

Transformando la Gestión del Agua mediante el Control de Incendios en la Chiquitania

Reporte SEI
Octubre 2024

Yesica Rodríguez¹
Jeanne Fernández²

¹ Instituto de Ambiente de Estocolmo (SEI)

² Uppsala University (UU)



Published by

Stockholm Environment Institute
Linnégatan 87D 115 23 Stockholm, Sweden
Tel: +46 8 30 80 44
www.sei.org

Contacto

Yesica Rodríguez
yesica.rodriguez@sei.org

Editing

Natalia Ortiz Díaz

Layout

Alejandra Aristizábal

Graphics

Mia Shu
Linnéa Haviland

Cover photo

Alrededores de Roboré en Bolivia. Roboré, Santa Cruz, Bolivia © Yesica Rodríguez

This publication may be reproduced in whole or in part and in any form for educational or non-profit purposes, without special permission from the copyright holder(s) provided acknowledgement of the source is made. No use of this publication may be made for resale or other commercial purpose, without the written permission of the copyright holder(s).

Copyright © October 2024 by Stockholm Environment Institute

DOI: <https://doi.org/10.51414/sei2024.049>

Contents

Resumen	4
Chiquitania y Bolivia WATCH	4
Priorización preliminar de cuencas para restauración	7
Principales hallazgos en la visita de campo	10
Herramientas para el apoyo a la toma de decisiones en la región de la Chiquitania	12
1. Impacto de la Deforestación en la Disponibilidad de Agua: Un Análisis del Recurso Hídrico	12
2. Priorización multicriterio de cuencas hidrográficas para la restauración post-incendio	16
Metodología de análisis multicriterio y su validación	16
Aplicación GEE	18
¿Cómo continuar con el proceso de planificación de recurso hídrico y en la región de la Chiquitanía?	20
Referencias	22

Resumen

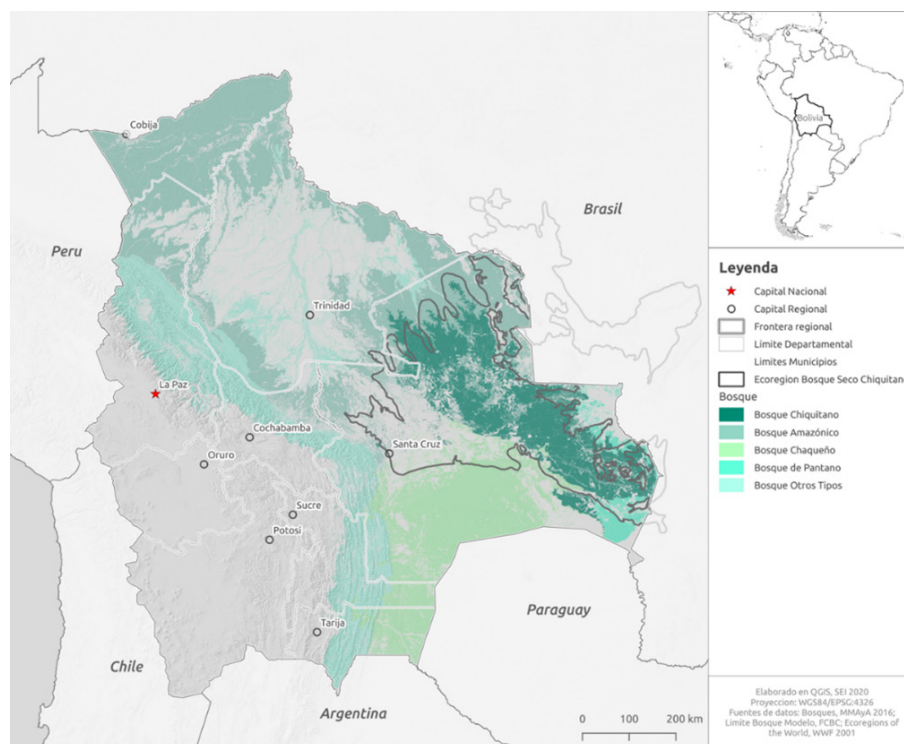
Como parte del trabajo en el proyecto Bolivia WATCH I, se llevó a cabo un detallado análisis para comprender cómo los incendios forestales influyen en el balance hídrico de la región de la Chiquitania, centrándonos en las cuencas de Curichi Grande y Tucavaca, donde la intensidad y frecuencia de los incendios han aumentado significativamente. Esta publicación expone la urgencia y relevancia de este análisis, ofreciendo un resumen de los trabajos realizados durante la primera fase del proyecto. Además, en este documento el lector encontrará los hallazgos clave obtenidos en la visita de campo de 2022, y describe las herramientas desarrolladas, como el modelo WEAP y la priorización multicriterio de cuencas para la restauración post-incendio. Finalmente, se destacan las principales conclusiones derivadas del análisis, subrayando su importancia para la gestión sostenible de los recursos hídricos en la Chiquitania.

Chiquitania y Bolivia WATCH

Los bosques secos tropicales representan aproximadamente la mitad de todos los bosques tropicales del mundo y albergan una porción considerable de la biodiversidad global (FCBC, 2012). Sin embargo, estos ecosistemas están sufriendo una degradación significativa debido a su fragmentación, la transformación del uso del suelo, el cambio climático, y los incendios forestales (Miles et al., 2006). A nivel mundial, se estima que existen un poco más de un millón de kilómetros cuadrados de bosques secos tropicales, de los cuales cerca de 520,000 km² (aproximadamente el 54%) se encuentran en Sudamérica (FCBC, 2012).

Este es el caso del Bosque Seco Chiquitano, considerado como el bosque seco tropical más extenso y conservado de América Latina, después del bloque de bosques secos de México (Portillo-Quintero & Sánchez-Azofeifa, 2010). Con una vasta extensión de más de 20 millones de hectáreas (FCBC, 2022), esta ecorregión transfronteriza se encuentra distribuida entre el sureste de Bolivia (principalmente), el norte de Paraguay y el oeste de Brasil. La mayor porción de esta ecorregión se localiza en la región boliviana (aproximadamente el 64%) (Ortiz-Przychodzka et al., 2022) conocida como La Gran Chiquitania (en el departamento de Santa Cruz), aunque también hay una parte hacia el Chaco (hacia el sur) y el Amazonas boliviano (hacia el norte), el Chaco paraguayo (hacia el sur) y el Cerrado y Pantanal brasileño-paranense (hacia el oeste) (ver Figura 1).

Figura 1. La ecorregión del Bosque Seco Chiquitano y los tipos generales de bosque de Bolivia (fuente: SEI).



Este ecosistema, situado en una zona de transición entre las cuatro ecorregiones mencionadas, posee una notable biodiversidad tanto en flora como en fauna (Killeen et al., 2006);(Pennington et al., 2006). Alberga más de 1,200 especies de mamíferos, aves, anfibios, reptiles e invertebrados, incluyendo especies únicas que no se encuentran en ninguna otra parte del mundo (FCBC, 2022). Además, se han registrado más de 2,500 especies de flora (FCBC, 2022). Esta rica biodiversidad es posible gracias a sus suelos y al singular clima de la región, que se caracteriza por seis meses de intensas lluvias y seis meses de sequía, creando un equilibrio frágil pero vital para la supervivencia de estas especies (FCBC, n.d.).

Además de su valor en términos de biodiversidad, el Bosque Seco Chiquitano es un motor de servicios ecosistémicos cruciales para el sustento de la vida. Algunos de estos servicios son la provisión de agua limpia y segura para personas y animales, regulación de la temperatura, enriquecimiento de los suelos, provisión de alimentos (FCBC, n.d.) regulación del ciclo del agua y el clima, almacenamiento de carbono y enfriamiento de la atmósfera (Roberto Navla, 2021), convirtiéndose así en una ecorregión de mucha relevancia ante la mitigación del cambio climático.

