lejano (década 2080; 2065-2095)	- 33.5	- 56.8	- 87.7

Tabla 3. Variación de la precipitación media anual en Santa Cruz para los diferentes escenarios futuros, considerando los tres SSP de cambio climático.

En las estaciones, las proyecciones de precipitación muestran una fuerte disminución durante los meses más húmedos, especialmente entre septiembre y noviembre, bajo los escenarios SSP3-7,0 y SSP5-8,5, a pesar de la gran variabilidad en el conjunto de modelos (Figura 26). Durante los meses de diciembre a febrero, las precipitaciones en Santa Cruz tienden

a disminuir en la segunda mitad del siglo, sobre todo en los escenarios SSP3-7,0 y SSP5-8,5. Entre marzo y agosto, las precipitaciones se mantienen prácticamente sin cambios, con una tendencia a mayor precipitación en los escenarios SSP3-7,0 y SSP5-8,5 en el periodo marzo-mayo.

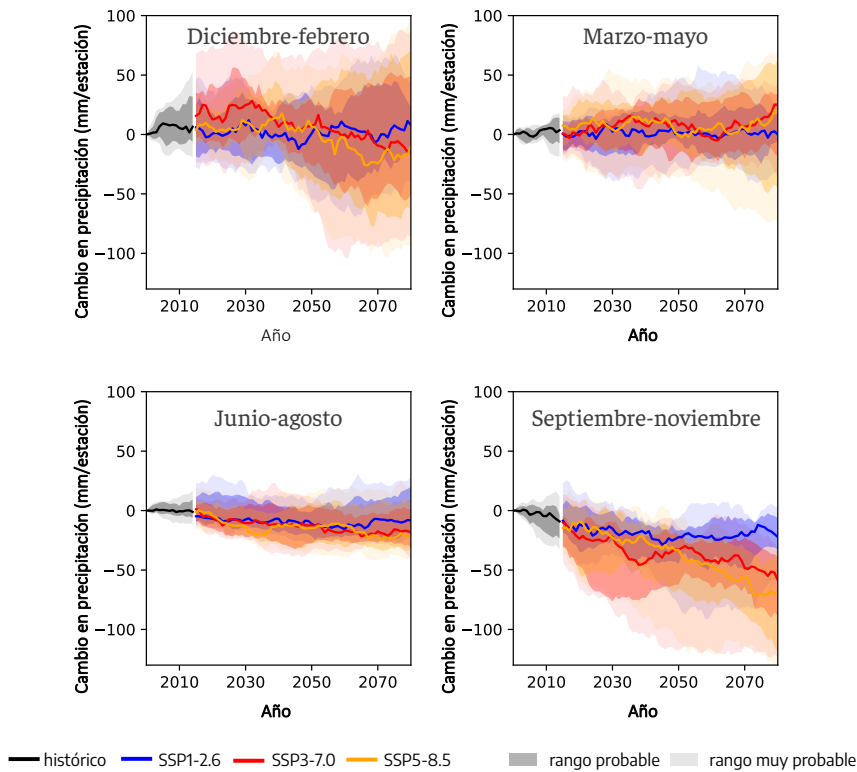


Figura 26. Cambios proyectados en comparación con la media de 1985-2015 en la precipitación media estacional de Santa Cruz para diferentes escenarios de calentamiento climático. Aquí se muestra la mediana multimodelo y los intervalos de confianza del 66 % (rango probable) y del 90 % (rango muy probable).

Sequía

En general, se proyecta una tendencia al aumento en la frecuencia de sequías extremas en Santa Cruz bajo los escenarios SSP3-7,0 y SSP5-8,5. Del mismo modo, bajo el escenario SSP1-2,6, la frecuencia de las sequías extremas muestra una tendencia

de aumentar hasta la década de 2050, y luego se proyecta una ligera disminución, sobre todo debido a los fuertes esfuerzos de mitigación en este escenario, y/o incluso emisiones negativas (Figura 27).

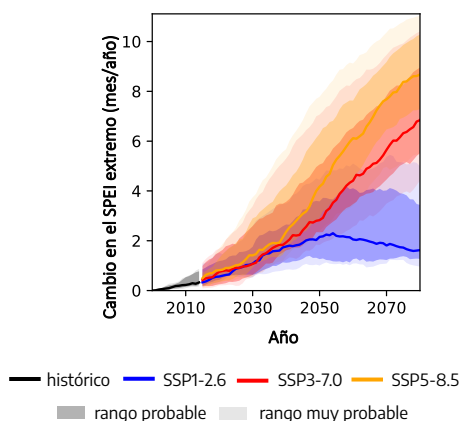


Figura 27. Cambios proyectados en comparación con la media de 1985-2015 en la frecuencia de eventos de sequía extrema (Índice de Precipitación-Evapotranspiración Estandarizado [SPEI] ≤ -2) durante el siglo XXI, diferenciados por los escenarios SSP para Santa Cruz. Aquí se muestra la mediana multimodelo y los intervalos de confianza del 66 % (rango probable) y del 90 % (rango muy probable).

Para finales del siglo XXI (década de 2080), es probable que, en comparación con el periodo de referencia, la frecuencia de las sequías extremas aumente en 1,5 meses/año en el escenario SSP1-2,6, en 7 meses/año en el escenario SSP3-7,0 y en 9 meses/año en el

escenario SSP5-8,5. Estos aumentos, especialmente en los escenarios de emisiones medias y altas (SSP3-7,0 y SSP5-8,5), son críticos e indican la necesidad de mecanismos de adaptación y de mitigación de sequías.





3.3 Departamento de Tarija

Temperatura del aire

Las proyecciones muestran un claro aumento de la temperatura media anual bajo los tres escenarios del SSP en el siglo XXI en el departamento de Tarija (Figura 28 a). Las proyecciones de la tendencia de calentamiento en todos los escenarios resultarán en

un número creciente de días muy calurosos (Figura 28b), y de noches tropicales en el futuro (Figura 28c), mientras que se proyectan menos días de heladas (Figura 28d).

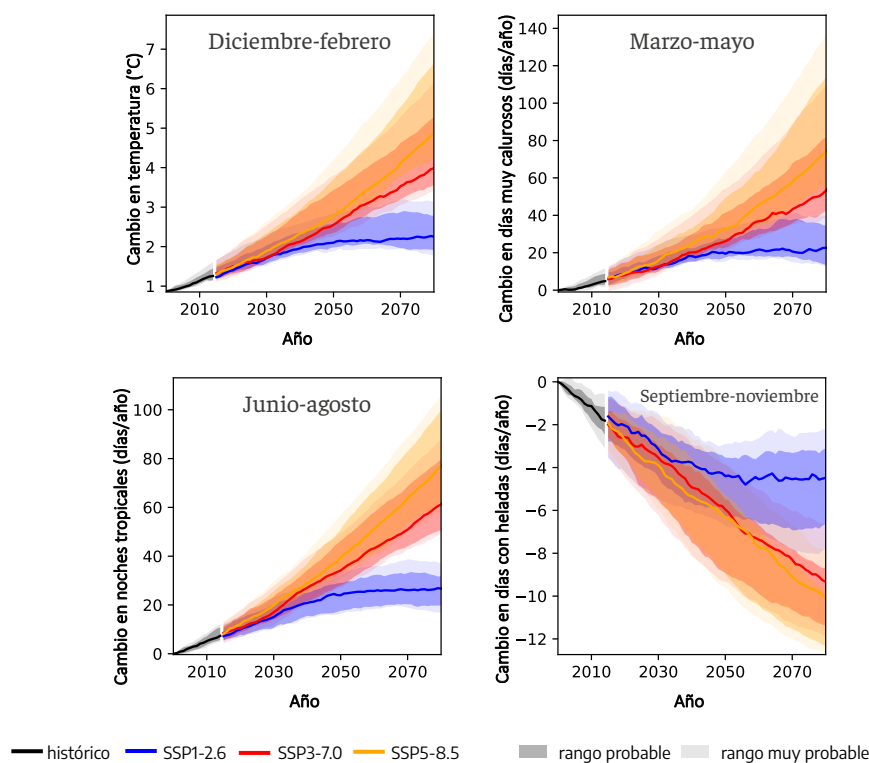


Figura 28. Cambios proyectados en comparación con el promedio de 1985-2015 en: (a) la temperatura media anual del aire, (b) los días muy calurosos, (c) las noches tropicales, y (d) los días de heladas, durante el siglo XXI, diferenciados por escenarios SSP para Tarija. Aquí se muestra la mediana multimodelo y los intervalos de confianza de 66 % (rango probable) y 90 % (rango muy probable).

Para los diferentes escenarios futuros existe una variación significativa en la temperatura media anual bajo los tres escenarios de cambio climático.

En la Tabla 4 se indican los valores obtenidos como promedios.

Escenario futuro	Temperatura media anual (°C/año)		
	SSP1-2,6	SSP3-7,0	SSP5-8,5
Cercano (década 2030; 2015-2045)	+1,7	+ 1,9	+ 1,9
Mediano (década 2050; 2035-2065)	+ 2,1	+ 2,6	+2,8
Lejano (década 2080; 2065-2095)	+ 2,3	+ 4,0	+ 4,9

Tabla 4. Variación de la temperatura media anual en Tarija para los diferentes escenarios futuros, considerando los tres SSP de cambio climático.

La temperatura aumenta en todas las estaciones del año, produciéndose el mayor incremento en los meses

de septiembre a febrero (Figura 29).

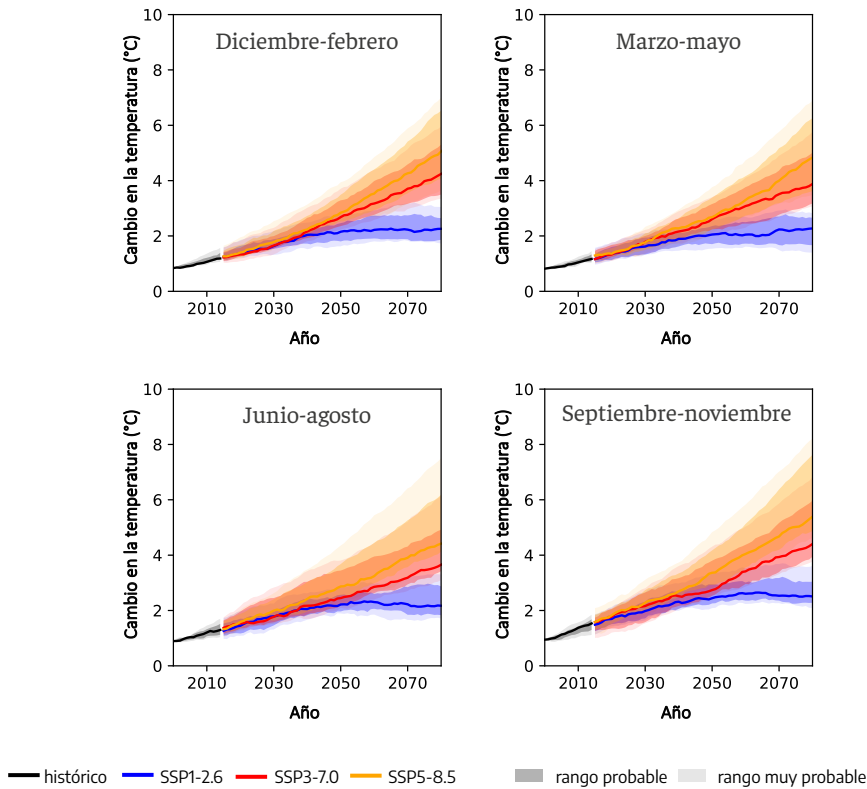


Figura 29. Cambios proyectados en comparación con el promedio de 1985-2015 en la temperatura media estacional para Tarija para diferentes escenarios de calentamiento global. Aquí se muestra la mediana multimodelo y los intervalos de confianza de 66 % (rango probable) y 90 % (rango muy probable).

Para el futuro lejano, por ejemplo, con relación al periodo de referencia, se prevé un aumento de 39, 109 y 136 días muy calurosos al año, bajo los escenarios SSP1-2,6, SSP3-7,0 y SSP5-8,5, respectivamente. Del mismo modo, se prevé que las noches tropicales aumenten en 37, 87 y 105 noches al año, en los escenarios

SSP1-2,6, SSP3-7,0 y SSP5-8,5, respectivamente. Y, por el contrario, se prevé que los días de heladas disminuyan ligeramente en 2, 7 y 8 días al año en el futuro lejano, bajo los escenarios SSP1-2,6, la SSP3-7,0 y la SSP5-8,5, respectivamente.

Precipitación

La mediana multimodelo no indica tendencia alguna en las precipitaciones proyectadas bajo el escenario SSP1-2,6, ya que, con respecto al periodo de referencia, las anomalías en las décadas de 2030 (−1,7 mm/año), 2050 (+13,6 mm/año), y 2080

(−1,3 mm/año), son casi nulas (Figura 30a). El patrón temporal de los cambios en la frecuencia de los días de precipitaciones intensas (Figura 30b) y en la intensidad de las precipitaciones (Figura 30c), es similar a la precipitación media anual.

