

**CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL
DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA**

**DIVISIÓN DE EDUCACIÓN
PROGRAMA DE MAESTRÍA**

**Rutas de adaptación al cambio climático que integran Soluciones basadas en Naturaleza
(SbN)**

**Tesis sometida a consideración de la División de Educación y el Programa de Posgrado
como requisito para optar al grado de**

***MAGISTER SCIENTIAE*
en Manejo y Conservación de Bosques Tropicales y Biodiversidad**

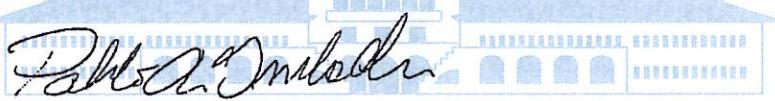
Zoila Lasmit Cerón Cancharis

**Turrialba, Costa Rica
Diciembre, 2025**

Esta tesis ha sido aceptada en su presente forma por la División de Educación y la Escuela de Posgrado del CATIE y aprobada por el Comité Consejero de la estudiante, como requisito parcial para optar por el grado de

**MAGISTER SCIENTIAE EN MANEJO Y CONSERVACIÓN DE
BOSQUES TROPICALES Y BIODIVERSIDAD**

FIRMANTES:



Pablo Imbach Bartol, Ph.D.
Director de tesis



Claudia Bouroncle Seoane, Ph.D.
Miembro del Comité Consejero



Andrea Zamora Trejos, MPD
Miembro Comité Consejero

Alfredo Zamarripa Colmenero, Ph.D.
Decano, Escuela de Posgrado

Zoila Lasmit Cerón Cancharis
Candidata

Dedicatoria

A Dios, por guiar cada uno de mis pasos, cada sueño y cada meta propuesta.

A mi abuela. Pronto serán dos años de tu partida y he tenido la suerte de vivir tu duelo lejos de casa donde guardo tantos recuerdos, el dolor fue menor. Gracias por haber sido la mejor abuela del mundo, gracias por acompañarme en este viaje y gracias por acercarme nuevamente a Dios.

A Zoila, Waldir, Vladimir, Valentín, Emily y Jesús: son lo más importante en mi vida, gracias por mantenerme a flote en la distancia y gracias por alentarme siempre en cada paso.

A mí, por todo mi esfuerzo, por las veces que caí y por las que me levanté. Siempre puedes, no lo olvides.

Agradecimientos

Quiero agradecer a mi segunda casa de estudios: el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), al proyecto Climate-IMFN ejecutado por CATIE y la Red Latinoamericana de Bosques Modelo con fondos del Gobierno de Canadá, a la Unidad de Acción Climática y al proyecto Refores y el equipo que lo conforma.

A mi comité asesor: PhD Pablo Imbach, gracias por permitirme expandir mis conocimientos en la incertidumbre de lo desconocido; MPD Andrea Zamora, gracias por enseñarme tan pacientemente, por tu soporte y amistad; PhD Claudia Bouroncle, gracias por los aportes valiosos.

Gracias a los profesores y profesoras que me acompañaron en estos dos años, en especial a Roger Villalobos, Fernando Carrera y Ethel Rubin de Celis, por creer en mis capacidades y apostar por mí.

A mis amigos de la promoción 2024-2025; en especial a Luz, Agostina y Mariaclara, por enseñarme a parar y descansar, por ser luz en mis momentos más oscuros y por su tan valiosa amistad. Las tendré siempre en mi corazón.

Agradezco al personal administrativo, oficina de posgrado, colaboradores y cada una de las personas que he conocido en CATIE; gracias por su valioso trabajo.

Finalmente, pero no menos importante, gracias a las comunidades de la cuenca del Monkey River y a las diversas instituciones que me recibieron en Belice, por su paciencia y predisposición a contribuir en la investigación; y en especial a Diane, por haberme recibido y acompañado en un país nuevo para mí.