El Bosque Seco Chiquitano juega un papel crucial en dos de las cuencas hídricas más grandes e importantes de Sudamérica: el Amazonas y el Paraguay-Plata (FCBC, n.d.). Los ríos que fluyen del sur hacia el norte alimentan la subcuenca del río Iténez, que a su vez desemboca en el río Madeira y finalmente en el río Amazonas. Paralelamente, los ríos que nacen en las serranías de Sunsás, Santo Corazón y Santiago, entre otras, drenan hacia el río Curichi Grande, que marca la frontera entre Bolivia y Brasil. Estos ríos también alimentan el río Tucavaca, que desemboca en el Pantanal. Esto destaca la importancia del Bosque Seco Chiquitano para comprender la dinámica del Gran Pantanal y su relevancia regional, ya que los impactos en este sistema fluvial afectan

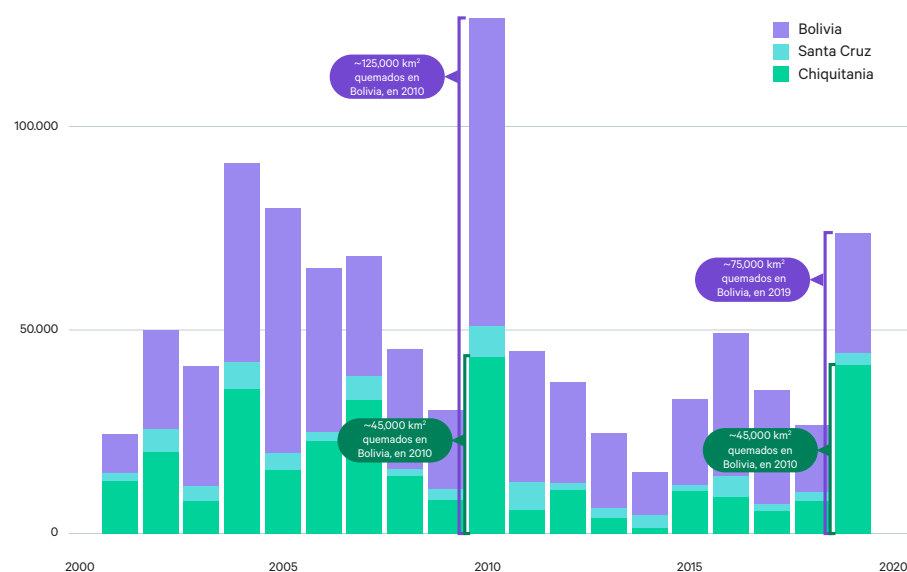
tanto al Amazonas como al Paraguay-Plata, cuencas de vital importancia a nivel mundial (FCBC, 2012).

A pesar de los importantes valores naturales y culturales de esta ecorregión, el Bosque Seco Chiquitano enfrenta una gran vulnerabilidad y riesgo. En Santa Cruz, se está registrando un considerable aumento de la deforestación, la expansión de la frontera agrícola, el cambio de uso del suelo, los incendios forestales y los asentamientos no planificados, todo exacerbado por el cambio climático (FCBC, 2022). Esto se relaciona con el sexto pilar de la Agenda Patriótica 2025, que busca la soberanía productiva a través de la diversificación y aumento de la producción agropecuaria, incluyendo la triplicación de la población ganadera (Ministerio de Autonomías, 2013).

Durante una visita de campo en 2021, se identificó un problema derivado del mal uso de las tierras otorgadas por el Instituto Nacional de Reforma Agraria (INRA) para la expansión agrícola. Estas tierras están siendo usadas para la extracción de madera y, en caso de destinarse a fines agrícolas, requieren deforestación. La deforestación y los incendios forestales están degradando significativamente esta ecorregión. Entre 1986 y 2020, la deforestación aumentó un 640%, pasando de 1 millón a 6.4 millones de hectáreas debido a la expansión ganadera y agrícola. Si esta tendencia continúa, el Bosque Seco Chiquitano podría desaparecer por completo para 2050 (FCBC, 2020a).

Adicionalmente, el Bosque Seco Chiquitano enfrenta una creciente frecuencia e intensidad de incendios forestales, provocados tanto por causas naturales como antrópicas. El aumento de la temperatura debido al cambio climático y el uso del fuego para convertir bosques en áreas agrícolas (conocido como *chaqueo*) han generado incendios descontrolados que superan la capacidad de resistencia de los ecosistemas, afectando el agua, el aire y el suelo. La mayoría de estos incendios ocurren entre julio y octubre, y con el tiempo se han vuelto más recurrentes y severos (FCBC, 2020b). En 2019, un incendio devastó más de 4 millones de hectáreas de bosque (Maillard et al., 2020), y en 2020 se registró una cantidad similar (Roberto Navla, 2021).

Figura 2. Histórico de áreas quemadas en Bolivia y la Chiquitania (2001 - 2019). Fuente (SEI).



En respuesta a estos eventos de incendios forestales, en el 2020 se lanzó el Plan de Recuperación de las Zonas Afectadas por Incendios en el Departamento de Santa Cruz (Gobierno Autónomo Departamental de Santa Cruz, 2020), cuya implementación a nivel público está a cargo de la coordinación entre el Ministerio de Defensa, Ministerio de Medio Ambiente y Agua, Ministerio de Planificación del Desarrollo, Ministerio de Desarrollo Rural y Tierras, Ministerio de Desarrollo Productivo y Economía Plural, Ministerio de Salud, Ministerio de Educación, Deportes y Culturas, Ministerio de Obras Públicas, Servicios y Vivienda, Gobierno Autónomo Departamental de Santa Cruz y los Gobiernos Autónomos Municipales. En este plan, las estrategias se centraban en temáticas socioeconómicas, ambientales, culturales y de gobernanza, sin contemplar el recurso hídrico dentro de la problemática. En consecuencia, el Stockholm Environment Institute (SEI), con apoyo de la Agencia Sueca para el Desarrollo Internacional (ASDI), inició un programa piloto para contribuir con los esfuerzos de recuperación y restauración del Bosque Seco Chiquitano, con actores clave como el Ministerio de Ambiente y Agua (MMAyA), la Fundación para la Conservación del Bosque Chiquitano (FCBC), entre otros. El objetivo de este programa era llegar a tener un mejor entendimiento sobre la afectación de los incendios y la deforestación dentro de la dinámica hídrica y realizar una priorización de zonas a nivel de cuenca donde se debían concentrar los esfuerzos de restauración con mayor urgencia (Wickel et al., 2021).

Priorización preliminar de cuencas para restauración

El desarrollo del programa piloto se estableció desde tres fases. La primera consistió en un diagnóstico de la región en términos de la identificación de las entidades y actores clave dentro de los recursos hídricos y del uso del suelo, la caracterización histórica de la deforestación y de los incendios forestales y la priorización preliminar de cuencas que habían sido afectadas desproporcionadamente por los incendios a lo largo del tiempo. Como resultado de esta fase, se tuvo una herramienta interactiva de priorización en Tableau a través de un conjunto de mapas y gráficos para orientar la identificación de las zonas clave para las acciones de restauración y gestión del recurso hídrico.

Para la priorización, la herramienta en Tableau muestra cuatro mapas relacionados con la cobertura en la región y las áreas quemadas, que permitían observar el cambio del mapa año a año dentro del periodo analizado:

1. Cobertura forestal a escala de microcuenca como el porcentaje del área de cada microcuenca para el periodo comprendido entre 1992 y 2018
2. Tierra agrícola a escala de microcuenca como el porcentaje del área de cada microcuenca para el periodo comprendido entre 1992 y 2018.
3. Zonas forestales quemadas como porcentaje de la superficie total de cada microcuenca entre 2001 y 2009.

4. Zonas forestales quemadas como porcentaje de la superficie total de cada macrocuenca entre 2001 y 2009.

Con el objetivo de considerar tanto el cambio de la cobertura y uso del suelo a lo largo del tiempo, como los aspectos relacionados al recurso hídrico desde un enfoque holístico y multicriterio para la selección de las cuencas prioritarias, se establecieron cuatro indicadores para macrocuenca y tres a nivel de macrocuenca (ver Tabla 1).

Tabla 1. Indicadores para la priorización de cuencas a nivel de microcuenca y macrocuenca.

Nivel	Indicador
Microcuenca	Pérdida acumulada de cobertura forestal entre 2001 y 2018
	Superficie total acumulada de bosque quemado entre 2001 y 2018
	Área de bosque quemada en el 2019
	Área de bosque quemada en 2010
Macrocuenca	Potencial de recarga hídrica
	Cantidad de pozos de aguas subterráneas
	Orden de la corriente de agua (sistema de jerarquía Pfafsetter)

En la figura 2 se muestran los resultados de estos indicadores a nivel de macrocuenca. Las macrocuencas de Curichi Grande y Tucavaca, destacadas en magenta más intenso, son las más afectadas en términos de incendios, deforestación y recursos hídricos. Curichi Grande es la cuenca con la mayor área total quemada durante el período analizado, con un 27%. Además, tuvo una significativa afectación en 2010 y 2019, con un 15% y un 13% de área quemada respectivamente. Sin embargo, esta cuenca también muestra la menor pérdida relativa de cobertura forestal, con un 1%, lo que sugiere su capacidad de restauración natural ante los incendios forestales.