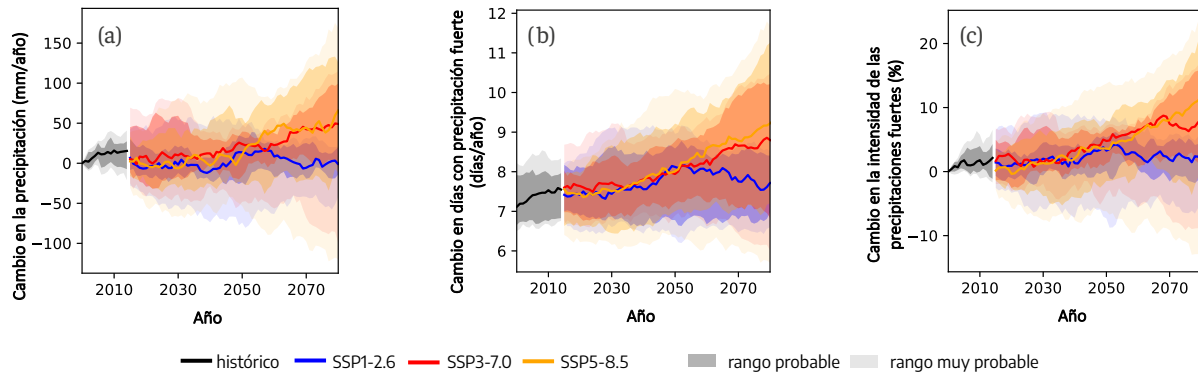


Figura 30. Cambios proyectados en comparación con el promedio de 1985-2015 en: (a) la precipitación media anual, (b) la frecuencia de días de precipitación fuerte, y (c) la intensidad de la precipitación fuerte, durante el siglo XXI, diferenciados por escenarios SSP para Tarija. Aquí se muestra la mediana multimodelo y los intervalos de confianza de 66 % (rango probable) y 90 % (rango muy probable).

Se prevé que las precipitaciones aumenten en los escenarios SSP3-7,0 y SSP5-8,5 en la segunda mitad del siglo. En el futuro lejano, se prevé que aumenten con respecto al periodo de referencia en cantidades de hasta +49 mm (SSP3-7,0) y +66 mm (SSP5-8,5).

El mayor aumento de las precipitaciones se produce durante la estación lluviosa de septiembre a mayo en los escenarios SSP3-7,0 y SSP5-8,5 (Figura 31).

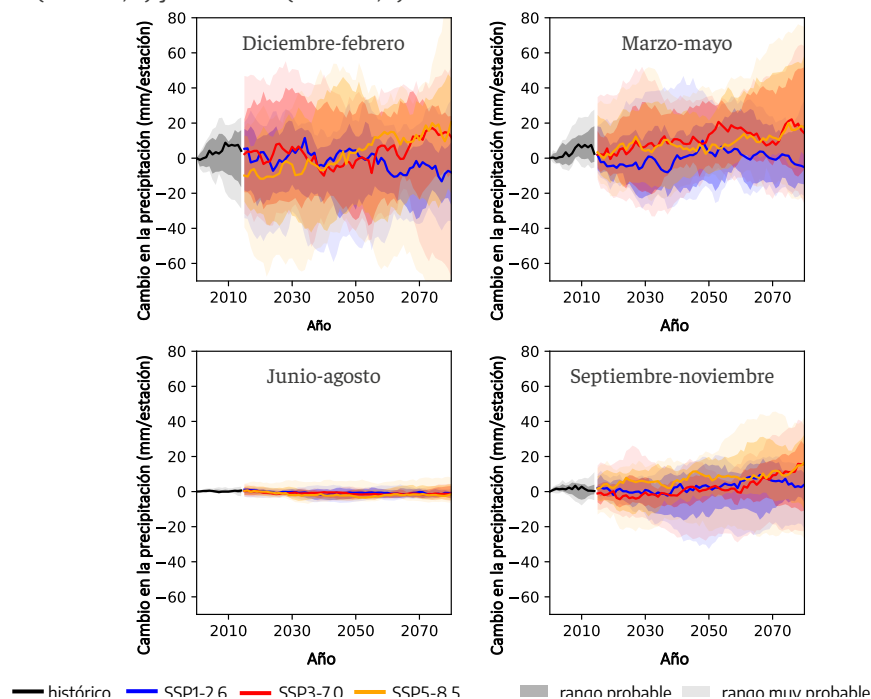


Figura 31. Cambios proyectados en comparación con el promedio de 1985-2015 en la precipitación media estacional para Tarija para diferentes escenarios de calentamiento climático. Aquí se muestra la mediana multimodelo y los intervalos de confianza de 66 % (rango probable) y 90 % (rango muy probable).

Por tanto, para la década de 2080, se esperan más días de precipitaciones intensas (en promedio, 9 días/año) bajo los escenarios SSP3-7,0 y SSP5-8,5, en relación con la década de

2000 (7 días/año). Del mismo modo, se prevé un aumento de la intensidad de las precipitaciones fuertes en un 7,4 % (SSP3-7,0) y en un 11,9 % (SSP5-8,5) en la década de 2080.

Sequía

Se proyecta una tendencia al aumento en la frecuencia de sequías extremas en Tarija bajo todos los escenarios (Figura 32).

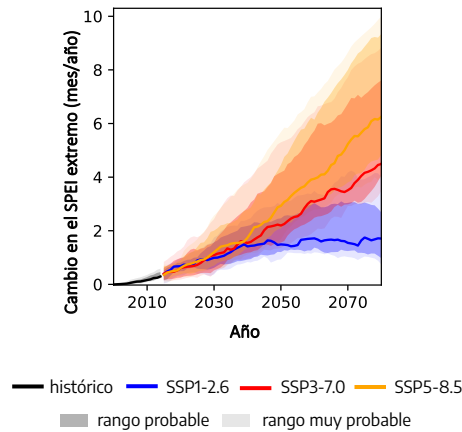


Figura 32. Cambios proyectados en comparación con el promedio de 1985-2015 en la frecuencia de eventos de sequía extrema (Índice de Precipitación-Evapotranspiración Estandarizado [SPEI] ≤ -2) durante el siglo XXI, diferenciados por escenarios SSP para Tarija. Aquí se muestra la mediana multimodelo y los intervalos de confianza de 66 % (rango probable) y 90 % (rango muy probable).

Bajo el escenario SSP1-2,6, se proyecta que la tendencia se estabilizará después de la década de 2050. Para el futuro lejano, es probable que la frecuencia de sequías extremas aumente en 2 meses/año bajo el

escenario SSP1-2,6, 5 meses/año bajo el escenario SSP3-7,0, y 7 meses/año bajo el escenario SSP5-8,5, en comparación con el período de referencia.





Capítulo 4. Impactos en la hidrología

Los resultados del capítulo anterior reflejan que el cambio climático se manifiesta de manera diferente en Tarija y Santa Cruz, con un posible aumento de las precipitaciones en Tarija bajo un alto calentamiento global, y una posible y más robusta disminución en Santa Cruz, aunque ambas tendencias están asociadas a una gran incertidumbre.

En consecuencia, los impactos sobre los recursos hídricos y la vegetación son diferentes, por lo que las medidas de adaptación deberían planificarse en función de esta evolución climática. El modelo ecohidrológico SWIM, descrito en el Capítulo 2, se ha implementado para traducir los cambios en el clima en cambios en los procesos hidrológicos, los recursos hídricos disponibles y el rendimiento de los cultivos (Figura 32).

En general, el desempeño de SWIM para la simulación

de caudales fue satisfactorio y comparable a los reportados en el “Balance hídrico superficial de Bolivia – 2017”, utilizando el modelo WEAP (MMAyA, 2017). El rendimiento global satisfactorio de SWIM pone de manifiesto la capacidad del modelo para simular los procesos hidrológicos en las cuencas andinas y amazónicas de Bolivia así como para los estudios de impacto hidrológico del cambio climático en la región.

Los siguientes acápite presentan los posibles impactos del cambio climático en los recursos hídricos, extremos hidrológicos y en cultivos seleccionados. Sobre esta base, las posibles medidas de adaptación y sus efectos se describirán en las cinco notas de políticas específicas que complementan este informe central.

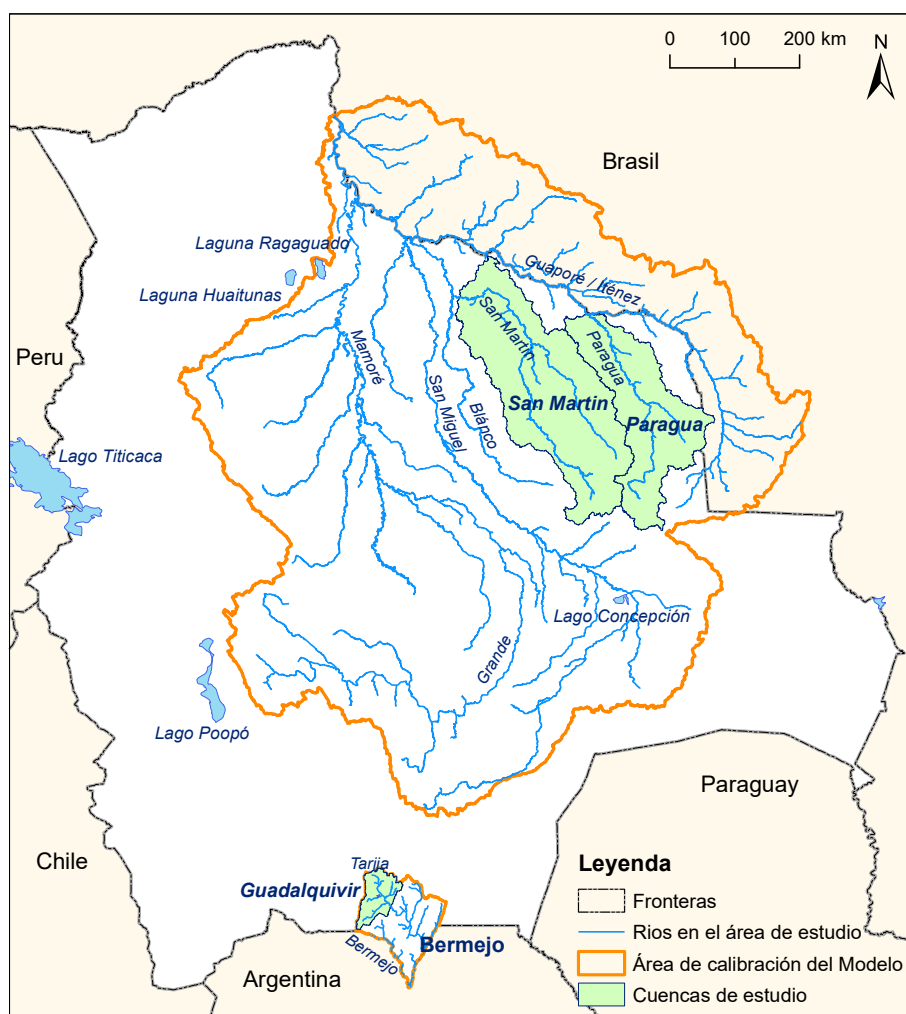


Figura 33. Las cuencas Guadalquivir, San Martín y Paraguarí con sus respectivas áreas de calibración en el modelo SWIM. Elaboración propia.

4.1 Santa Cruz: impactos del cambio climático en las cuencas San Martín y Paraguá

Es probable que las precipitaciones disminuyan en las tierras bajas de la Amazonía boliviana bajo las condiciones futuras del cambio climático. En consecuencia, es probable que se produzcan tendencias negativas en la descarga de los ríos y en la disponibilidad de agua.

Se ha implementado el modelo ecohidrológico SWIM para analizar los procesos hidrológicos y los recursos hídricos disponibles, considerando 3303 secciones de ríos con sus áreas de captación, así como datos de suelos y del uso de la tierra para parametrizar los procesos hidrológicos verticales y laterales, y el crecimiento de la vegetación.

En las cuencas San Martín y Paraguá existen pocas estaciones hidrológicas. Por lo tanto, para la calibración y validación del modelo se utilizó la información de las estaciones de la cuenca de los ríos Mamoré e Iténez (tanto en el lado boliviano como en el brasileño). En el análisis se incluyeron los datos proporcionados por el SENAMHI y los descargados

de la página web de la Agencia Nacional del Agua del Brasil (ANA, 2021) de un total de nueve estaciones⁵.

La Figura 34 muestra la zona de calibración del modelo (línea negra) y resume el desempeño de la simulación del flujo en cada una de las estaciones de medición. En general, los resultados están entre satisfactorios y muy buenos en la escala de eficiencia de Nash-Sutcliffe y el porcentaje de sesgo – PBIAS (ver Moriasi et al., 2007).

En el siguiente paso, se aplicaron los datos de los escenarios climáticos diarios descritos en el Capítulo 3 para simular los impactos sobre la disponibilidad de agua en las cuencas, considerando los escenarios SSP1-2,6, SSP3-7,0 y SSP5-8,5, y ejecutando el modelo diez veces en cada escenario.

La Figura 35 muestra la distribución espacial de las disminuciones del caudal del río en el área de calibración (dentro del cual se sitúan las cuencas San Martín y Paraguá).