Índice de contenido

1.	INTRODUCCIÓN	1
2.	METODOLOGÍA	2
2.1.	Marco teórico	2
2.1.1.	Vulnerabilidad de los sistemas socioecológicos	2
2.1.2.	Identificación y evaluación de medidas de adaptación.....	3
2.1.3.	Diseño de rutas de adaptación.....	4
2.2.	Marco metodológico	5
2.2.1.	Estructura del sistema socioecológico	5
2.2.2.	Identificación y evaluación de medidas de adaptación.....	7
2.2.3.	Diseño de rutas de adaptación.....	8
3.	RESULTADOS	8
3.1.	Estructura del sistema socioecológico de la cuenca del Monkey River	9
3.1.1.	Descripción del contexto.....	9
3.1.2.	Medios de vida, ecosistemas y servicios ecosistémicos	11
3.1.3.	Impactos climáticos actuales y futuros	16
3.1.4.	Capacidad adaptativa	23
3.2.	Identificación y evaluación de medidas de adaptación.....	24
3.2.1.	Sistematización de medidas de literatura.....	24
3.2.2.	Identificación de medidas	25
3.2.3.	Evaluación de medidas	26
3.3.	Diseño de rutas de adaptación.....	30
3.3.1.	Desarrollo de escenarios	30
3.3.2.	Identificación de umbrales y disparadores.....	31
3.3.3.	Diseño de rutas de adaptación para los medios de vida.....	32
4.	DISCUSIÓN	38
5.	CONCLUSIONES	42
6.	BIBLIOGRAFÍA	44
7.	ANEXOS	60

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Condiciones y criterios de capacidad adaptativa	6
Tabla 2. Actores en la cuenca del Monkey River	10
Tabla 3. Medios de vida principales presentes en las comunidades de la cuenca del Monkey River.....	11
Tabla 4. Ecosistemas, servicios ecosistémicos y medios de vida relacionados presentes en la cuenca del Monkey River	13
Tabla 5. Impactos proyectados del cambio climático al 2050	20
Tabla 6. Impactos proyectados del cambio climático al 2100	21
Tabla 7. Medidas de adaptación identificadas en la cuenca del Monkey River	25
Tabla 8. Evaluación de la eficacia de las medidas para reducir impactos del cambio climático	26
Tabla 9. Mecanismos de mitigación de las medidas de adaptación frente a eventos climáticos	27
Tabla 10. Medidas, fechas de caducidad, costos, aspectos técnicos y escala de implementación basado en conocimiento de expertos.....	29
Tabla 11. Escenarios moderado y extremo	30
Tabla 12. Umbrales y disparadores por escenario	31

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Marco metodológico de rutas de adaptación al cambio climático	5
Figura 2. Mapa de área de estudio de la cuenca del Monkey River	9
Figura 3. Medios de vida y servicios ecosistémicos presentes en la cuenca del Monkey River	15
Figura 4. Eventos extremos ocurridos desde 1970 a la actualidad (2025).....	16
Figura 5. Mapa de eventos climáticos y no climáticos presentes en la cuenca del Monkey River	18
Figura 6. Capacidad adaptativa de los productores de la cuenca del Monkey River.....	24
Figura 7. Mapa de rutas de adaptación para ganadería.....	33
Figura 8. Mapa de rutas de adaptación para agricultura.....	34
Figura 9. Mapa de rutas de adaptación para zona costera.....	35
Figura 10. Rutas para ganadería donde las medidas no son activadas por disparadores	36
Figura 11. Rutas para agricultura donde una medida final es habilitada a partir de una u otra medida según la ruta elegida.....	37
Figura 12. Ruta costera para reubicación de la comunidad	38

LISTA DE ACRÓNIMOS, ABREVIATURAS Y UNIDADES

IPCC	Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático
SbN	Soluciones basadas en la naturaleza
SES	Sistema socioecológico
SIB	Instituto de Estadística de Belice
RCP	Trayectorias de Concentración Representativa
SSP	Trayectorias Socioeconómicas Compartidas

RUTAS DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO QUE INTEGRAN SOLUCIONES BASADAS EN NATURALEZA (SBN)

Zoila Lasmit Cerón Cancharis¹

¹Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), Turrialba, Costa Rica zoila.ceron@catie.ac.cr

Resumen: El aumento de las temperaturas medias, la mayor frecuencia de fenómenos meteorológicos extremos y el incremento de la variabilidad climática interanual afectan de manera desproporcionada a los medios de vida rurales en el sur global. Se prevé que el cambio climático agrave estos efectos, con profundas repercusiones en los sistemas socioecológicos (SES) que afectan a la vulnerabilidad de las comunidades y los ecosistemas que sustentan su bienestar.