Por otro lado, la cuenca de Tucavaca fue la más afectada en términos de superficie de bosque quemada durante los incendios forestales de 2019, con un 14% de su área total quemada. Sin embargo, en 2010, no se observó el mismo nivel de afectación. Dada esta tendencia, es crucial monitorear esta zona con mayor cuidado en el futuro. Es importante destacar que en la cuenca de San Julián se registró la mayor proporción de áreas quemadas, representando un 41% del total de la cuenca durante el período completo de estudio (2001-2018). Sin embargo, al examinar los incendios históricos en esta zona, no se han registrado quemas recientes. Por lo tanto, se considera que implementar estrategias en esta área podría ser tardío. Es más pertinente dirigir los esfuerzos hacia la parte noroeste de la Chiquitania, específicamente en las cuencas de Curichi Grande y Tucavaca. Aunque estas cuencas no cuentan con el mayor número de pozos ni la recarga potencial más significativa, tienen una relevancia considerable en estos temas.

Figura 3. Resultados de los indicadores a nivel de macrocuenca. Fuente (SEI).

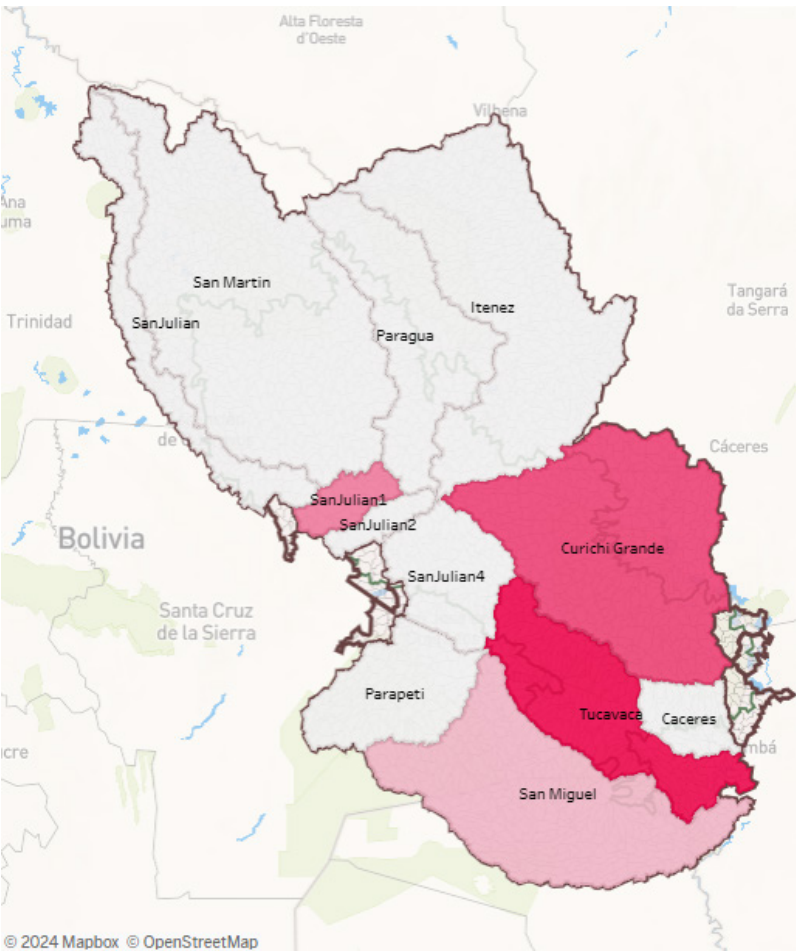
Resumen Macrocuenas					2010	2019	Forest Total	Pérdida de
Cuenca Principal	Área L7	Nivel de recarga L7	Pozos L7	Orden L7	Quemado L7	Quemado L7	Quemado L7	bodque ESA L7
Caceres	6.899	Alto	13	4,1	10%	7%	25%	10%
Curichi Grande	52.594	Alto	15	5,7	15%	13%	27%	1%
Itenez	57.679	Alto	5	5,5	6%	2%	14%	5%
Paragua	28.560	Muy Alto	27	6,1	15%	8%	27%	2%
Parapeti	17.583	Alto	1	5,6	0%	2%	3%	2%
San Martin	74.973	Muy Alto	42	6,6	12%	5%	26%	3%
San Miguel	44.651	Alto	0	4,4	1%	9%	10%	8%
San Julian	17.269	Alto	20	3,9	12%	4%	41%	12%
San Julian 1	4.979	Muy Alto	7	4,6	13%	12%	26%	2%
San Julian 2	3.618	Muy Alto	4	4,5	7%	3%	16%	2%
San Julian 4	15.015	Alto	19	5,6	3%	3%	15%	8%
Tucavaca	26.098	Alto	8	5,3	5%	14%	15%	3%

Ranking de los recursos hídricos y macrocuenas

Cuenca Principal	Recarga	Pozos	Orden
Caceres	7	6	11
Curichi Grande	6	5	3
Itenez	5	9	6
Paragua	1	2	2
Parapeti	11	11	4
San Martin	2	1	1
San Miguel	10	12	9
San Julian	8	3	12
San Julian 1	4	8	8
San Julian 2	3	10	10
San Julian 4	9	4	5
Tucavaca	12	7	7

Ranking de la pérdida de bosques y áreas quemadas de las macrocuenas

Cuenca Principal	Quemado 2010	Quemado 2019	Quemado Total	Pérdida de bodque
Caceres	6	6	6	2
Curichi Grande	1	2	2	12
Itenez	8	11	10	5
Paragua	2	5	3	8
Parapeti	12	12	12	11
San Martin	5	7	4	6
San Miguel	11	4	11	4
San Julian	4	8	1	1
San Julian 1	3	3	5	9
San Julian 2	7	9	7	10
San Julian 4	10	10	8	3
Tucavaca	9	1	9	7



Basándonos en este prototipo de priorización, se optó por continuar el análisis de la dinámica hídrica en las cuencas de Curichi Grande y Tucavaca. Para ello, se recolectaron datos detallados y se llevaron a cabo análisis más exhaustivos con el fin de desarrollar un modelo hidrológico que permita evaluar el balance hídrico de la región. Esto también se hizo con el objetivo de mejorar el análisis de priorización de cuencas al considerar aspectos adicionales como la importancia de los ecosistemas, la cercanía a zonas protegidas, la presencia de comunidades locales, la densidad poblacional, entre otros.

Principales hallazgos en la visita de campo

En el otoño de 2021, Agua Sustentable, uno de los socios del proyecto, llevó a cabo una encuesta social en el municipio de Roboré, la ciudad más poblada en la provincia de Chiquitos y ubicada en la cuenca Tucavaca. El objetivo era recopilar datos sobre los sistemas de suministro de agua, las fuentes de agua y los pozos comunitarios, así como obtener percepciones sobre los impactos de los incendios en la calidad del agua. Los resultados de la encuesta revelaron que, en general, las comunidades se mostraban optimistas sobre el futuro de su principal fuente de agua, con un 80% expresando confianza en la posibilidad de depender de ella en el futuro. Sin embargo, un 40% de los encuestados ya sentía que no recibía suficiente agua. Además, se evidenció una clara preocupación por la contaminación del agua y el impacto de los incendios forestales. En abril de 2022, investigadores del SEI viajaron a la región de la Chiquitania y a la ciudad de Santa Cruz para investigar las percepciones de diversos actores involucrados en la gestión de los recursos hídricos y ecosistemas, incluyendo a la Gobernación Departamental de Santa Cruz, el SEARPI, así como a las comunidades indígenas locales que se ven directamente afectadas por cuestiones de gestión del agua y la degradación ambiental (ver Figura 3). En las cuatro comunidades visitadas (ubicadas dentro de la cuenca Tucavaca, una de las cuencas priorizadas a partir de la herramienta de priorización desarrollada en la primera fase del proyecto): El Portón, San Lorenzo viejo, San Pedro y Quitunuquia, fueron mencionados problemas relacionados con el agua y el saneamiento, así como con la protección de los recursos forestales. Todas las comunidades sufren de problemas de calidad y cantidad del agua con varios niveles de severidad dependiendo de los sistemas de suministro de agua y la ubicación de su fuente de agua. Aunque se realizan actividades de mantenimiento en las tomas y tuberías de agua, generalmente no hay tratamiento del agua, por lo que no hay garantía de que el agua sea segura para el consumo. La falta de herramientas y mediciones para monitorear el flujo y la calidad del agua hace que sea difícil responder a cualquier desafío en materia de calidad y cantidad del agua.

Figura 4. Visita de campo a la Chiquitania en el 2021. Fotografía 1: Visita a la comunidad de San Lorenzo Viejo. Fotografía 2: Recorrido en el sistema de abastecimiento de la comunidad San Pedro. Fuente (SEI).