Desempeño de SWIM a escala diaria

Temperatura media anual (°C/año)		
Estación de medición de caudal	NSE	PBIAS [%]
Vila Bela da Santis	0.53	8.8
Pimenteiras	0.58	0.4
Pedras Negras	0.42	18.6
Príncipe da Beira	0.54	9.4
Guajará-Mirim	0.81	3.2
Paraiso	0.54	-1.4
San Antonio	0.32	-0.4
Puerto Vilarroel (m)	0.52	5.3
Puerto Siles (m)	0.82	-2

- NSE es la “eficiencia Nash-Sutcliffe”
- PBIAS es el porcentaje de sesgo
- (m) indica desempeño mensual

Distribución espacial de las medidas de rendimiento del modelo

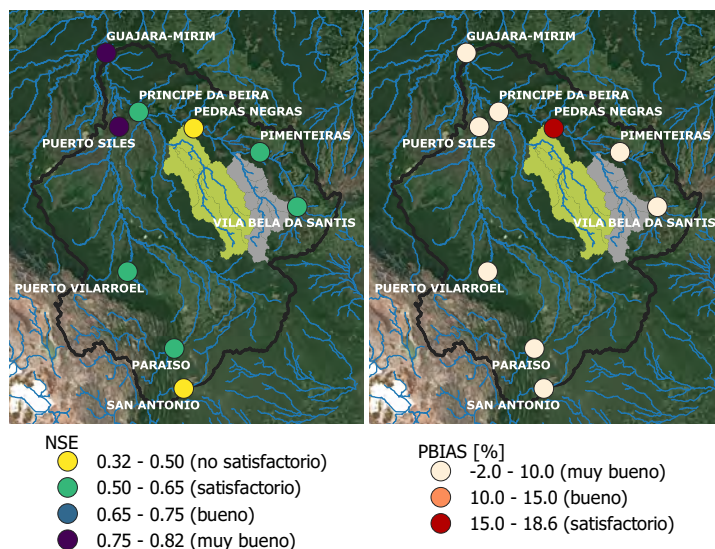


Figura 34. Desempeño de la simulación vs. caudales observados en las diferentes estaciones hidrométricas, resumido por el criterio de “eficiencia Nash-Sutcliffe” y el porcentaje de sesgo.

⁵ Para una descripción detallada de los datos utilizados, por favor recurrir al documento metodológico.

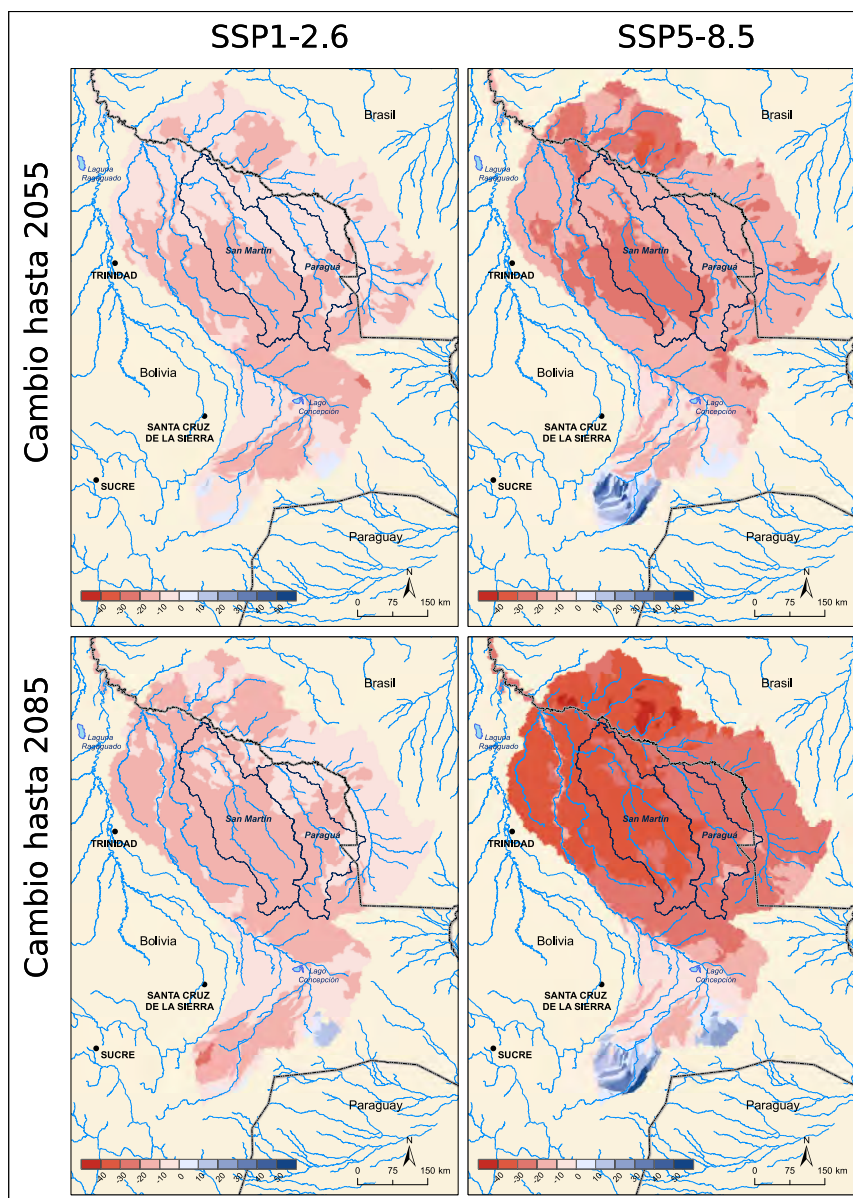


Figura 35. Cambio en la descarga anual bajo cambio climático hasta mediados de siglo (arriba) y fin de siglo (abajo); para el escenario de cambio climático bajo (izq.) y el escenario de cambio climático extremo (der.).

En las condiciones del escenario climático moderado SSP1-2,6, con un bajo aumento de la temperatura y una posible disminución de las precipitaciones, prácticamente sólo se observan disminuciones de la descarga en las dos cuencas, con -15 % hasta aproximadamente 2055 y -25 % hasta finales de siglo.

Los impactos son más extremos bajo las condiciones del escenario SSP5-8,5 y el mayor aumento de la temperatura; incluyen algunos aumentos de la descarga del río en las partes altas de la cuenca del Iténez, pero también con fuertes disminuciones uniformes en las cuencas San Martín y Paraguará, hasta alrededor de -25 % hasta mediados de siglo y hasta -40 % para finales de siglo.

Esto representa una gran amenaza para el medio ambiente, no sólo porque el río Iténez y el río Mamoré

drenan importantes zonas del este de Bolivia, sino también porque están entre los principales afluentes del río Amazonas.

Para la sociedad, esto implica un replanteamiento de las inversiones a largo plazo; por ejemplo, en cuanto al tipo de embalses y el potencial real de crecimiento de las actividades productivas intensivas en agua, como el pastoreo de ganado.

Sin embargo, los valores anuales de los caudales del río presentan una gran fluctuación anual, mostrada en la Figura 36 para la descarga en las estaciones de Pedras Negras (la estación más cercana al río San Martín), Príncipe da Beira y Guajará-Mirim, siendo esta la última estación en la frontera con Brasil que fue tomada en cuenta en la configuración del SWIM.

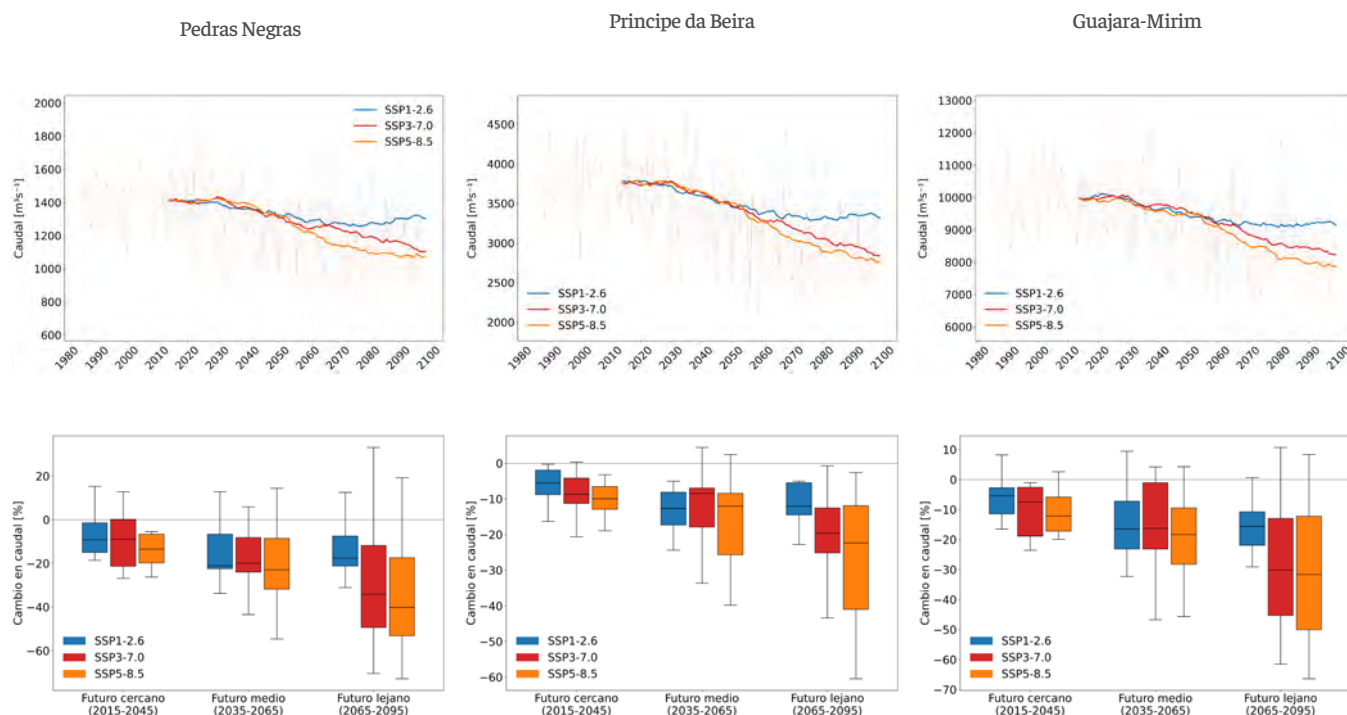


Figura 36. Cambio de la descarga anual en tres estaciones, simulado por SWIM, utilizando un conjunto de 10 modelos CMIP6, con sesgo ajustado y con tres SSP diferentes. Arriba: evolución anual de las descargas bajo las condiciones de los tres SSP. Abajo: gráficos de caja de los cambios para tres cortes de tiempo, desde el futuro cercano al lejano.

Los resultados muestran que hay una disminución constante de los caudales anuales, que comienza en el futuro cercano y continúa o incluso se acelera hasta fines de este siglo.

La mayor disminución se produce con el mayor aumento de la temperatura global y regional bajo las condiciones del escenario extremo SSP5-8,5. Mientras que, en promedio, la disminución es inferior al -10 % en el futuro cercano, en todas las estaciones y escenarios, la misma descende, en promedio, hasta alrededor de -40 % (Pedras Negras), -30 % (Príncipe da Beira) y -20 % (Guajará-Mirim) hasta fines de siglo, en condiciones del escenario de alta temperatura (SSP5-8,5). La razón de la menor disminución en toda la cuenca del río Mamoré (estación Guajará-Mirim) y la mayor disminución en la subcuenca del Iténez es que el afluente del Mamoré recibe más descarga bajo el cambio climático desde los tramos río arriba, como se muestra en la Figura 35.

Aunque la serie de cambios también incluye casos en

los que el escenario muestra una tendencia positiva, la mayoría de las ejecuciones del modelo a menudo indican fuertes disminuciones de la descarga del río y, por lo tanto, de la disponibilidad de agua, con las caídas extremas de hasta -50 % a -60 % (Figura 36, fila inferior).

Este es otro fuerte indicio de que, incluso cuando se considera el rango de incertidumbre de los resultados, el cambio climático tendrá graves impactos en la hidrología y en los recursos hídricos de la región y, en consecuencia, también en las actividades productivas y en la ecología.

Los resultados de SWIM también muestran cuán relevante e importante es la mitigación del cambio climático global: los impactos sobre los recursos hídricos posiblemente ya son severos bajo el escenario climático moderado (SSP1-2,6), pero son masivos bajo el alto incremento de la temperatura global (escenarios SSP3-7,0 y SSP5-8,5).