Para 2100, los modelos climáticos pronostican un calentamiento de entre +1,6 °C y +4,0 °C, aumentos de la temperatura, cambios en los patrones de precipitación, cambios en la disponibilidad de agua en América Central y en la distribución de los sistemas agrícolas. Las medidas actuales sobre el terreno se centran en abordar los impactos climáticos actuales, mientras que contrarrestar los impactos climáticos futuros requiere vías de adaptación basadas en medidas incrementales y transformadoras, procesos de toma de decisiones iterativos para abordar las incertidumbres y el aprendizaje, y abordar múltiples escalas temporales.

Este aporte propone un enfoque basado en la caracterización de los sistemas socioecológicos rurales para comprender el papel de las soluciones basadas en la naturaleza (SbN) en las rutas de adaptación y su aplicación en la cuenca del Monkey River en Belice. La presente investigación busca explorar el papel de las SbN en las rutas de adaptación al cambio climático en los sistemas socioecológicos rurales en la cuenca del Monkey River en Belice.

Palabras clave: Rutas de adaptación, cambio climático, sistemas socioecológicos, soluciones basadas en naturaleza

1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático afecta a los sistemas socioecológicos a lo largo del planeta, al estar expuestos a temperaturas promedio más elevadas, variación en los patrones de precipitación, prolongación de periodos secos, incremento del nivel del mar, sequías, inundaciones e incendios forestales más frecuentes e intensos (IPCC, 2018, 2023). Esto provocaría variación en los rendimientos agrícolas (Imbach *et al.*, 2017), menor disponibilidad de agua para consumo y producción y afectación de los ecosistemas terrestres y costeros (IPCC, 2022c). Dicho panorama, sumado a una limitada o reducida capacidad para identificar e implementar respuestas, podría afectar a los productores y sus medios de vida con consecuencias sociales y económicas cada vez más graves (Chausson *et al.*, 2020; IPCC, 2014), en particular en regiones tropicales como Centroamérica, poniendo en riesgo los servicios ecosistémicos, la seguridad alimentaria y el bienestar social (Imbach *et al.*, 2017; Taylor *et al.*, 2018).

Frente a esto, la adaptación al cambio climático de los sistemas socioecológicos es crucial para contrarrestar los efectos cada vez más graves (Masson-Delmotte *et al.*, 2021) que impactan a las comunidades y los ecosistemas de los que dependen sus medios de vida (Turner *et al.*, 2022). Lansing (2003) define la adaptación como un proceso dinámico y a largo plazo, que implica la toma de decisiones de manera continua y repetida. Este proceso de ajuste ante el clima actual o esperado y sus efectos (IPCC, 2022a), busca aliviar o moderar los impactos de los fenómenos meteorológicos extremos y aprovechar nuevas oportunidades (Di Fant *et al.*, 2025; IPCC, 2022d; Schipper, 2020). De esta forma, se asegura que las estrategias de adaptación sean efectivas a perpetuidad, abordando tanto los desafíos actuales como las condiciones cambiantes en el futuro, caracterizadas por una alta incertidumbre (Engle *et al.*, 2014; Turner *et al.*, 2022; Yousefpour & Hanewinkel, 2016).