En cuanto a los impactos de los incendios forestales, las comunidades locales han confirmado que la situación del agua se ha vuelto más urgente después de los incendios ocurridos en 2019 y 2020. Durante los meses de agosto a octubre, se enfrentan a una grave escasez de agua, con niveles bajos en los arroyos, flujos considerablemente reducidos y días en los que el suministro no logra cubrir la demanda doméstica. Además de la devastación de la biodiversidad y la cubierta forestal, los incendios han afectado la calidad del agua. Algunos residentes han señalado que las cenizas del fuego y su posterior sedimentación han alterado la composición, el color y el sabor del agua debido a la acumulación de desechos orgánicos. De hecho, se han reportado casos de gastroenteritis y problemas renales después de los incendios forestales de 2019, lo que podría estar relacionado con la presencia de cenizas en el agua.

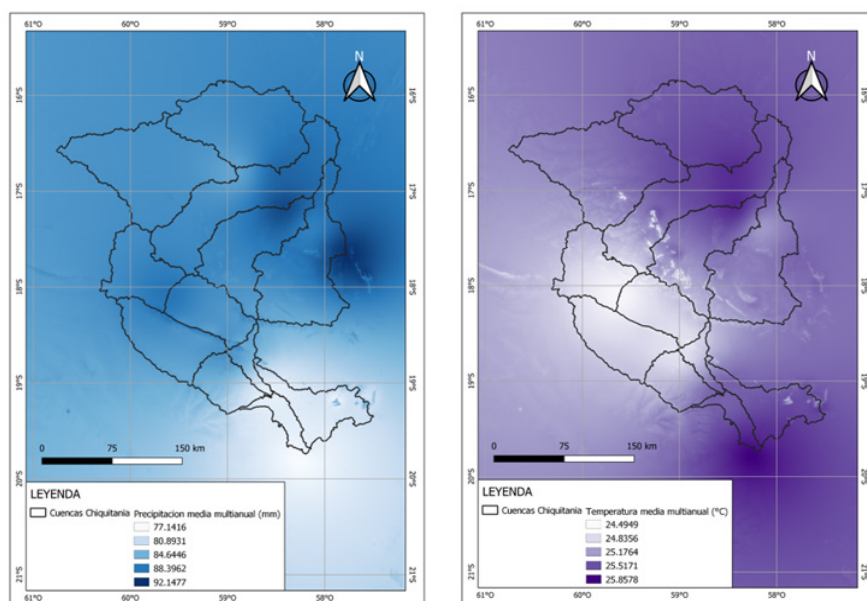
Herramientas para el apoyo a la toma de decisiones en la región de la Chiquitania

1. Impacto de la Deforestación en la Disponibilidad de Agua: Un Análisis del Recurso Hídrico

Durante la fase 1 del proyecto, se diseñó una herramienta preliminar de priorización de cuencas basada en la cantidad de bosque perdido y el área total quemada entre 2001 y 2018. El propósito de esta herramienta era facilitar el desarrollo de un modelo hidrológico en la fase 2. Este modelo tenía como objetivo analizar el balance hídrico y comprender los cambios en los procesos del ciclo hidrológico, especialmente en respuesta a escenarios de cambio de uso del suelo, como la expansión agrícola, y de cambio climático. Para abordar esta necesidad, se construyó el modelo en la herramienta WEAP (Water, Evaluation and Planning) para las cuencas de Tucavaca y Curichi Grande, previamente identificadas mediante la herramienta de priorización de Tableau.

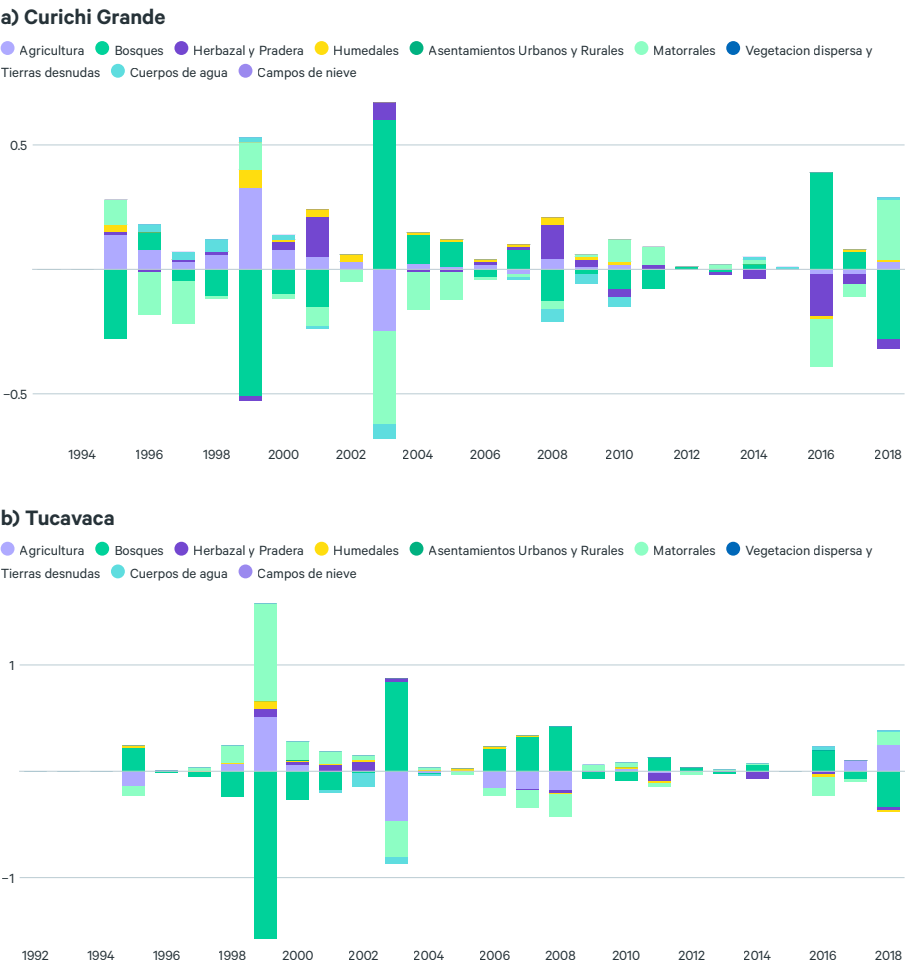
Eso requirió de una caracterización climática histórica (a nivel diario de 1980 a 2016) para la precipitación y la temperatura resultado de la aplicación del algoritmo GMET para el Balance Hídrico del Bolivia del 2016 (SEI et al., 2016) (ver Figura 4). Así mismo, de la ponderación de la humedad relativa, el brillo solar y la velocidad del viento a través del método de la Distancia Inversa Ponderada (IDW por sus siglas en inglés) a partir de las observaciones mensuales multianuales de algunas estaciones en la zona de estudio. A partir de estos análisis se pudo observar que la precipitación media multianual se encuentra aproximadamente entre los 77 y 91 mm y que la temperatura media multianual entre los 24.5 y los 25.9 °C.

Figura 5. Precipitación y temperatura media multianual de las cuencas de Curichi Gran y Tucavaca en la región de la Chiquitania.



En cuanto a la representación de la cobertura y uso del suelo, se analizaron diferentes coberturas tales como COBUSO 2010, desarrollada por la Fundación Conservatorio del Bosque Seco Chiquitano y la cobertura de la Agencia Espacial Europea (ESA por sus siglas en inglés), entre otros. Finalmente se adoptó la de la ESA con la reclasificación del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) para el año 2010 debido a que los productos bolivianos revisados no contaban con el área de la Chiquitania correspondiente a la porción de Brasil, considerando que este producto tenía la resolución suficiente para la representación del impacto del suelo en términos hidrológicos. Al analizar el cambio de cobertura en esta base, se ha observado una tendencia anual de pérdida de cobertura boscosa en la mayoría de los años. Esta disminución se atribuye al efecto combinado de los incendios forestales y la expansión de la frontera agrícola, una tendencia que se ha mantenido desde 1992 en respuesta al objetivo nacional establecido en la Agenda Patriótica 2025 de aumentar la producción agrícola (ver Figura 5). Aunque en algunos años se ha registrado un aumento en la cobertura boscosa, esto podría deberse a una clasificación incorrecta de la vegetación o a la regeneración natural de los bosques. Sin embargo, es importante tener en cuenta que esta regeneración no garantiza que la cobertura sea necesariamente la misma que antes de la pérdida inicial.