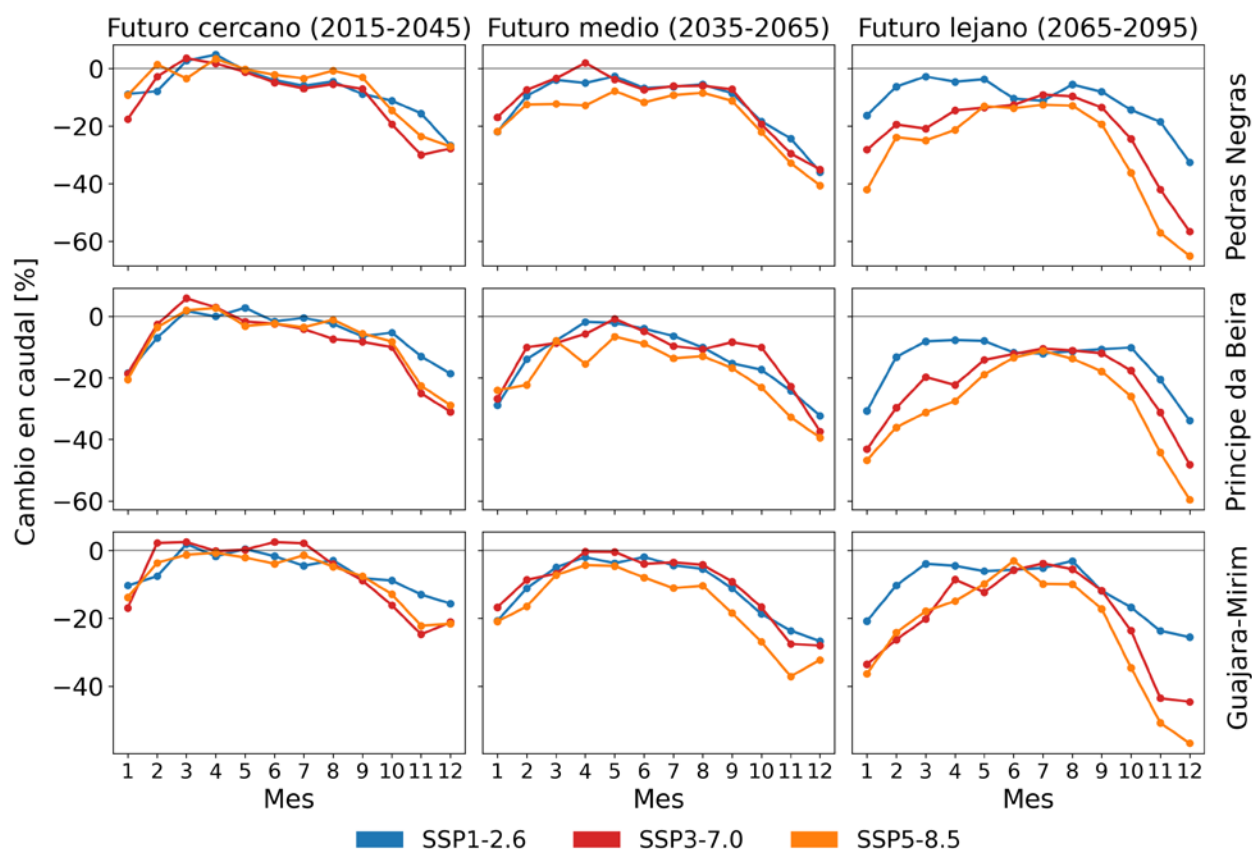


Figura 37. Cambios relativos en la descarga media mensual en las estaciones de aforo de Pedras Negras (arriba), Príncipe da Beira (centro) y Guajará-Mirim (abajo), simulados por SWIM, utilizando un conjunto de 10 modelos CMIP6, con sesgo ajustado y en tres SSP diferentes.

Además de los cambios en los promedios anuales, las tendencias de los caudales estacionales también son importantes, especialmente para la agricultura. En la Figura 37 se muestran los cambios en las descargas mensuales promedio en las estaciones de Pedras Negras, Príncipe da Beira y Guajará-Mirim simulados por SWIM.

El patrón de cambios es similar en los tres periodos, con los impactos más fuertes para el escenario de cambio climático extremo, SSP5-8,5, y en el futuro lejano. En general, la evolución de la descarga, en promedio, es negativa en la mayoría de los meses del año en el futuro cercano y, en promedio, también es negativa en todos los meses del futuro lejano.

Los resultados indican las tendencias negativas más altas para el escenario de alto calentamiento SSP5-8,5, con hasta 60 % menos en noviembre y diciembre, hasta 30 % menos en enero, y con cambios nulos o pequeños de abril a agosto. En general, los impactos más bajos hasta el final del siglo se dan en las condiciones del escenario SSP1-2,6, lo que nuevamente subraya la importancia de la adaptación y la mitigación del clima.

Con la disminución general de la descarga del río, también aumentan las condiciones de bajo caudal en número e intensidad (Figura 38).

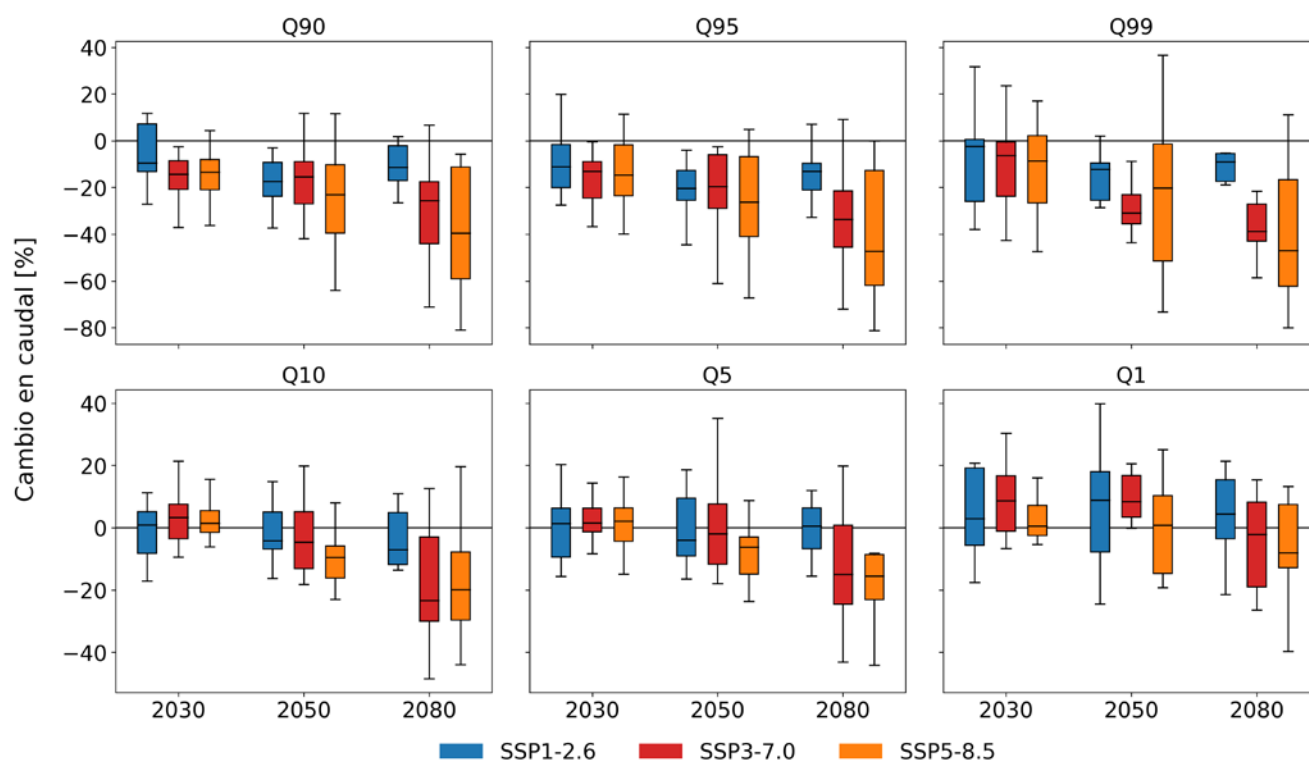


Figura 38. Cambio en los indicadores de bajo caudal (Q90, Q95, Q99) y alto caudal (Q10, Q5, Q1) en la estación de aforo Príncipe da Beira. Simulaciones SWIM, utilizando 10 modelos CMIP6, con sesgo ajustado y en tres SSP diferentes.

Todos los indicadores de caudales bajos (Q90, Q95 y Q99, con 90 %, 95 % y 99 % de los valores diarios) muestran fuertes descensos en la descarga, con los más fuertes en el futuro lejano y para el escenario de cambio climático extremo SSP5-8,5, con hasta 50 % menos de descarga para Q95 y Q99. Los impactos menores se observan en el escenario moderado SSP1-2,6.

Los indicadores moderados de caudal alto (Q10 y Q5, con 10 % y 5 % de los valores diarios) no muestran cambios, o incluso disminuyen, con los descensos más fuertes para los escenarios SSP3-7,0 y SSP5-8,5. Sólo el indicador más fuerte de caudal alto (Q1 con el 1 % de los caudales) presenta un aumento hasta mediados de siglo, para los escenarios SSP1-2,6 y SSP3-7,0.

Una menor descarga, en general, significa menor disponibilidad de agua para el medio ambiente,

las comunidades locales y en la gestión del agua. Como ejemplo de este último caso, en la Tabla 5 se muestra el impacto promedio del cambio climático en el ingreso del agua en dos embalses seleccionados (Guapomó y Concepción).

Según los resultados del modelo, en el futuro lejano y el escenario de cambio extremo SSP5-8,5, llegarían a -29 % para Concepción y -22 % para Guapomó. También en estos lugares, los impactos incrementan con el aumento de la temperatura global y regional.

La disminución de las precipitaciones y de la disponibilidad general de agua tiene también impactos sobre la vegetación y las actividades productivas. La Figura 39 refleja el impacto del cambio climático, modelado por SWIM, sobre el rendimiento de los cultivos (por ejemplo, la soja) y la producción de forraje (pastizales), como promedio en la cuenca del Mamoré.

Embalse	SSP1-2,6 mediados de siglo	SSP1-2,6 futuro lejano	SSP5-8,5 mediados de siglo	SSP5-8,5 futuro lejano
Concepción	- 11 %	- 14 %	- 21 %	- 29 %
Guapomó	- 14 %	- 12 %	- 18 %	- 22 %

Tabla 5. Cambios promedio de la afluencia del agua en los embalses seleccionados

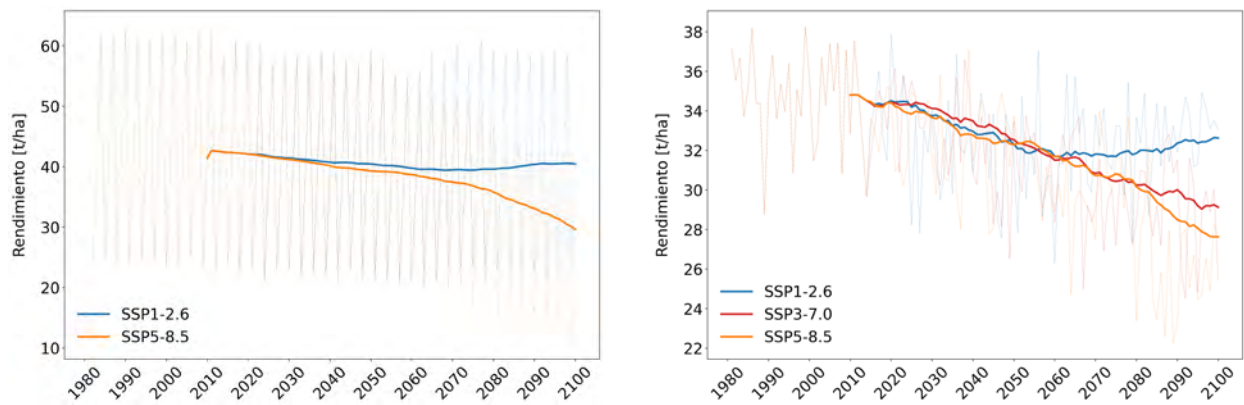


Figura 39. Rendimiento de los cultivos de soja (durante el verano austral, estación húmeda) y de los pastizales (dos periodos de cosecha/pastoreo) en el departamento de Santa Cruz.

Mientras que el escenario moderado SSP1-2,6 muestra sólo pequeñas disminuciones en los rendimientos, los cambios severos son visibles especialmente en el escenario de cambio climático extremo SSP5-8,5. Los rendimientos de los cultivos se han modelado utilizando el módulo de simulación de cultivos de SWIM adaptado a la zona (que toma en cuenta las condiciones meteorológicas y las estaciones del año en la gestión de cultivos y los suelos locales).

Aquí se muestran los efectos climáticos puros sin ningún cambio en la gestión bajo las condiciones del escenario. El patrón de evolución del rendimiento de los cultivos es plausible si se tiene en cuenta que la mayor disminución de la disponibilidad de agua también se produce en las condiciones del escenario cambio climático extremo y a finales de este siglo.



4.2 Tarija: impactos del cambio climático en la cuenca del río Guadalquivir

Las proyecciones climáticas para Tarija muestran un claro aumento de la temperatura media anual en los tres escenarios del SSP durante el siglo XXI (véase Capítulo 3). En cuanto a las precipitaciones, la mediana multimodelo no indica ninguna tendencia en las precipitaciones proyectadas bajo el escenario SSP1-2,6, mientras que se prevé que las precipitaciones aumenten bajo los escenarios SSP3-7,0 y SSP5-8,5, en la segunda mitad del siglo. El mayor aumento de las precipitaciones se produce de septiembre a mayo en los escenarios SSP3-7,0 y SSP5-8,5.

El modelo ecohidrológico SWIM ha sido implementado en la parte boliviana de la cuenca del río Bermejo para traducir los cambios en el clima en cambios en los procesos hidrológicos y en los recursos hídricos disponibles. Esto se realizó considerando 173 secciones del río y utilizando la Base de Datos Mundial Armonizada sobre el Suelo (FAO, 2022) y el

producto satelital del uso de la tierra del programa Copernicus (ESA, 2022) para parametrizar los procesos hidrológicos verticales y laterales, así como el crecimiento de la vegetación.