Dentro de estas estrategias de adaptación se encuentran las soluciones basadas en naturaleza (SbN), definidas como la capacidad que tienen los ecosistemas de proporcionar servicios y mantenerlos, de modo que beneficien la calidad de vida de las poblaciones presentes y futuras (Ballesteros & Pérez, 2016; MEA, 2005b). Estas soluciones aprovechan procesos ecológicos para mitigar impactos y, al mismo tiempo, proveer cobeneficios, como la conservación de biodiversidad, la regulación hídrica, la protección costera y la seguridad alimentaria (Cohen-Shacham *et al.*, 2016; Seddon *et al.*, 2020). De esta forma, tienen el potencial para fortalecer la resiliencia y reducir la vulnerabilidad (Chausson *et al.*, 2020; Seddon *et al.*, 2020), contribuyendo a la adaptación al cambio climático en el corto, mediano y largo plazo (Turner *et al.*, 2022).

Sin embargo, las decisiones de adaptación enfrentan retos estructurales asociados a a) la incertidumbre climática y socioeconómica que dificulta prever con precisión la magnitud de fenómenos como sequías, inundaciones o fluctuaciones de mercado, lo que obliga a tomar decisiones flexibles y ajustables en el tiempo (Haasnoot *et al.*, 2013); b) la temporalidad para generar beneficios inmediatos y a largo plazo y su aplicación a escalas múltiples desde lo local hasta lo regional (Seddon *et al.*, 2020); c) la complejidad socioecológica, en la cual una acción en los sistemas naturales puede influir en los sistemas humanos y viceversa (Folke *et al.*, 2010); y, finalmente, d) el momento de implementación y la duración de su efectividad (Haasnoot *et al.*, 2013; Haasnoot, Warren, *et al.*, 2019; Kwadijk *et al.*, 2010). Por lo que, identificar acciones de adaptación es un reto para los actores clave y tomadores de decisión (Cradock-Henry *et al.*, 2020).

El enfoque de rutas de adaptación pretende atender estos desafíos, mediante el desarrollo de secuencia de medidas que pueden implementarse progresivamente en el tiempo dependiendo de las dinámicas futuras (Werners *et al.*, 2021), en un contexto de planificación adaptativa frente a la incertidumbre y el cambio (Barnett *et al.*, 2014; Cradock-Henry *et al.*, 2018; Haasnoot *et al.*, 2013). Inicialmente, los enfoques para desarrollar rutas de adaptación asumían objetivos constantes y un único horizonte de planificación (Haasnoot *et al.*, 2012; Ranger *et al.*, 2013). Más recientemente, el enfoque incluye la identificación de umbrales de cambio y disparadores, la determinación de planes de contingencia, el monitoreo de planes adaptativos y el desarrollo de rutas con actores locales, que permiten tomar decisiones conforme evolucionan las condiciones ambientales y sociales (Cradock-Henry *et al.*, 2020; Haasnoot *et al.*, 2013). El enfoque de rutas de adaptación ha sido aplicado en diferentes contextos, algunos ejemplos incluyen regiones costeras expuestas al incremento del nivel del mar e inundaciones (Barnett *et al.*, 2014; Stephens *et al.*, 2018), regiones con bosques montanos propensos a incendios forestales (Colloff *et al.*, 2016) y regiones agrícolas en espera de que se vuelvan más cálidas y experimenten períodos secos y sequías regulares (Cradock-Henry *et al.*, 2020; Prober *et al.*, 2017).

La cuenca del Monkey River alberga ecosistemas de bosques de hoja ancha, sabanas y manglares; cuenta con población garífuna, criolla, mestiza y pueblos indígenas, quienes se encuentran en condiciones de vulnerabilidad como consecuencia del cambio climático, al estar expuestos a eventos como sequías, inundaciones e incrementos del nivel del mar. Esto impacta sus medios de vida y limita sus capacidades de adaptación ante un escenario de aumento de eventos climáticos extremos. Debido a que esta región se caracteriza como un punto crítico de vulnerabilidad climática (Cepal, 2018; Imbach *et al.*, 2017), las rutas de adaptación se presentan como una estrategia para abordar esta problemática, además de aplicar el enfoque en un contexto con múltiples amenazas climáticas y no climáticas, donde las comunidades dependen de los medios de vida y los servicios que brindan los ecosistemas.