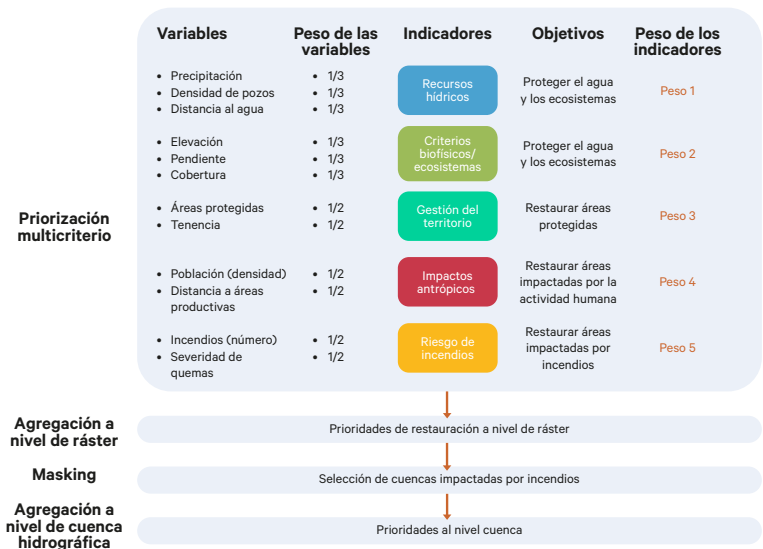
Figura 6. Cambio en el uso del suelo de 1992 a 2018 en a) Curichi Grande y b) Tucavaca.



Para la construcción de las series climáticas que representan las condiciones futuras se hicieron predicciones basadas en los Modelos de Circulación Global (GCMs por sus siglas en inglés) del proyecto CMIP5 bajo la ruta más pesimista de carbono atmosférico. El desempeño de estos en términos de la capacidad para caracterizar los atributos futuros del clima se estimó a partir de 5 indicadores relacionados con la precipitación, su duración y los eventos extremos. Se identificaron 3 modelos que tenían los valores más adecuados de dichos indicadores estadísticos, sin embargo, para la Chiquitania era importante representar periodos secos más prolongados y aumentos de temperatura, por todo el tema de los incendios forestales. De modo que, los modelos finalmente incluidos dentro de la modelación hidrológica fueron el BCC-CSM1-1 y el CMCC-CMS.

La construcción de los escenarios de cambio climático y de cambio de uso de suelo tuvo en cuenta las condiciones mostradas en la Figura 6.

Figura 7. Escenarios de cambio climático y de cambio de uso de suelo.



La representación de las demandas se limitó al consumo doméstico de las cuatro comunidades con las que se interactuó durante la visita de campo en 2021. Esto se basó en la población reportada por estas comunidades y en una dotación estándar establecida para climas cálidos en Bolivia, fijada en 120 litros por habitante por día. Como resultado, el módulo de demandas del modelo necesita mejorarse para incorporar el consumo de otras poblaciones dentro de las cuencas. Es importante destacar que, en el caso de la producción agrícola, no se utilizan sistemas de riego, sino que se practica la agricultura de secano.

La calibración del modelo a través de los parámetros que relacionan la hidrología y el suelo se hizo en una etapa inicial a través de valores encontrados en la literatura. Posteriormente, se hizo una revisión general de los valores promedio de la precipitación, evaporación y descarga de los valores modelados con los valores del Modelo Nacional del Balance Hídrico de 1992. Adicionalmente, se hizo una comparación complementaria de los caudales simulados con los caudales generados por un estudio

que se hizo en el Pantanal con el modelo MGB (Jardim et al., 2020) para el punto más cercano a la cuenca de Curichi Grande. Es importante aclarar que no se realizó una calibración convencional porque no se contaba con estaciones hidrométricas en la zona de estudio.

De acuerdo con los resultados se observa una tendencia a la disminución de la capacidad de retención de agua en el suelo. Esto se evidencia en el aumento de la escorrentía superficial (ver Figura 7) en la época de lluvias (noviembre a marzo), resultado esperado debido a la compactación que sufre el suelo con el cambio de cobertura de bosque a agricultura. En términos de evapotranspiración (ver Figura 8), no se evidencian grandes cambios, solo un aumento de este parámetro ante el escenario de cambio climático en el que aumenta la temperatura. Por ello, la necesidad de mejorar el modelo en la concepción de las demandas para no sobreestimar la oferta y de escenarios de cambio climático que se acerquen más a una condición extrema seca, que es la tendencia que vienen observando las comunidades en sus regiones, una disminución de los niveles en los ríos y mayores temperaturas.

Figura 8. Escorrentía superficial ante escenarios de cambio climático y uso del suelo. Fuente (SEI).

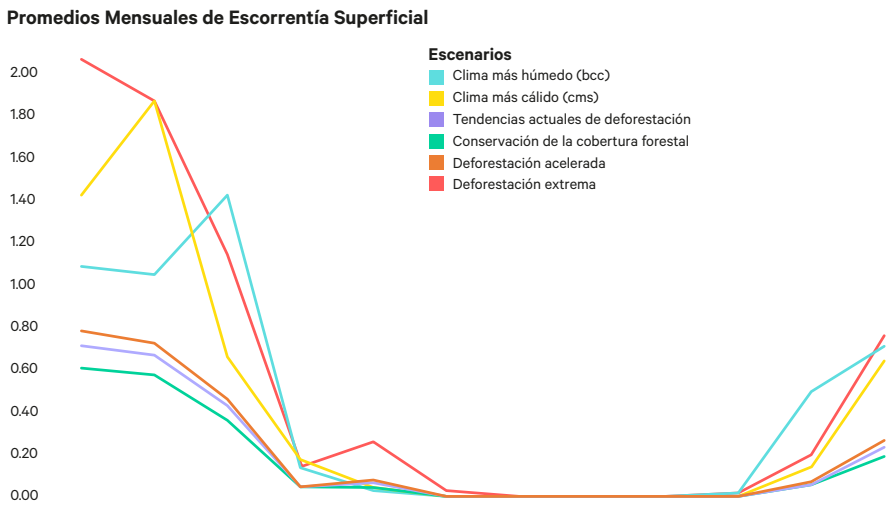
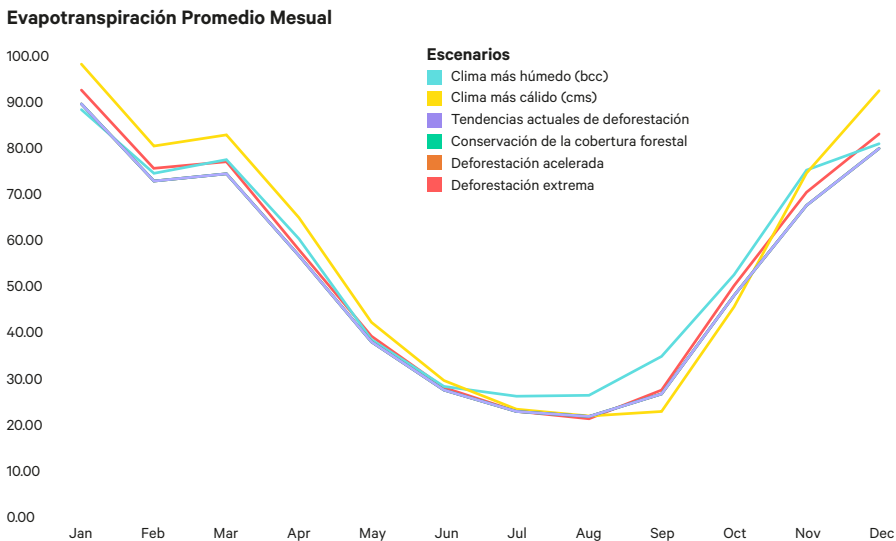


Figura 9. Evapotranspiración ante escenarios de cambio climático y uso de suelo. Fuente (SEI).



2. Priorización multicriterio de cuencas hidrográficas para la restauración post-incendio

Para avanzar en la priorización de los esfuerzos de restauración y conservación de ecosistemas a escala de cuenca, en la segunda fase, se agregó un enfoque en los impactos de los incendios forestales en las comunidades locales y los ecosistemas y varios indicadores de priorización, abarcando tanto los recursos naturales, la cobertura del suelo, el historial de incendios y los recursos hídricos. Se desarrolló una nueva herramienta de priorización, construida en Google Earth Engine (GEE), una plataforma de análisis espacial que brinda visualización y capacidad analítica en la nube. La herramienta GEE es accesible como una aplicación en línea aquí: <https://jeannefdz.users.earthengine.app/view/watershed-prioritizer-sc>.