Debido a que el área de la cuenca del río Bermejo en Bolivia es relativamente pequeña en comparación con las cuencas en Santa Cruz, el modelo fue calibrado sólo en dos estaciones: una vez para Aguas Blancas en la frontera con Argentina, dado que esta estación integra la escorrentía de la parte boliviana, y luego para la represa San Jacinto, ya que se escogió esta infraestructura para realizar el análisis costo-beneficio. Siguiendo a Moriasi et al. (2007), los resultados de la calibración diaria son muy buenos para la estación Aguas Blancas en términos de sesgo (3,7 %) y satisfactorios bajo el criterio de eficiencia Nash-Sutcliffe (0,51).

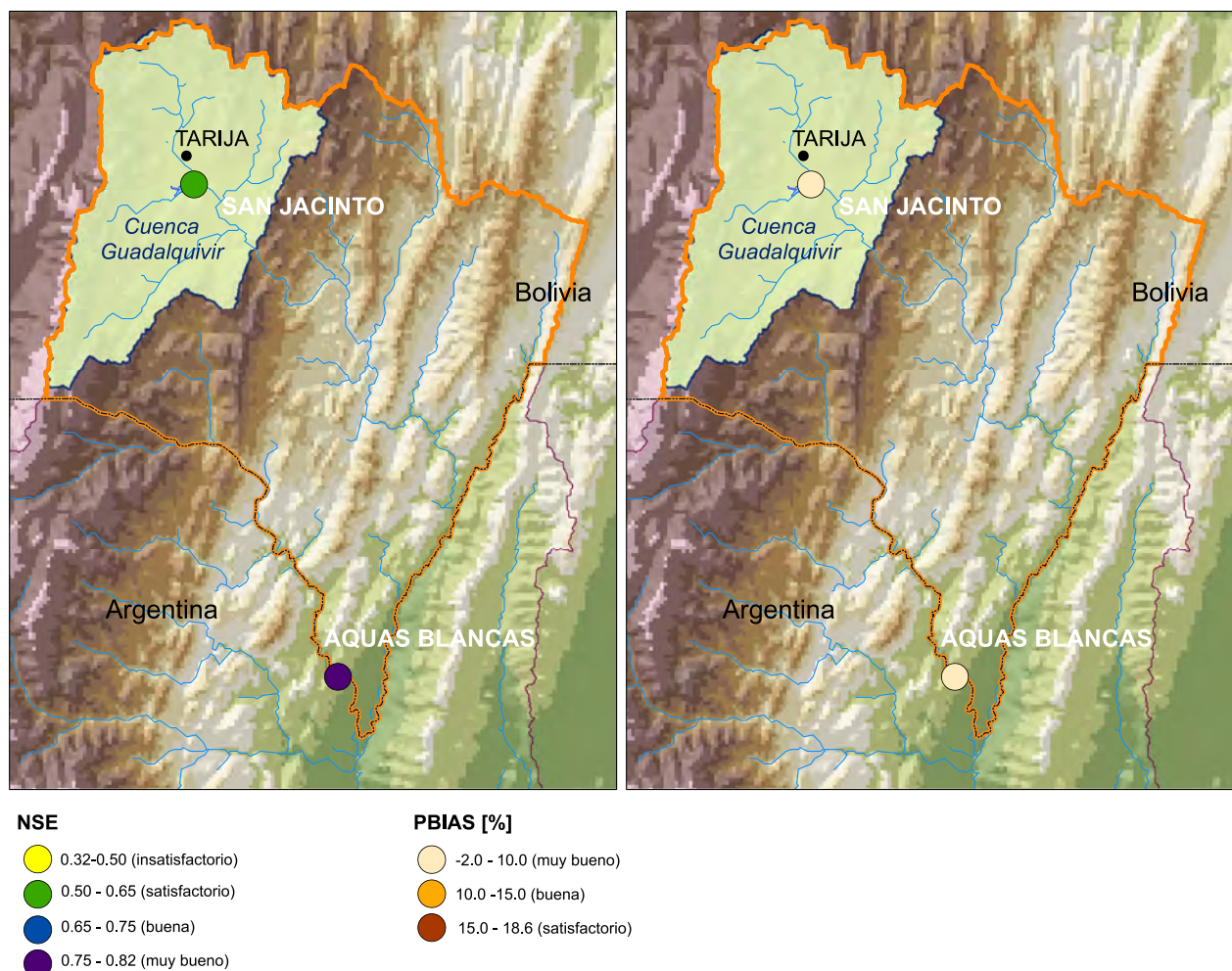


Figura 40. Desempeño de la simulación vs. caudales observados en las dos estaciones hidrométricas, resumido por el criterio de “eficiencia Nash-Sutcliffe” y el porcentaje de sesgo.

La gestión de la represa San Jacinto ha sido parametrizada para el módulo de reservorios de SWIM, utilizando el informe “Represa de San Jacinto

Tarija-Bolivia (Carpas, 2019)” Los niveles y volúmenes de agua de la represa, modelados y observados mensualmente, se presentan en la Figura 41.

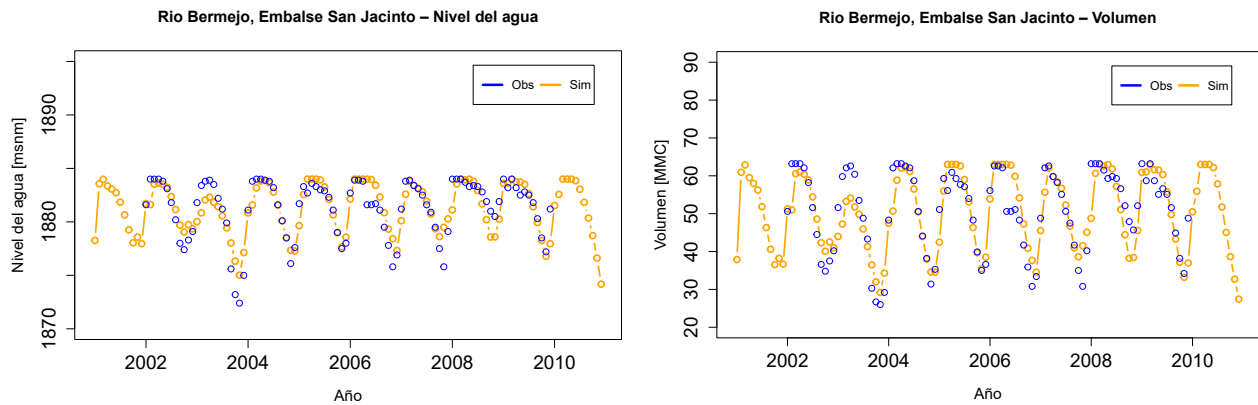


Figura 41. Nivel y volumen –observados y modelados– del agua de la represa de San Jacinto, simulado por SWIM.

Los mapas de la Figura 42 muestran la distribución espacial de los aumentos y disminuciones de la

descarga del río y, por tanto, de la disponibilidad de agua en la cuenca Bermejo.

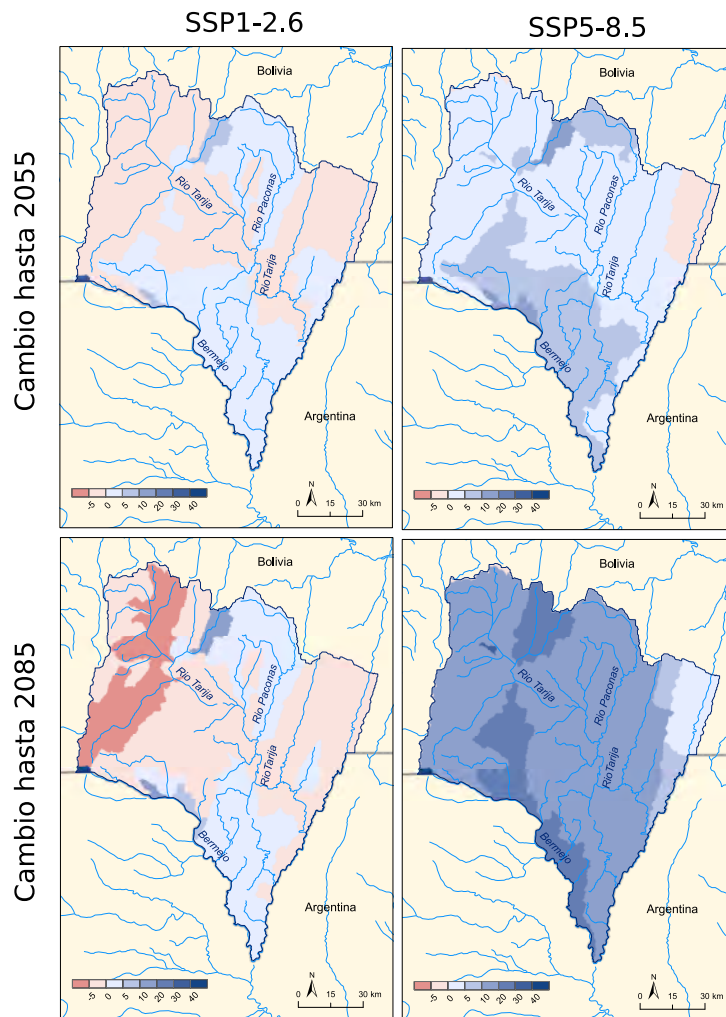


Figura 42. Cambio en la descarga bajo cambio climático para el escenario de calentamiento moderado (izq.) y calentamiento alto (der.), hasta mediados de siglo (arriba) y hasta finales de siglo (abajo).

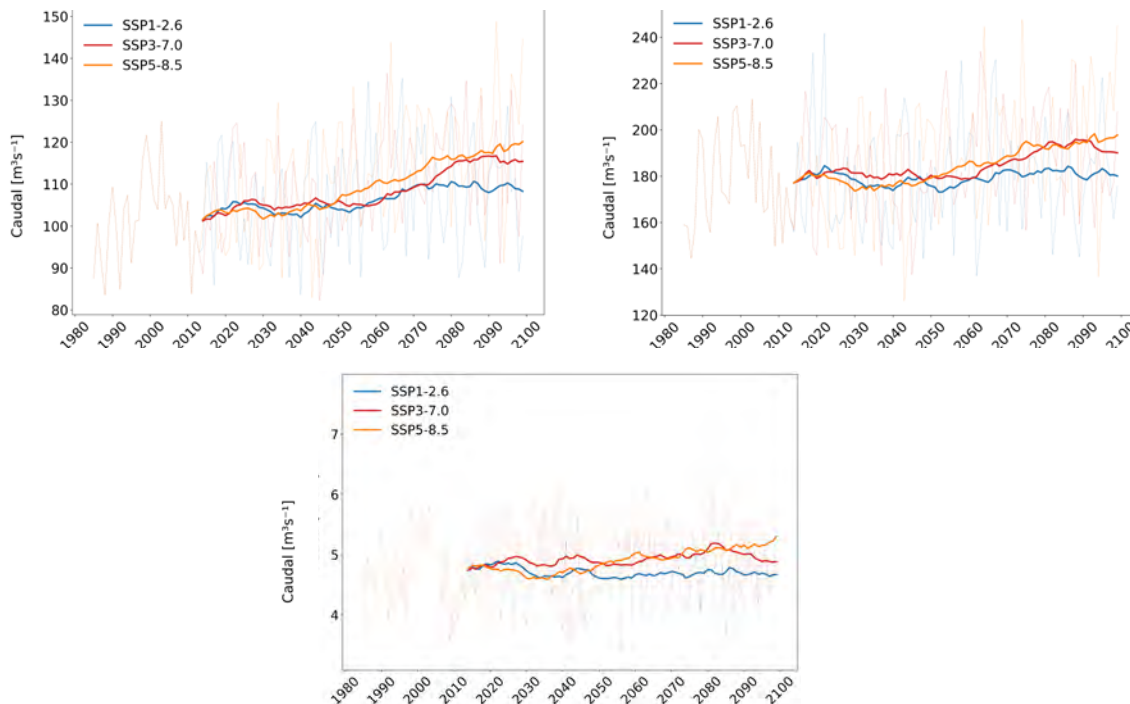


Figura 43. Cambios en la descarga anual en las estaciones de la represa de San Jacinto, Algarrobito y Aguas Blancas.

En las condiciones del escenario climático moderado SSP1-2,6, hasta mediados de siglo y con un aumento bajo de la temperatura, se observan sólo ligeras disminuciones y aumentos de la descarga fluvial en la cabecera de la cuenca, en su mayoría con valores entre -5% y $+10\%$.

Los cambios varían con valores entre -10% y $+20\%$ en algunas subcuencas, hasta fines del siglo, con un calentamiento climático moderado. Por el contrario, los cambios son positivos, en casi todos los casos, bajo el escenario más caliente SSP5-8,5, aumentando hasta 20% , para mediados de este siglo, y 40% hasta fines del siglo. En cuanto a la cuenca, el caudal y la disponibilidad de agua del Guadalquivir, podrían disminuir ligeramente entre 5% y 10% en las condiciones del escenario SSP1-2,6, y aumentar entre 10% y 20% en las condiciones del escenario SSP5-8,5.

Sin embargo, los valores anuales arrojan una gran fluctuación, que se muestra en la Figura 43. La figura muestra la descarga media anual en tres estaciones de la región de Tarija (represa de San Jacinto, Algarrobito y Aguas Blancas) simulada por SWIM y utilizando diez modelos CMIP6, con sesgo ajustado y tres SSP

diferentes. Los aumentos más fuertes de la descarga son visibles hasta fines de este siglo y para la estación de Aguas Blancas, siendo los más bajos la represa de San Jacinto. Los escenarios más cálidos (SSP3-7,0 y SSP5-8,5) generan mayores incrementos. Se observan pequeñas tendencias negativas en el futuro cercano, para el escenario SSP1-2,6 y para las ubicaciones de la represa de San Jacinto y Algarrobito.