De acuerdo con lo antes expuesto, el presente estudio construye y valida una metodología para el desarrollo de rutas de adaptación al cambio climático, con énfasis en soluciones basadas en naturaleza, con el objetivo de reducir la vulnerabilidad del sistema socioecológico en la cuenca del Monkey River en Belice. Para esto, se plantean los siguientes objetivos específicos: 1) caracterizar los componentes de la vulnerabilidad del sistema socioecológico frente al cambio climático, 2) identificar y evaluar respuestas de adaptación y 3) diseñar rutas de adaptación al cambio climático basadas en la naturaleza.

2. METODOLOGÍA

2.1. Marco teórico

2.1.1. Vulnerabilidad de los sistemas socioecológicos

Un sistema sociecológico (SES) está definido como una red integrada de ecosistemas y sociedad humana que interactúan de forma continua (Folke *et al.*, 2005). Esta definición enfatiza que los sistemas ecológicos y las sociedades humanas coevolucionan y retroalimentan mutuamente, compartiendo recursos, fuerzas de cambio y límites ambientales (Folke *et al.*, 2010; Ostrom, 2007). Los servicios ecosistémicos se entienden como los beneficios que las personas obtienen de los ecosistemas, tipificados, por lo general, en cuatro categorías: provisión, regulación, soporte y

culturales; y que constituyen los vínculos entre la base ecológica y el bienestar humano (IPBES, 2019; MEA, 2005a). Estos servicios sustentan los medios de vida de las comunidades, que son las capacidades, activos y actividades que las personas realizan para satisfacer sus necesidades básicas (Imbach, 2016; Imbach *et al.*, 2015; Stewart, 2006).

El Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) (2014) define la vulnerabilidad como el grado de susceptibilidad o incapacidad de un sistema para enfrentar los efectos adversos del cambio climático, así como la variabilidad climática y los fenómenos extremos. La vulnerabilidad de un sistema está determinada por la interacción de la exposición (presencia del sistema donde hay una variable climática), la sensibilidad (predisposición en que un sistema resulta afectado por la variable climática) y la capacidad adaptativa (habilidad de un sistema para enfrentar los impactos adversos) (IPCC, 2001, 2007).

El marco de capitales presentado por Flora *et al.* (2016) ofrece una visión integral de los recursos sobre los cuales se sustenta dicha capacidad. Los siete capitales: natural, humano, social, financiero, político, cultural y construido interactúan de manera dinámica, generando sinergias que permiten a las comunidades anticipar, responder y reorganizarse frente a perturbaciones climáticas. Bajo este marco, Bouroncle *et al.* (2017) estima la capacidad adaptativa a través de tres condiciones clave: 1) la satisfacción de necesidades básicas, 2) la disponibilidad de recursos para la innovación y 3) la capacidad de transformar esas innovaciones en acciones concretas.

2.1.2. Identificación y evaluación de medidas de adaptación

Las soluciones basadas en naturaleza (SbN), son un conjunto de acciones realizadas con la naturaleza por y para las personas para proteger, restaurar y manejar sosteniblemente ecosistemas naturales o modificados, buscando abordar desafíos sociales y brindando beneficios para el bienestar humano y para la biodiversidad (Cohen-Shacham *et al.*, 2019; Palomo *et al.*, 2021; Seddon, 2022; Turner *et al.*, 2022). La Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN, por sus siglas en inglés) clasifica las SbN en tres tipos principales, según el grado de intervención humana y el estado del ecosistema: 1) acciones de conservación y protección, 2) acciones de gestión sostenible y 3) acciones de restauración o creación de ecosistemas (Cohen-Shacham *et al.*, 2016). A través de la protección, restauración y gestión, las SbN operan sobre los ecosistemas para sostener e incrementar los servicios ecosistémicos y, al actuar, a través de mecanismos, en la interfaz del sistema social y el ecosistema, se presentan como medidas de adaptación con el potencial de reducir la vulnerabilidad socioecológica (Chausson *et al.*, 2020; Key *et al.*, 2022; Seddon *et al.*, 2020).