Metodología de análisis multicriterio y su validación

Al trabajar con información espacial para la priorización de cuencas, junto con la FCBC, se desarrolló una metodología de análisis multicriterio, validada durante los talleres. El primer desafío fue seleccionar los indicadores en base a los objetivos del estudio. En el contexto de la priorización de cuencas con fines de restauración, los objetivos eran:

- Considerar los recursos hídricos, representar sitios naturales con alto potencial para el abastecimiento de agua;
- Proporcionar una medida de la necesidad de conservación basada en un amplio conjunto de parámetros de biodiversidad;
- Dar cuenta de los entornos naturales vulnerables debido a las amenazas e impactos de la actividad antropogénica;
- Tener en cuenta la gravedad de los incendios forestales y su frecuencia

Después de definir las variables a considerar, el análisis multicriterio aplica 2 pasos para proporcionar una priorización. La puntuación asigna una clasificación dentro de cada criterio. Las opciones más favorecidas tienen una clasificación más alta, mientras que las menos preferidas tienen una clasificación más baja. Luego, la ponderación específica para cada criterio, indica la importancia general de una variable en relación con los demás. En este paso, a cada variable se le asigna un peso y después, se realiza la operación algebraica que multiplica cada variable por su peso asignado y suma todas las variables ponderadas para identificar áreas de alta prioridad.

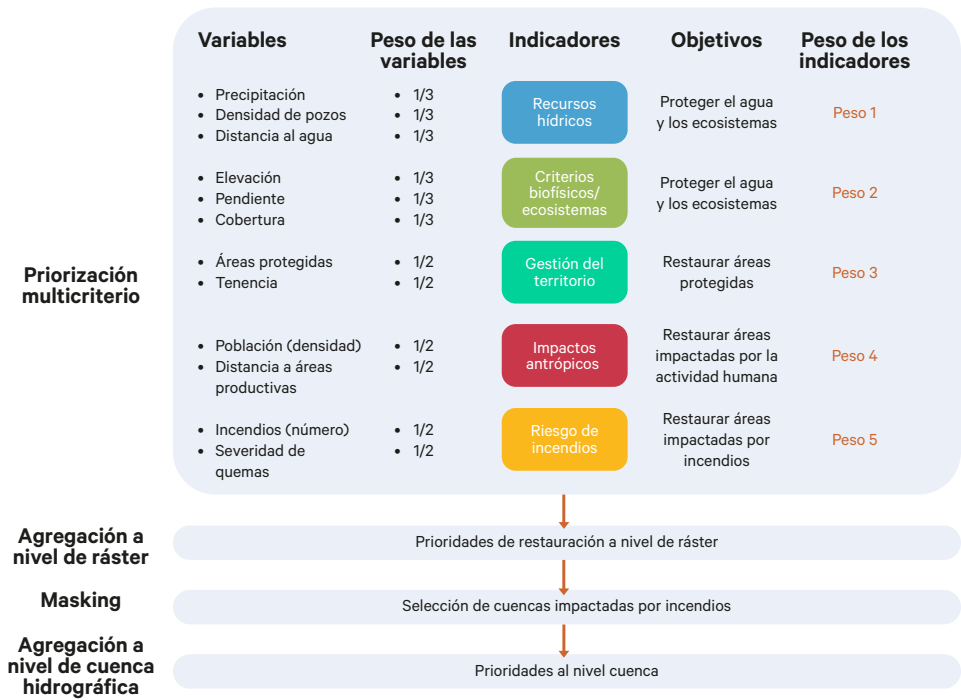
Para validar la selección de indicadores y la metodología multicriterio, el SEI, la FCBC y Agua Sustentable lideraron unos talleres de validación que incluyeron a representantes de las Autoridades Regionales de Santa Cruz (Gobernación de Santa Cruz) y a expertos en recursos hídricos, recursos naturales y planificación ambiental, de varias ONG como FAN, WWF, y Natura Bolivia. Los objetivos fueron revisar los indicadores de priorización de cuencas y discutir el proceso de ponderación. Los talleres también tuvieron como

objetivo involucrar a los usuarios potenciales del producto de priorización en las etapas de su desarrollo para motivar intereses y usos futuros.

Las sesiones de medio día se organizaron tanto presencialmente para los participantes en Santa Cruz como de forma remota para el equipo de SEI y otras partes interesadas que estaban ubicadas a distancia. Durante estas sesiones, los participantes proporcionaron comentarios sobre los indicadores de priorización y discutieron las ponderaciones apropiadas para cada indicador. En general, los participantes respaldaron la metodología multicriterio y estuvieron de acuerdo con las variables preseleccionadas, así como con su agrupación en categorías principales según el esquema de análisis multicriterio (consultar Figura 9).

En resumen, el proceso de priorización multicriterio implementado (ver Figura 9) consta de 4 etapas con diferentes análisis y resultados. La primera etapa, denominada ‘Priorización multicriterio’, implica dos pasos para asignar ponderaciones a las variables, lo que indica su influencia en la priorización final. En primer lugar, se asigna un peso a cada variable dentro del grupo de indicadores. Para asegurar la misma importancia a las variables que contribuyen al mismo indicador, se utilizan pesos de $\frac{1}{2}$ o $\frac{1}{3}$, dependiendo del número de variables en cada grupo (2 o 3). Luego, se asigna un peso definido por el usuario a cada indicador, como ‘Recursos Hídricos’, ‘Ecosistemas/ Criterios Biofísicos’, ‘Gestión Territorial’, ‘Impactos Humanos’ y ‘Riesgo de Incendios’. En la segunda etapa, se aplica la ponderación a nivel de ráster. En la tercera etapa, se eliminan las cuencas que no han sido afectadas por incendios, dejando la última etapa como la agregación, es decir, el cálculo del rango de importancia promedio a nivel de cuenca, pero solo en aquellas cuencas afectadas por incendios.

Figura 10. Esquema de análisis multicriterio (Fernandez et. al, 2023).



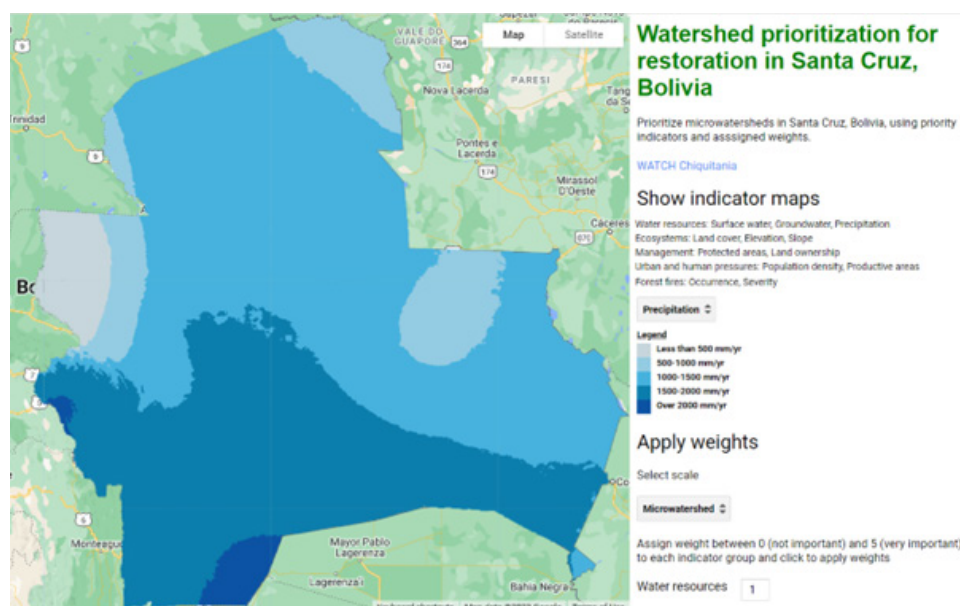
Inicialmente, la priorización fue desarrollada para Curichi Chiquitania y Tucuvaca, las dos cuencas priorizadas en la Fase 1. Pero luego los participantes y las autoridades regionales nos pidieron que se desarrollara al nivel de toda Santa Cruz y escala de microcuencas.

Aplicación GEE

En base a los talleres de partes interesadas, se desarrolló una herramienta de visualización al nivel de Santa Cruz con indicadores de priorización adicionales comparado con la Fase 1. La herramienta de priorización GEE permite operar con múltiples mapas y capas ráster, un formato que Tableau todavía no maneja tan bien, dado que fue diseñado para el análisis y la visualización de datos con formatos de entrada como Excel o csv. Dado que GEE maneja datos espaciales y mapas, se pueden programar operaciones y agregaciones especiales más avanzadas directamente en la plataforma. Esta actualización permite visualizar las macrocuencas y microcuencas en Santa Cruz y visualizar y combinar múltiples capas de información espacial relacionada con los recursos hídricos, la cobertura del suelo, los impactos de los incendios, etc. La herramienta clasifica las cuencas en función de los indicadores y de las ponderaciones definidas por el usuario que representan la importancia que se les otorga. Al utilizar esta herramienta, el usuario tiene la posibilidad de asignar ponderaciones varias veces.