Los cambios en las descargas mensuales promedio en las estaciones de aforo de la represa San Jacinto, Algarrobito y Aguas Blancas, simuladas por SWIM, se muestran en la Figura 44. El patrón de cambios es similar en los tres períodos, con los impactos más fuertes, nuevamente, para el escenario de cambio climático extremo SSP5-8,5 y en el futuro lejano. En general, la evolución de la descarga es negativa en la mayoría de los meses del año, en el futuro cercano y sin un fuerte calentamiento, y en la mayoría de los meses es positiva en el futuro lejano, con excepción del escenario de cambio climático moderado SSP1-2,6 en la represa de San Jacinto. En general, los impactos más bajos, a través de todos los escenarios y periodos de tiempo, se producen en el escenario SSP1-2,6.

Los impactos positivos más fuertes, con un aumento de hasta 60 % del caudal, se producen bajo los escenarios extremos, SSP3-7,0 y SSP5-8,5; en la

estación de Aguas Blancas, esto ocurre en el mes de noviembre, mientras que en San Jacinto los mayores aumentos se producen en enero.

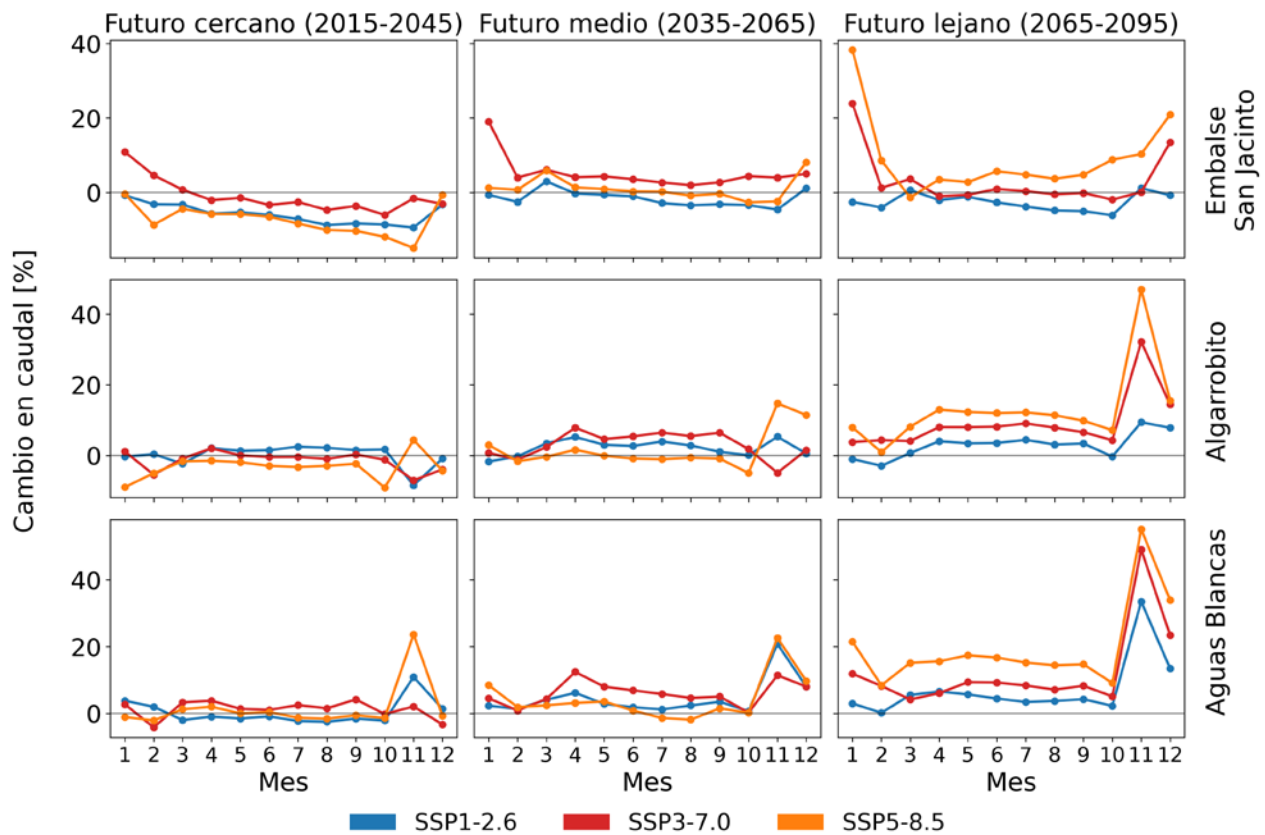


Figura 44. Cambios relativos en la descarga promedio mensual en las estaciones de aforo de San Jacinto (arriba), Algarrobito (en medio) y Aguas Blancas (abajo), simulados por SWIM, utilizando 10 modelos CMIP6, con sesgo ajustado y en tres SSP diferentes.

Los resultados muestran que casi no hay cambios en la descarga y, por tanto, tampoco en la disponibilidad de agua hasta aproximadamente 2050 y, en caso de un cambio climático moderado (SSP1-2,6), hasta finales de siglo. Sin embargo, podría haber un aumento general de las descargas y de la disponibilidad de agua

con el aumento de la temperatura en las condiciones del escenario extremo. El mayor aumento se produce nuevamente en el escenario SSP5-8,5. En la Figura 45 se muestran los cambios relativos en la descarga anual del río en la represa de San Jacinto (izquierda) y en el aforo de la estación Algarrobito (derecha).

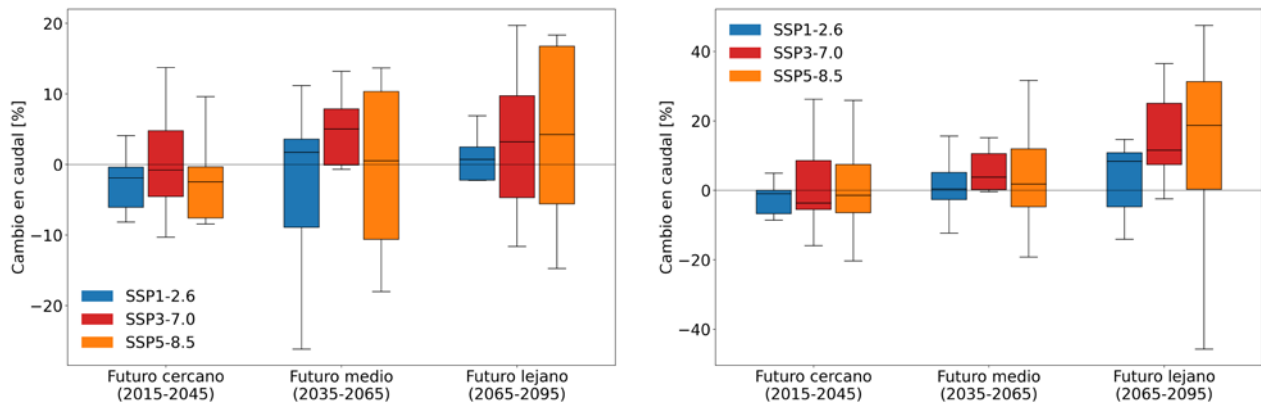


Figura 45. Cambio relativo en la descarga en la represa de San Jacinto (izq.) y en la estación de aforo Algarrobito (der.) simulados por SWIM, utilizando 10 modelos CMIP6, con sesgo ajustado y en tres SSP diferentes.

Aunque, en general, sólo hay tendencias débiles en las descargas, la variabilidad de los caudales diarios aumenta con el incremento de la temperatura y es más pronunciada en el escenario de cambio climático extremo SSP5-8,5, hasta fines del siglo.

La Figura 46 muestra los resultados de los indicadores de caudal bajo Q90, Q95 y Q99 (con valores diarios por encima de 90 %, 95 % y 99 %) y de los indicadores de caudal alto Q10, Q5 y Q1 (con valores diarios por encima de 10 %, 5 % y 1 %)

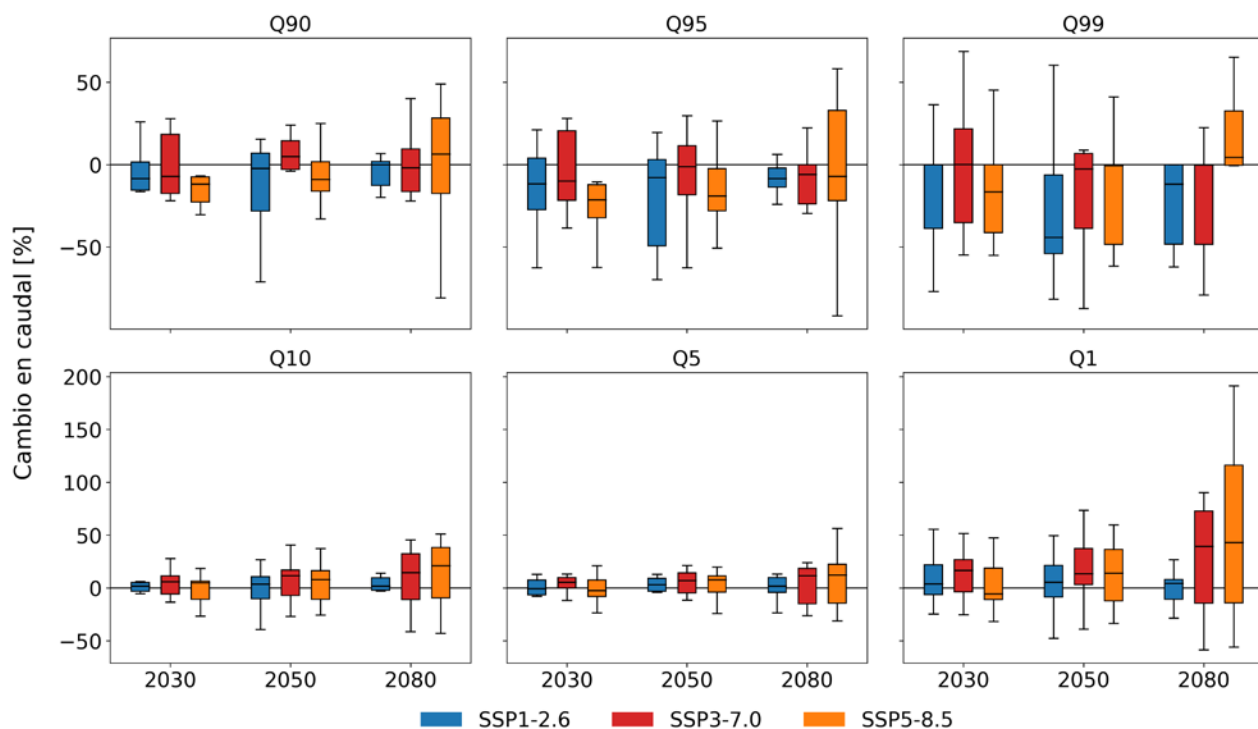


Figura 46. Indicadores de caudal bajo y alto en la represa de San Jacinto. Simulaciones SWIM, utilizando 10 modelos CMIP6, con sesgo ajustado y tres SSP diferentes.

Especialmente los indicadores de caudales bajos muestran cambios sustanciales a valores más bajos, mientras los caudales altos tienen el incremento más

fuerte para el indicador extremo (Q1), en el futuro lejano y en el escenario de calentamiento más fuerte (SSP5-8,5).





Capítulo 5. Reflexiones finales

5.1. Discusión

Clima

Se prevé que el clima en Bolivia siga cambiando bajo escenarios de calentamiento global siguiendo las señales climáticas actuales. Se proyecta que las temperaturas medias anuales aumenten, siguiendo las tendencias actuales, como lo informan otras evaluaciones (Seiler et al., 2013b; López-Moreno et al., 2016).

En general, los cambios proyectados muestran una menor precipitación en las tierras bajas, lo cual coincide con la tendencia negativa actual ($-5,1$ mm/año) informada para la cuenca del río Madeira por Da Motta-Paca et al. (2020); en cambio, hay un aumento en los Andes, por ejemplo, en las laderas del sudeste y la parte norte del Altiplano, donde Torres-Batló y Martí-Cardona (2020) y Segura et al. (2020) reportaron tendencias positivas en la precipitación.

Los cambios en el clima proyectados en este estudio coinciden en su mayor parte con los basados en la anterior generación de escenarios de cambio climático. El aumento promedio de la temperatura de $+2,5$ °C (SSP1-2,6), $+4,7$ °C (SSP3-7,0) y $+5,8$ °C (SSP5-8,5) en el futuro lejano (2065-2095), tal como se ha reportado aquí, concuerda con las proyecciones basadas en las simulaciones CMIP5 que van de $+2,5$ a $+5,9$ °C para fines del siglo XXI (Seiler et al., 2013b). La proyección de menos precipitaciones sobre las tierras bajas y más precipitaciones sobre los Andes también fue similar utilizando las simulaciones CMIP5 (Seiler et al., 2013b). Sin embargo, un estudio local en el departamento de Tarija reportó menor precipitación en el futuro en la cuenca Guadalquivir, en base a dos modelos climáticos CMIP5 (Gutiérrez, 2021). El estudio mencionado diverge de los resultados del presente trabajo porque solo utilizó una estación meteorológica y posiblemente también porque usó una cantidad diferente de modelos climáticos para analizar los cambios. Dado que el presente estudio utilizó las simulaciones de diez modelos climáticos, los resultados se pueden considerar más fiables.