Por ejemplo, la restauración de un ecosistema nativo, puede mejorar los servicios de regulación (protección costera) al actuar como barreras naturales frente a inundaciones, tormentas, erosión o incendios (Chausson *et al.*, 2020; Narayan *et al.*, 2016), a su vez que mitiga los impactos de inundaciones, sequías y deslizamientos de tierra, a través de mecanismos de infiltración y almacenamiento de agua (Ruangpan *et al.*, 2020; Seddon, 2022).

Asimismo, la implementación de sistemas agroforestales, refuerza los servicios de provisión (agua y alimentos) al sustentar o aumentar los rendimientos de cultivos en climas más secos o impredecibles (Kay *et al.*, 2019; Kuyah *et al.*, 2019; Seddon, 2022). Simultáneamente, mitiga los impactos de sequías y pérdida de cultivos, a través de mecanismos que regulan el agua mediante la mejora de infiltración, evapotranspiración y reducción de escorrentía (Cohen-Shacham *et al.*, 2016; Santos, 2025). Además, las SbN se apoyan y potencian el conocimiento y las prácticas

locales y, cuando son codiseñadas con las comunidades y diversos actores, fortalecen el aprendizaje social y la capacidad de innovar y adaptarse frente a condiciones cambiantes (IPCC, 2022b; Seddon, 2022; Woroniecki *et al.*, 2022).

2.1.3. Diseño de rutas de adaptación

Es poco probable que exista una sola medida de adaptación; en la mayoría de casos, será necesario implementar un conjunto de acciones para lograr los objetivos deseados, por lo que se requieren enfoques que permitan la adaptabilidad frente a las condiciones cambiantes (Cradock-Henry *et al.*, 2020; Werners *et al.*, 2021). Así surgen las rutas de adaptación como una secuencia de medidas, donde cada acción se activa cuando la anterior deja de cumplir con los objetivos deseados y se necesitan acciones adicionales, permitiendo a los tomadores de decisión explorar opciones para adaptarse a las condiciones ambientales y sociales cambiantes (Haasnoot *et al.*, 2012, 2013).

La base de las rutas de adaptación es un proceso secuencial de identificación de impactos, evaluación y secuencia de medidas a lo largo del tiempo (Kwakkel *et al.*, 2016). Los impactos se obtienen de las proyecciones climáticas que modelan el clima futuro y exploran los posibles impactos y repercusiones del cambio climático. De este modo, favorecen la caracterización de los cambios en variables climáticas clave, como temperatura y precipitación y sus repercusiones en productividad, por ejemplo (Cradock-Henry *et al.*, 2020).

Esta información es útil en la construcción de escenarios, ya que aporta en el proceso de planificación adaptativa y en la anticipación de futuros inciertos, según lo mencionan Cradock-Henry *et al.* (2020), IPCC (2014, 2022) y Vervoort *et al.* (2014). El uso de escenarios contrastantes permite explorar la gama de futuros posibles bajo condiciones de incertidumbre climática, ampliando el rango de análisis y facilitando la identificación de estrategias robustas; es decir, que funcionen en múltiples contextos posibles (Haasnoot *et al.*, 2013; Werners *et al.*, 2021). De esta manera, los escenarios no buscan predecir el futuro, sino fortalecer la capacidad de anticipación y aprendizaje del SES frente a trayectorias climáticas cambiantes.

Las medidas responden al abanico de impactos actuales y futuros (Cradock-Henry *et al.*, 2020), se mantienen flexibles y se revisan en respuesta a alertas determinadas antes de alcanzar ciertos umbrales (Cradock-Henry *et al.*, 2020; Prober *et al.*, 2017). Los umbrales indican cambios en el sistema que deben evitarse; estos se apoyan en disparadores observables que señalan cuándo se está a punto de alcanzar un umbral (Cradock-Henry *et al.*, 2020; Haasnoot *et al.*, 2013). La identificación de ambos permite determinar el momento en que una medida de adaptación puede ser implementada. Por ejemplo, el umbral puede estar definido como *el maíz no se desarrolla cuando las temperaturas exceden los 29°C*, entonces el disparador sería *cuando la temperatura promedio excede los 27°C, debe hacerse un cambio de cultivo*. Tanto los umbrales como los disparadores deben incluir variables sociales y no solo condiciones medioambientales, y ser construidas con las partes interesadas (Cradock-Henry *et al.*, 2020).