La ventana principal de la aplicación es una capa de mapas de Google centrada en el departamento de Santa Cruz. El usuario puede seleccionar cuáles datos espaciales mostrar al hacer clic en la capa que quiere visualizar. El mapa se actualiza según el indicador elegido, por ejemplo, precipitación (ver Figura 10).

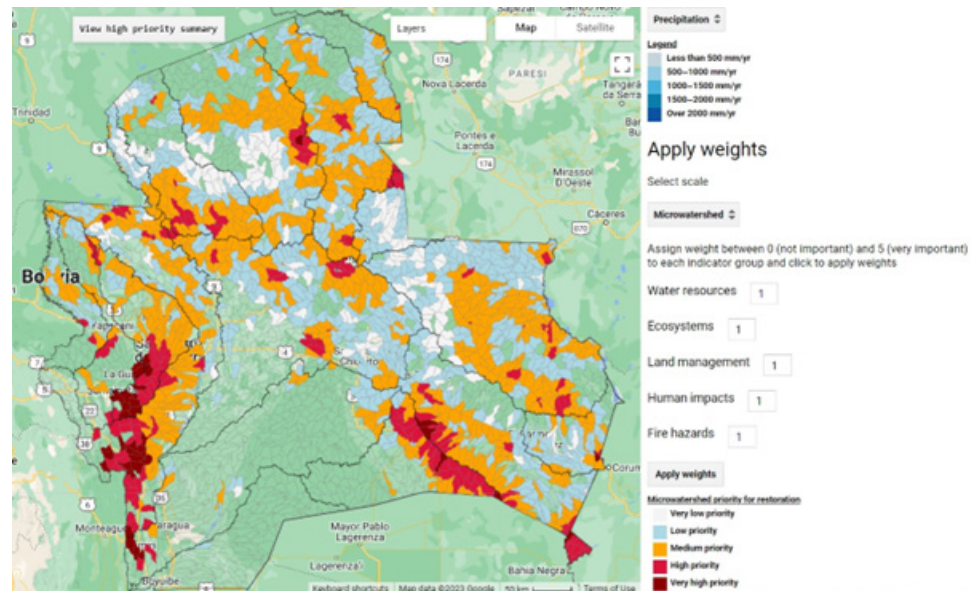
Figura 11. Mapa de la aplicación GEE actualizado con la capa de precipitación (fuente: propia).



Para asignar ponderaciones a las categorías de indicadores, el usuario puede escribir números entre 1 y 10 en los cuadros de texto al lado de cada categoría principal de indicadores. Luego, al hacer clic en el botón “Apply Weights” (Aplicar

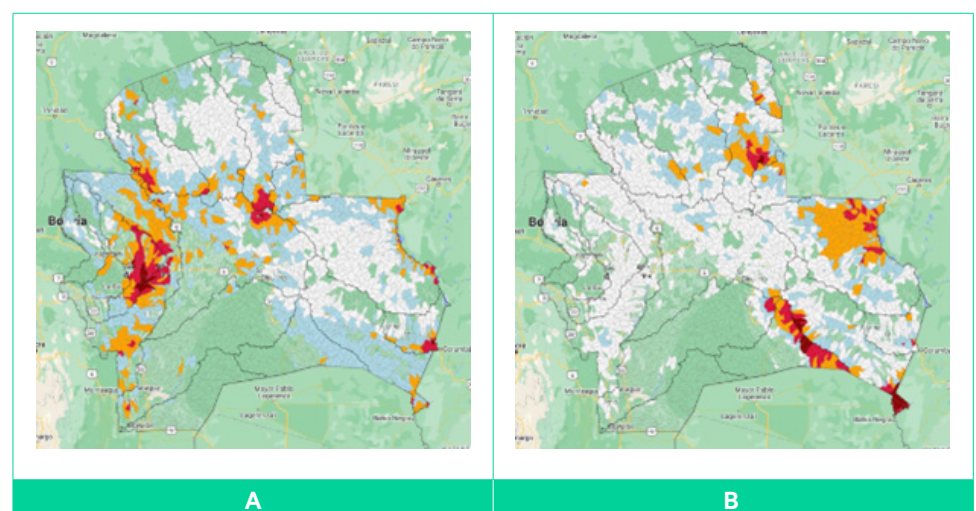
ponderaciones), se iniciarán los cálculos y los análisis espaciales para generar un mapa de clasificación de microcuencas basado en las ponderaciones escogidas (ver Figura 11). Las microcuencas se clasifican desde muy baja hasta muy alta prioridad para la restauración dependiendo de los aportes del usuario.

Figura 12. Actualización del mapa después de aplicar ponderaciones (fuente: propia).



Al hacer variar la ponderación, se puede observar el impacto de los distintos indicadores en la priorización. Por ejemplo, la priorización de los recursos de agua muestra la importancia de las microcuencas alrededor de Santa Cruz de la Sierra y mientras que la priorización de las áreas quemadas da más importancia a las cuencas al sur y al este del departamento (ver Figura 12). Esto indica que la priorización de áreas para restauración post-incendio puede ser algo complejo al tomar en cuenta varios objetivos de manejo (Fernandez et al., 2023).

Figura 13. Comparación entre la priorización de los indicadores de recursos de agua (A) y los indicadores de (B) (Basado en Fernandez et. al, 2023).



Los desafíos para el desarrollo de la herramienta fueron la disponibilidad de conjuntos de datos para representar indicadores críticos como el acceso a los recursos hídricos y la relevancia de los ecosistemas. En la región de la Chiquitania no hay muchos datos disponibles para describir la calidad y cantidad de los recursos hídricos. Esto abre la posibilidad a seguir desarrollando la aplicación con más datos y con más aportes de las partes interesadas locales.

¿Cómo continuar con el proceso de planificación de recurso hídrico y en la región de la Chiquitania?

La gestión de incendios forestales es crucial en la planificación de recursos hídricos. Los incendios no solo devastan los bosques, sino que también afectan significativamente el ciclo del agua (SEI, el primer reporte sobre Chiquitania). La reducción de la capacidad de los suelos quemados en retener agua puede aumentar el riesgo de inundaciones y la erosión. Además, los incendios pueden afectar la calidad del agua al contaminar las fuentes con cenizas y sedimentos de erosión del suelo. En este sentido, integrar el riesgo de incendios en la gestión de los recursos hídricos es esencial para asegurar su manejo sostenible.

A través de este estudio se ha explorado el potencial de herramientas de visualización y/o de modelación tal como Tableau, WEAP, y GEE para la gestión de recursos hídricos y forestales. Se puede rescatar los beneficios de una representación visual y comprensible de procesos complejos tal como los riesgos asociados al cambio climático y a incendios, así como las dimensiones espaciotemporales de los impactos posibles. En cuanto a la identificación de áreas críticas en la región de Santa Cruz, el primer paso de análisis en Tableau permitió identificar dos cuencas (Curichi Grande y Tucuvaca) para un caso de estudio de modelación en WEAP y una simulación de los impactos del cambio de cobertura de suelo en los recursos hídricos. En la segunda fase, el uso de un conjunto de datos espaciales en GEE ha permitido visualizar con más detalle la ubicación de los incendios, de los recursos hídricos y ecosistémicos, así como de las actividades humanas a nivel regional. El cruce de datos espaciales permite identificar cuencas críticas para el recurso hídrico, alrededor de la ciudad de Santa Cruz de la Sierra, por ejemplo, que no suelen ser priorizadas para restauración.

A la complejidad del ejercicio de identificación de áreas críticas que requieren atención y restauración se agrega una complejidad del paisaje social y gubernamental en Santa Cruz.

Los problemas de comunidades reflejan desafíos generales de gestión y gobernanza a nivel municipal, regional y nacional. En general, existen responsabilidades poco claras entre las instituciones involucradas en la gestión de la tierra y el agua y recursos financieros limitados. Hacen falta espacios o herramientas de comunicación que hagan más efectivo el diálogo entre las entidades nacionales y locales, para que haya un entendimiento sobre el impacto de las decisiones que se toman en las diferentes escalas y cómo abordar estos impactos para que no se conviertan en mayores problemáticas.

A pesar de los desafíos del cambio climático y la limitada disponibilidad de recursos hídricos a nivel nacional, las políticas de desarrollo en Bolivia fomentan una expansión agrícola, lo que ha resultado en una migración significativa hacia la región de la Chiquitania. Los permisos concedidos para este fin suelen intensificar la deforestación y los incendios forestales, ya que implican la conversión de tierras y ejercen presión adicional sobre los recursos hídricos. Además, la falta de un monitoreo adecuado dificulta determinar si esta conversión está realmente aumentando la producción agrícola como se pretende, o si simplemente está promoviendo un enfoque extractivista que beneficia a unos pocos a expensas de la degradación de este ecosistema crucial.