La evolución de las proyecciones climáticas en Bolivia, a lo largo del siglo XXI, muestra una alta certeza en los cambios de temperatura y menor certeza para las precipitaciones. La concordancia entre todos los modelos CMIP6 respecto a la tendencia de las proyecciones de temperatura, muestra la capacidad adecuada de los modelos para simular la temperatura en Bolivia. Por el contrario, el hecho de que hay menor certeza en las proyecciones de precipitación y la mayor dispersión entre los periodos de tiempo futuro y presente, sugiere que las proyecciones de precipitación son altamente inciertas.

Las incertidumbres en la proyección de la precipitación probablemente se deben a las incertidumbres de los modelos climáticos en la simulación de la precipitación sobre esta región, donde los patrones de precipitación están modulados por la interacción entre los patrones a gran escala (por ejemplo, la migración latitudinal de la Zona de Convergencia Intertropical Atlántica, los Sistemas Monzónicos Sudamericanos, y en las áreas de alta presión atmosférica), los patrones de circulación local (por ejemplo, el transporte ascendente y descendente de humedad) y la compleja orografía andina (Espinoza et al., 2020; Segura et al., 2020; Garreaud, 2009). Estos patrones climáticos también están fuertemente modulados por El Niño-Oscilación del Sur, ENSO (Poveda et al., 2020). Debido a las interacciones entre un abanico tan variado de fenómenos, los modelos CMIP6 pueden presentar grandes sesgos en la simulación de la precipitación, como lo reportan, por ejemplo, Arias et al. (2021) en Colombia. Las incertidumbres también varían en función de los escenarios de emisiones, con mayores incertidumbres para los escenarios de altas emisiones. Esto indica que las incertidumbres en las proyecciones climáticas están relacionadas con las incertidumbres en los modelos climáticos y los escenarios de emisiones.

Recursos hídricos e hidrología

El cambio climático puede tener graves impactos en los recursos hídricos y en los sectores relacionados con el agua en Bolivia. Si bien hay una gran certeza de que las temperaturas medias anuales, los días calurosos, las noches tropicales y los eventos de sequía extrema están aumentando en número e intensidad, es menos certero, como en muchas otras regiones del mundo, el cambio en las precipitaciones: las proyecciones de la precipitación media anual muestran una tendencia a la disminución en Santa Cruz, mientras que se proyecta un aumento de la precipitación en Tarija, bajo los escenarios de calentamiento global medio y alto (SSP 3-7,0 y 5-8,5).

Como resultado de lo anterior, los impactos sobre los recursos hídricos y la vegetación difieren y las medidas de adaptación de las NDC, el PPRH y otras políticas nacionales deben ser flexibles ante los diferentes cambios posibles del clima en las regiones. Mientras que en Tarija hay una tendencia a una mayor disponibilidad de agua (SSP 3-7,0 y 5-8,5), pero con una enorme incertidumbre e incluso una tendencia a una menor disponibilidad bajo un cambio climático moderado (SSP1-2,6), en las tierras bajas de Santa Cruz, todos los escenarios muestran una menor disponibilidad de agua, lo cual se agudiza cuanto mayor es el incremento de la temperatura. Cabe notar que la proyección incierta de una mayor disponibilidad de agua en Tarija difiere de los resultados de Álvarez et al. (2021), que señalaron que habría escasez de recursos hídricos en Tarija. Como se discutió anteriormente, estos resultados divergentes podrían estar sujetos al número diferente de simulaciones de modelos climáticos que se utilizaron para analizar los cambios futuros en los recursos hídricos.

Asimismo, y de relevancia crucial, los resultados también muestran la importancia de la mitigación del cambio climático: los impactos sobre los procesos hídricos y los extremos hidrológicos (sequías e inundaciones) aumentan en ambos departamentos, en número e intensidad, con el incremento de la temperatura (desde el escenario de calentamiento moderado SSP1-2,6 hasta el de calentamiento extremo SSP5-8,5).

Es importante tener en cuenta que la caracterización de las condiciones hidrológicas actuales continua estando sujeta a incertidumbre, a pesar del rendimiento globalmente satisfactorio de SWIM, sobre todo, debido a la incertidumbre en: i) los datos de entrada y los datos de validación faltantes (por

ejemplo, clima, suelo y uso de la tierra), ii) los datos utilizados para la calibración del modelo (por ejemplo, el caudal), iii) la estructura del modelo, debido a la simplificación de los procesos hidrológicos, y iv) los parámetros del modelo. Por ejemplo, a pesar de la utilidad de los datos climáticos utilizados en este estudio para ejecutar el modelo hidrológico en cuencas con escasez de datos, los datos climáticos en grilla están sujetos a incertidumbres, entre otros, debido a los procedimientos de interpolación espacial y a la falta de datos de observación. La precipitación puede tener sesgos sistemáticos causados por el viento, lo cual es inherente a las mediciones de precipitación e introduce un error no cuantificado (Pollock et al., 2018). Los datos de caudales observados fueron la base para la calibración del modelo, sin embargo, los datos de los caudales pueden tener errores debido a las incertidumbres inherentes a las mediciones de caudal y a las curvas de intensidad-duración-frecuencia (Tomkins, 2014). En las cuencas andinas de Colombia se reportaron incertidumbres de hasta $\pm 20\%$ en la medición de caudales utilizando el método tradicional de velocidad-área y el medidor de corriente (Parra et al., 2016). **Se necesitan nuevos estudios para cuantificar las incertidumbres en la modelación hidrológica** debido a los errores en los datos hidrometeorológicos observados.

Las condiciones hidrológicas futuras todavía están sujetas a incertidumbres en comparación con las condiciones actuales debido a la baja certeza en las simulaciones de los modelos climáticos y los escenarios de emisiones, así como a los métodos de corrección de sesgos y de reducción de escala utilizados para corregir los datos de los modelos climáticos. Dado que los datos de observación (W5E5), que tienen una baja resolución espacial (50 km), se utilizaron para ajustar las simulaciones de los modelos climáticos globales, se sugiere que los **futuros estudios en Bolivia puedan utilizar datos de observación de alta resolución espacial** para analizar las proyecciones hidrológicas a nivel local, como, por ejemplo, en las cuencas altoandinas.

En general, se recomienda analizar con detalle los resultados de cualquier modelación para el diseño de políticas, acciones o leyes, ya que los resultados pueden estar sujetos a incertidumbre. La información utilizada debe ser actualizada regularmente, de manera que los modelos y evaluaciones económicas reflejen adecuadamente la situación de la cuenca a medida que esta va cambiando.

5.2 Comentarios finales

Este estudio ha examinado la cadena de impactos climáticos, desde un clima cambiante hasta la disponibilidad de recursos hídricos, pero no estaría completo si no considerara los impactos sobre los ecosistemas, las sociedades y la economía. La descripción de los impactos sobre las principales actividades productivas y los ecosistemas de las cuencas Guadalquivir, San Martín y Paraguá se encuentra en las cinco notas de política que acompañan a este informe central. Una descripción

de los impactos en la sociedad requiere como insumo un análisis de vulnerabilidad específico, que está fuera del alcance de este estudio.

Como referencia, se remite a los lectores a Gutiérrez (2021), IHCantabria (2021) para la cuenca Guadalquivir, entre otros. Para las cuencas San Martín y Paraguá, se puede consultar GAD Santa Cruz (2021) y Villaseñor (2012), entre otros.





Referencias

- Abadi, A. M., Rowe, C. M., y Andrade, M. (2020). Climate regionalization in Bolivia: A combination of non-hierarchical and consensus clustering analyses based on precipitation and temperature. *International Journal of Climatology*, 40(10), p. 4408-4421. <https://doi.org/10.1002/joc.6464>
- Álvarez, C., Rojo, J., Sampedro, N., Cacho, E., García, E., Ayala, R., Aguilar, R., Oller, C., Pereira, D. y Peres, J. A. (2021). Índice de vulnerabilidad y adaptación al cambio climático en la ciudad de Tarija, Bolivia. Resumen Ejecutivo. (CAF, Ed.). ISBN: 978-980-422-245-0
- Agencia Nacional del Agua [ANA]. (2021). Portal do Sistema Nacional de Informacoes sobre recursos Hídricos (SNIRH). (2022). Recopilado de: <https://www.snirh.gov.br/gestorpcd>
- Arias, P. A., Ortega, G., Villegas, L. D., y Martínez, J. A. (2021). Colombian climatology in CMIP5/CMIP6 models: Persistent biases and improvements. *Facultad de Ingeniería*, 100, p. 75-96. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.20210525>
- Canedo-Ross, C., Uvo, C. B., y Berndtsson, R. (2019). Precipitation variability and its relation to climate anomalies in the Bolivian Altiplano. *International Journal of Climatology*, 39(4), p. 2096-2107. <https://doi.org/10.1002/joc.5937>
- Carpas, A. 20219. Represa De San Jacinto Tarija-Bolivia. Recopilado de <https://doku.pub/download/represa-de-san-jacinto-tarija-bolivia-el9vg8m24kqy>
- Climate Watch. (2022). CLIMATEWATCH. (Septiembre, 2022). Recopilado de: <https://www.climatewatchdata.org/>
- Da Motta-Paca, V. H., Espinoza-Dávalos, G. E., Moreira, D. M., y Comair, G. (2020). Variability of Trends in Precipitation across the Amazon River Basin Determined from the CHIRPS Precipitation Product and from Station Records. *Water Journal*, 12, p. 1244. <https://doi.org/10.3390/w12051244>
- Espinoza, J. C., Garreaud, R., Poveda, G., Arias, P. A., Molina-Carpio, J., Masiokas, M., Viale, M. y Scaff, L. (2020). Hydroclimate of the Andes Part I: Main Climatic Features. *Frontiers in Earth Science*, 8(64). <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00064>
- European Space Agency [ESA]. (2022). COPERNICUS. Europe's eyes on Earth. (ESA & EU, Ed.). (2022). Recopilado de: <https://www.copernicus.eu/en/about-copernicus/copernicus-detail>
- Food & Agriculture Organization [FAO]. (2022). FAO SOILS PORTAL. Harmonized World Soil Database. (2022). Recopilado de: <https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v12/en/>
- FUNDECO y GIZ. (2020). Biodiversidad de las cuencas Paraguá, San Martín y subcuenca Zapocó. Manuscrito no publicado
- Gobierno Autónomo Municipal [GAD] Santa Cruz. (2021). Estrategia Departamental de Cambio Climático. Hacia una Santa Cruz resiliente. Horizonte 2030-2040-2050.
- GAD Santa Cruz y AMDECRUZ. (2020). Plan de recuperación de zonas afectadas por incendios en el departamento de Santa Cruz. (FAO, Ed.)
- GAD Tarija. (2022). Asistente de Gestión Unificada del Agua (A.G.U.A.). SIHITA. (UCB, & SEDEGIA, Ed.) Recopilado de: <https://sihita.org/sig-agua/>
- Garreaud, R. D. (2009). The Andes climate and weather. *Advances in Geosciences*, 22, p. 3-11. <https://doi.org/10.5194/adgeo-22-3-2009>
- GIZ. (2021). Estudio de Ganadería Sostenible en las cuencas Paraguá, San Martín y subcuenca Zapocó.
- GIZ. (2022a). Estudio Preliminar Genero e Interculturalidad. Manuscrito no publicado
- GIZ. (2022b). Plataforma virtual. Priorización de las cuencas hidrográficas. (2022). Recopilado de: <https://paisajesresilientes.org/donde-trabajamos/cuenca-san-martin-y-subcuenca-zapoco>
- Gutiérrez, J. (2021). Evaluación del riesgo climático en la cuenca Guadalquivir. La Paz. Bolivia. (PROCUENCA/GIZ y MMAyA/VRHR, Ed.)
- Hattermann, F. F., Krysanova, V., y Wechsung, F. (2005). Folgen von Klimawandel und Landnutzungsänderungen für den Landschaftswasserhaushalt und die landwirtschaftlichen Erträge im Gebiet der deutschen Elbe. Auswirkungen des globalen Wandels auf Wasser, Umwelt und Gesellschaft im Elbegebiet, p. 151-164. Recopilado de: https://publications.pik-potsdam.de/pubman/faces/ViewItemOverviewPage.jsp?itemId=item_13135

- Hattermann, F. F., Huang, S., Burghoff, O., Willems, W., Österle, H., Büchner, M., y Kundzewicz, Z. (2014). Modelling flood damages under climate change conditions – a case study for Germany. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14(12), p. 3151-3168. <https://doi.org/10.5194/nhess-14-3151-2014>
- Hattermann, F. F., Krysanova, V., Gosling, S. N., Dankers, R., Daggupati, P., Donnelly, C., Flörke, M., Huang, S., Motovilov, Y., Buda, S., Yang, T., Müller, C., Leng, G., Tang, Q., Portmann, F. T., Hagemann, S., Gerten, D., Wada, Y., Masaki, Y., Alema-yehu, T., Satoh, Y. y Samaniego, L. (2017). Cross scale inter-comparison of climate change impacts simulated by regional and global hydrological models in eleven large river basins. *Climatic Change*, 141, p. 561-576. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1829-4>
- Hattermann, F. F., Vetter, T., Breuer, L., Buda Su, Daggupati, P., Donnelly, C., Fekete, B., Flörke, F., Gosling, S. N., Hoffmann, P., Liersch, S., Masaki, Y., Motovilov, Y., Müller, C., Samaniego, L., Stacke, T., Wada Y., Yang, T. y Krysanova, V. (2018). Sources of uncertainty in hydrological climate impact assessment: a cross-scale study. *Environmental Research Letters*, 13(015006). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa9938>
- Hattermann, F. F., Weiland, M., Huang, S., Krysanova, V., y Kundzewicz, Z. W. (2011). Model-Supported Impact Assessment for the Water Sector in Central Germany Under Climate Change—A Case Study. *Water Resources Management*, 25(13), p. 3113-3134. <https://doi.org/10.1007/s11269-011-9848-4>
- Heerspink, B. P., Kendall, A. D., Coe, M. T., y Hyndman, D. W. (2020). Trends in streamflow, evapotranspiration, and groundwater storage across the Amazon Basin linked to changing precipitation and land cover. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 32(100755). <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100755>
- IHCantabria. (2021). Índice de vulnerabilidad al cambio climático en las ciudades de La Paz y Tarija en Bolivia. Plan de Adaptación al Cambio Climático del Municipio de Tarija. (IRD, & PROMETA, Ed.)
- INE. (2012). Censo Nacional de Población y Vivienda
- IPCC. (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [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, & B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Reyno Unido y New York, NY, USA. doi:10.1017/9781009157896
- IPCC. (2022). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, Reyno Unido y New York, NY, USA. doi:10.1017/9781009325844
- Krysanova, V., Hattermann, F., Huang, S., Hesse, C., Vetter, T., Liersch, S., Koch, H. y Kundzewicz, Z. W. (2015). Modelling climate and land-use change impacts with SWIM: lessons learnt from multiple applications. *Hydrological Sciences Journal*, 60(4), p. 606-635. <https://doi.org/10.1080/02626666.2014.925560>
- Lange, S., Menz, C., Gleixner, S., Cucchi, M., Weedon, G. P., Amici, A., Bellouin, N., Schmied, H. M., Hersbach, H., Buontempo, C. y Cagnazzo, C. (2021). WFDE5 over land merged with ERA5 over the ocean (W5E5 v2.0). Repositorio de ISI-MIP. <https://doi.org/10.48364/ISIMIP342217>
- López-Moreno, J. I., Morán-Tejeda, E., Vicente-Serrano, S. M., Bazo, J., Azorin-Molina, C., Revuelto, J., Sánchez-Lorenzo, A., Navarro-Serrano, F., Aguilar, E. y Chura, O. (2016). Recent temperature variability and change in the Altiplano of Bolivia and Peru. *International Journal of Climatology*, 36(4), p. 1773-1796. <https://doi.org/10.1002/joc.4459>
- Loucks, D. P., y van Beek, E. (2017). Water Resource Systems Planning and Management. An Introduction to Methods, Models, and Applications (Vol. 1). Switzerland: Deltares and UNESCO-IHE. doi:10.1007/978-3-319-44234-1
- Massachusetts Institute of Technology [MIT]. (2020). Explainer, Radiative Forcing. MIT Climate Portal. Recopilado de: <https://climate.mit.edu/explainers/radiative-forcing>
- Ministerio de Medio Ambiente y Aguas [MMayA]. (2017). Balance Hídrico Superficial de Bolivia (1980-2016). (Stockholm Environment Institute, SENAMHI, IHH/UMSA, & LH/UMSS, Ed.) Bolivia. Recopilado de: <https://datos.siarh.gob.bo/biblioteca/406>
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., y Veith, T. L. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), p. 885-900. <http://dx.doi.org/10.13031/2013.23153>

- Moya, M. I., Meneses, R. I., Gonzales, A., Palabral, A., Loayza, E., Urrelo, V., Loza, S. y Cuba, E. (2021). La biodiversidad de la cuenca del río Guadalquivir: implicancias de su conservación para la seguridad hídrica de la región
- National Drought Mitigation Center. (2022). University of Nebraska. (2022). Recopilado de: <https://drought.unl.edu/AboutUs.aspx>
- O'Neill, B. C., Tebaldi, C., van Vuuren, D. P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., Knutti, R., Kriegler, E., Lamarque, J. F., Lowe, J., Meehl, G. A., Moss, R., Riahi, K. y Sanderson, B. M. (2016). The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 9(9). <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>
- Parra, B. G., Rojas, L. P., Barrios, M., y Estrada, J. M. (2016). Uncertainty of discharge estimation in high-grade Andean streams. *Flow Measurement and Instrumentation*, 48, p. 42-50. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2016.02.005>
- Plataforma Interinstitucional de la Cuenca del Río Guadalquivir [PIC Guadalquivir]. (2021). Plan Director de la Cuenca del río Guadalquivir. Manuscrito no publicado. Ministerio de Medio Ambiente y Agua. Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego. PROCUENCA/GIZ.
- Poveda, G., Espinoza, J. C., Zuluaga, M. D., Solman, S. A., Garreaud, R., y van Oevelen, P. J. (2020). High Impact Weather Events in the Andes. *Frontiers in Earth Science*, 8(162). doi:<https://doi.org/10.3389/feart.2020.00162>
- Segura, H., Espinoza, J. C., Junquas, C., Lebel, T., Vuille, M., y Garreaud, R. (2020). Recent changes in the precipitation-driving processes over the southern tropical Andes/western Amazon. *Climate Dynamics*, 54, p. 2613-2631. <https://doi.org/10.1007/S00382-020-05132-6>
- Seiler, C., Hutjes, R. A., y Kabat, P. (2013a). Climate Variability and Trends in Bolivia. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 52(1), p. 130-146. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-12-0105.1>
- Seiler, C., Hutjes, R. A., y Kabat, P. (2013b). Likely Ranges of Climate Change in Bolivia. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 52(6), p. 1303-1317. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-12-0224.1>
- Shekhar, A., y Shapiro, C. A. (2019). What do meteorological indices tell us about a long-term tillage study? *Soil and Tillage Research*, 193, p. 161-170. <https://doi.org/10.1016/J.STILL.2019.06.004>
- Thorntwaite, C. W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *The Geographical Review*, 38, p. 55-94. doi:10.2307/210739
- Tomkins, K. M. (2014). Uncertainty in streamflow rating curves: methods, controls and consequences. *Hydrological Processes*, 28(3), p. 464-481. <https://doi.org/10.1002/hyp.9567>
- Torres-Batló, J., & Martí-Cardona, B. (2020). Precipitation trends over the southern Andean Altiplano from 1981 to 2018. *Journal of Hydrology*, 590(125485). <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125485>
- UNESCO. (2020). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2020. Agua y Cambio Climático. París. UNESCO/ONU-Agua. ISBN 978-92-3-300136-7
- United Nations [UN]. (2021). Nationally Determinated Contributions under the Paris Agreement, revised synthesis report by the Secretariat. Document Fccc/PA/CMA/2021/8/Rev.1 of the 26th Conference of the Parties to the UN Framework Convention on climate change. Glasgow. Recopilado de: <https://unfccc.int/documents/307628>
- Velpuri, N. M., Pervez, S., y Cushing, W. M. (2016). Hydropower assessment of Bolivia—A multisource satellite data and hydrologic modeling approach. Open-File Report 2016-1156, U.S. Geological Survey, U.S. Department of Interior. <https://doi.org/10.3133/OFR20161156>
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., y López-Moreno, J. I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, 23(7), p. 1696-1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>
- Villaseñor, V. (2012). El clima cambia, cambia tú también: Opciones de adaptación al cambio climático y mitigación desde la perspectiva de los pueblos indígenas y las comunidades locales en función a la diversidad biológica. Estudio de caso – Bolivia. (FCBC, SPDA, & UICN, Ed.)
- Wickel, A., Ghajarnia, N., Yates, D., Newman, A., Escobar, M., Purkey, D., Lima, N., Escalera, A.C. y Kaenel, M. V. (2019). Developing a gridded high-resolution gauge based precipitation product for Bolivia. *Geophysic*, 21. Corpus ID: 216657603

Anexo

Comparación de los modelos climáticos CMIP6 con sesgo ajustado y los datos basados en la observación (W5E5 y GMET)

Esta sección muestra la comparación intra-anual de los registros de temperatura del aire y precipitación ajustados por sesgo obtenidos de los modelos climáticos CMIP6, y los datos basados en la observación W5E5 y los datos climáticos locales en grilla GMET (Wickel et al., 2019) developed by the National Center for Atmospheric Research (NCAR para el período 1985-2015. El GMET se basa en datos climáticos observados del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI). La comparación muestra que el conjunto de modelos de CMIP6 refleja muy bien los patrones

estacionales de precipitación y temperatura media del aire para el promedio de Bolivia y el promedio de los dos departamentos de Santa Cruz y Tarija. Esto sugiere que el método de ajuste del sesgo aplicado a los resultados del modelo climático CMIP6 es muy eficaz. Además, el W5E5 representa bien los patrones estacionales de precipitación y de temperatura media del aire cuando se compara con el GMET, aunque se observa una ligera sobreestimación de la precipitación en la región de Santa Cruz durante la estación lluviosa. En general, los resultados de la comparación muestran la idoneidad de los registros con sesgo ajustado de los modelos climáticos CMIP6 y W5E5 para los estudios de impacto climático en Bolivia.

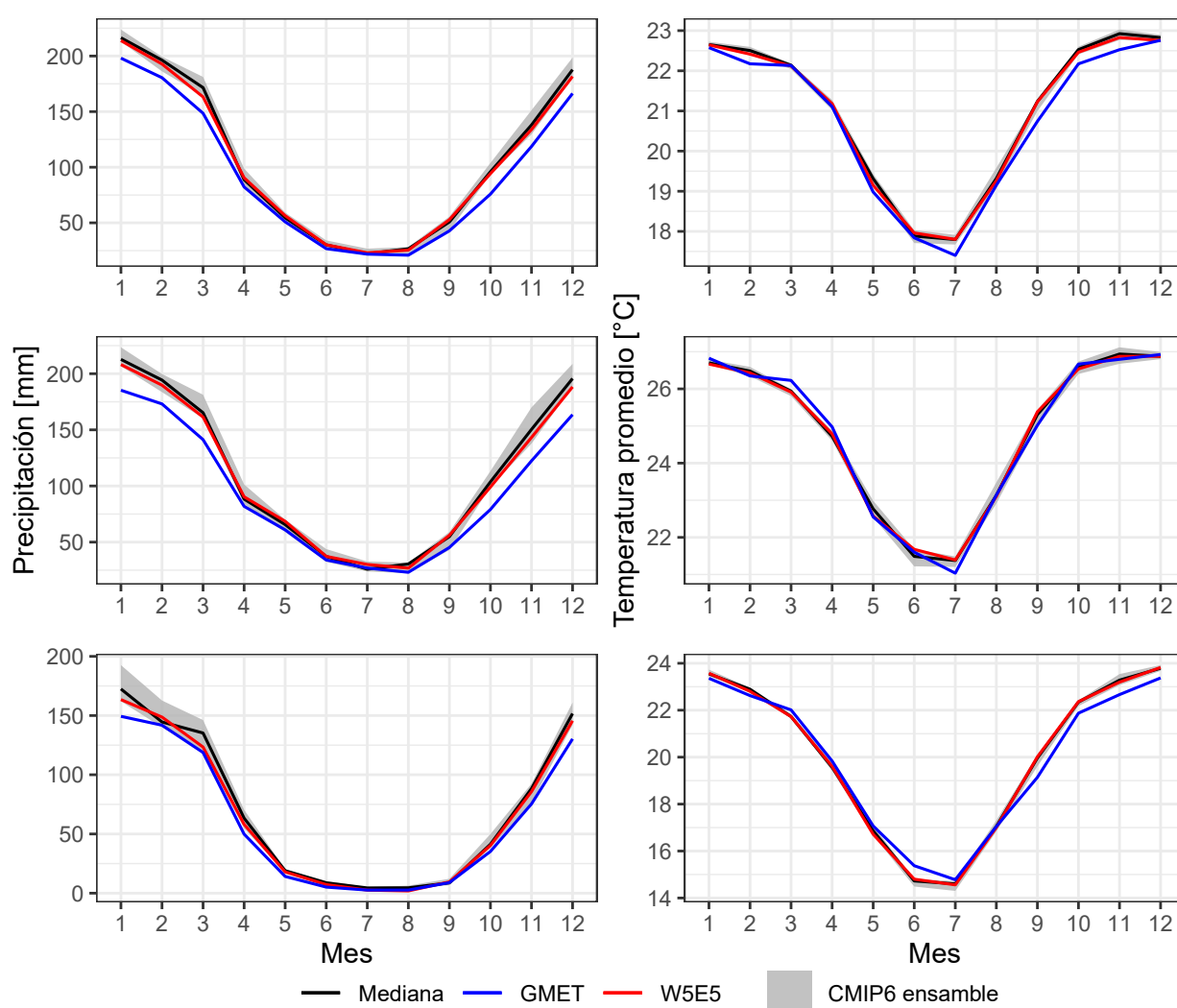


Figura A1: Ciclo anual de la precipitación y la temperatura media del aire para el período histórico 1985-2015 utilizando el conjunto CMIP6 (10 modelos) y los datos basados en la observación (W5E5 y GMET) para Bolivia (fila superior), Santa Cruz (fila central) y Tarija (fila inferior).