Si bien el desarrollo de herramientas no impacta directamente los procesos de gobernanza, la creación y el uso de modelos predictivos y transparentes para la gestión sostenible puede servir como punto de entrada para reforzar el diálogo entre distintos actores y tomadores de decisiones, dado que permiten discutir de posibles escenarios futuros y aportar información científica al proceso de toma de decisión. Así, las herramientas contribuyen a la construcción de un entendimiento colectivo para minimizar los impactos ambientales y planificar adecuadamente la conservación de los ecosistemas y de los recursos hídricos.

En el futuro, sería beneficioso ampliar la participación de actores locales para poder ofrecer recomendaciones específicas al departamento de Santa Cruz. Esto implicaría implementar un marco de trabajo de modelación colaborativa que facilite la construcción participativa de herramientas que busquen mejorar la comprensión de los procesos del sistema físico de la región, centrándose particularmente en los aspectos relacionados con el agua y el suelo. La colaboración activa tanto de las entidades gubernamentales como de las comunidades locales es fundamental para garantizar una representación adecuada del sistema, que tome en cuenta las necesidades e intereses de todos los involucrados, basándose en datos fiables. Cuando todos los actores se involucren activamente en estos procesos y sientan una verdadera conexión con ellos, el proceso de toma de decisiones estará respaldado por una base de información sólida que puede tener un impacto real en el bienestar tanto de las poblaciones como de los ecosistemas.

Además, si este estudio considera las preferencias de restauración, los criterios no se tradujeron en valores económicos. Agregando objetivos de una restauración rentable, se deberían equilibrar los beneficios (biodiversidad, calidad del agua, etc.) con los costos asociados. El desarrollo futuro de este trabajo podría combinarse con evaluaciones económicas y herramientas complementarias como el análisis costo-beneficio. Valorar los servicios ecosistémicos en comparación con las actividades productivas como la ganadería y la agricultura es un gran desafío, pero es crucial para garantizar el desarrollo de actividades sostenibles y la conservación de los recursos en Santa Cruz.

Referencias

- FCBC. (n.d.). Bosque Seco Chiquitano. <https://www.fcbc.org.bo/Bosque-Seco-Chiquitano/>.
- FCBC. (2012). Conservación y desarrollo forestal de la ecorregión del Bosque Seco Chiquitano (Bolivia y Paraguay) 2007–2011. <https://www.fcbc.org.bo/wp-content/uploads/2021/07/MEMORIA-FINAL.pdf>
- FCBC. (2020a). Deforestación: Departamento de Santa Cruz 1996–2020. https://www.fcbc.org.bo/wp-content/uploads/2022/06/Deforestacion-OBSCH_web.pdf
- FCBC. (2020b). Incendios forestales: Departamento de Santa Cruz 2019–2021. https://observatoriochiquitano.org/wp-content/uploads/2022/08/Incendios-OBSCH_web.pdf
- FCBC. (2022). Fauna del Bosque Chiquitano. <https://www.fcbc.org.bo/wp-content/uploads/2022/08/Cartilla-Fauna-BSCh-FCBC.pdf>
- Fernandez, J., Maillard, O., Uyuni, G., Guzmán-Rojo, M., & Escobar, M. (2023). Multi-Criteria Prioritization of Watersheds for Post-Fire Restoration Using GIS Tools and Google Earth Engine: A Case Study from the Department of Santa Cruz, Bolivia. *Water*, 15(20). <https://doi.org/10.3390/w15203545>
- Gobierno Autónomo Departamental de Santa Cruz. (2020). Plan de recuperación de zonas afectadas por incendios en el Departamento de Santa Cruz.
- Jardim, P. F., Melo, M. M. M., Ribeiro, L. de C., Collischonn, W., & Paz, A. R. da. (2020). A Modeling Assessment of Large-Scale Hydrologic Alteration in South American Pantanal Due to Upstream Dam Operation. *Frontiers in Environmental Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.567450>
- Killeen, T. J., Chávez, E., Peña-Claros, M., Toledo, M., Arroyo, L., Caballero, J., Correa, L., Guillén, R., Quevedo, R., Saldías, M., Soria, L., Uslar, Y., Vargas, I., & Steininger, M. K. (2006). The Chiquitano Dry Forest, the Transition between Humid and Dry Forest in Eastern Lowland Bolivia. In Pennington, R. T. & Ratter, J. A. (Eds.), *Neotropical Savannas and Seasonally Dry Forests: Plant Diversity, Biogeography, and Conservation* (pp. 213–233). CRC Press. <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9781420004496-9/>
- Maillard, O., Vides-Almonacid, R., Flores-Valencia, M., Coronado, R., Vogt, P., Vicente-Serrano, S. M., Azurduy, H., Anívarro, R., & Cuellar, R. L. (2020). Relationship of forest cover fragmentation and drought with the occurrence of forest fires in the Department of Santa Cruz, Bolivia. *Forests*, 11(9). <https://doi.org/10.3390/F11090910>
- Miles, L., Newton, A. C., DeFries, R. S., Ravilious, C., May, I., Blyth, S., Kapos, V., & Gordon, J. E. (2006). A global overview of the conservation status of tropical dry forests. *Journal of Biogeography*, 33(3), 491–505. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2005.01424.x>
- Ministerio de Autonomías. (2013). Agenda Patriótica 2025. https://www.planificacion.gob.bo/uploads/AGENDA_PATRIOTICA2025_MPD.pdf
- Ortiz-Przychodzka, S., Benavides-Frías, C., Vadillo, A., Salas, G., Díaz-Reviriego, I., & Hanspach, J. (2022, December 15). En Bolivia, el bosque seco está en grave riesgo. <https://envol-vert.org/actu/2022/12/en-bolivia-la-foret-seche-de-chiquitano-est-gravement-menacee-de-disparition-2/>
- Portillo-Quintero, C. A., & Sánchez-Azofeifa, G. A. (2010). Extent and conservation of tropical dry forests in the Americas. *Biological Conservation*, 143(1), 144–155. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2009.09.020>
- Navia, R. (2021). El Bosque Seco Chiquitano sufre la codicia de agroindustriales y de los interculturales. <https://www.revistanomadas.com/El-Bosque-Seco-Chiquitano-Sufre-La-Codicia-de-Agroindustriales-y-de-Los-Interculturales/>
- SEI, SENAMHI, IHH/UMSA, & LH/UMSS. (2016). Balance Hídrico Superficial de Bolivia. <https://sihita.org/documento/estudio/balance-hidrico-superficial-de-bolivia-3/>
- Wickel, B., Fernandez, J., & Escobar, M. (2020). Incendios de Chiquitania: rol de los recursos hídricos en los planes de restauración forestal. Stockholm Environment Institute. <https://www.sei.org/publications/incendios-de-chiquitania-rol-de-los-recursos-hidricos-en-los-planes-de-restauracion-forestal/>

Visítanos

SEI Headquarters

Linnégatan 87D
Box 24218
104 51 Stockholm Sweden
Tel: +46 8 30 80 44
info@sei.org

Måns Nilsson
Executive Director

SEI Africa

World Agroforestry Centre
United Nations Avenue Gigiri
P.O. Box 30677 Nairobi 00100 Kenya
Tel: +254 20 722 4886
info-Africa@sei.org

Philip Osano
Centre Director

SEI Asia

Chulalongkorn University
Henri Dunant Road Pathumwan
Bangkok 10330 Thailand
Tel: +66 2 251 4415
info-Asia@sei.org

Niall O'Connor
Centre Director

SEI Latin America

Calle 71 # 11-10
Oficina 801
Bogotá Colombia
Tel: +57 1 6355319
info-LatinAmerica@sei.org

David Purkey
Centre Director

SEI Oxford

Oxford Eco Centre
Roger House Osney Mead
Oxford OX2 0ES UK
Tel: +44 1865 42 6316
info-Oxford@sei.org

Ruth Butterfield
Centre Director

SEI Tallinn

Arsenal Centre
Erika 14
10416 Tallinn Estonia
Tel: +372 6276 100
info-Tallinn@sei.org

Lauri Tammiste
Centre Director

SEI York

University of York
Heslington
York YO10 5NG UK
Tel: +44 1904 32 2897
info-York@sei.org

Sarah West
Centre Director

SEI US Main Office

11 Curtis Avenue
Somerville MA 02144-1224 USA
Tel: +1 617 627 3786

Ed Carr
Centre Director

SEI US Davis Office

501 Second Street
Davis CA 95616 USA
Tel: +1 530 753 3035

SEI US Seattle Office

1326 Fifth Avenue #640
Seattle WA 98101 USA
Tel: +1 206 547 4000