Dentro del diseño de rutas, la construcción de la visión busca alinear expectativas, valores y conocimientos de los actores para identificar colectivamente los objetivos hacia los cuales orientar las medidas de adaptación (Werners *et al.*, 2021; Wise *et al.*, 2014). Los valores vividos son atributos que la población valora del lugar donde vive (Graham *et al.*, 2014). Dichos valores, que se desean preservar, se asocian a la seguridad, la resiliencia y el bienestar comunitario, la salud y las buenas relaciones sociales (Barnett *et al.*, 2014; Cradock-Henry *et al.*, 2020; MEA, 2005a). La

visión debe ser construida de forma participativa (Wiek & Iwaniec, 2014) con las comunidades, entidades y academia, identificando los desafíos a abordar y los resultados deseados.

2.2. Marco metodológico

La metodología de rutas de adaptación propuesta se basó en un enfoque participativo y de codiseño, orientado a integrar saberes locales, experiencias y fuentes de conocimiento (científico, técnico y local) (Zamora *et al.*, 2025), para comprender las dinámicas presentes en el sistema socioecológico en estudio. Este enfoque une saberes recopilados mediante la cartografía participativa del paisaje y los datos de literatura científica sobre los efectos del clima.

La metodología consta de tres componentes (figura 1): 1) la estructura del sistema socioecológico, sus características y los efectos del cambio climático en este; 2) la identificación y evaluación de medidas de adaptación basadas en la naturaleza y su efecto para reducir los impactos futuros; y 3) el diseño de rutas de adaptación que permitan una planificación frente a escenarios futuros (anexo 1). La metodología integra datos e información cualitativos y cuantitativos, a través de la revisión de la literatura, talleres comunitarios participativos, análisis de datos geoespaciales y climáticos, consultas con expertos y acciones de codesarrollo con las partes interesadas y los responsables de la toma de decisiones, teniendo así una perspectiva conjunta sobre la adaptación al cambio climático. Asimismo, emplea instrumentos como encuestas, mapas participativos, rotafolios y entrevistas.



Figura 1. Marco metodológico de rutas de adaptación al cambio climático

Fuente: Elaboración propia.

2.2.1. Estructura del sistema socioecológico

Este componente incluye la *descripción del contexto*, aquí se definió el área de estudio y se identificaron a los actores de la cuenca (ONG, Gobierno y sector privado) a través de la revisión de informes y reportes elaborados para la zona de estudio, la lista preliminar de actores puede visualizarse en el anexo 1.

La *identificación de medios de vida y servicios ecosistémicos* se llevó a cabo durante talleres participativos empleando rotafolios que incluyeron matrices (anexo 2) donde la información fue

completada con los participantes. Primero, se realizó una lluvia de ideas sobre los medios de vida y ecosistemas presentes en la cuenca. A partir de esta lista, se inició con la caracterización de los medios de vida en términos de uso final, tamaño de producción, área, tenencia de la tierra, generación de ingresos y mercado; así como su importancia en seguridad alimentaria, área cultivada, contribución al desarrollo local, producción amigable con el ambiente e inclusión de mujeres y jóvenes (Zamora *et al.*, 2025).

De manera similar se identificaron los ecosistemas presentes, se especificó su salud en términos de su funcionalidad, se indicaron los medios de vida al que se relacionaban y los servicios ecosistémicos brindados. Una funcionalidad adecuada del ecosistema indica que este brinda una gama completa de servicios ecosistémicos; un ecosistema con funcionalidad moderada, provee algunos servicios, pero ha perdido la capacidad de proveer otros; y una poca funcionalidad indica que la capacidad del ecosistema para brindar servicios está reducida significativamente (MEA, 2005a). La caracterización de los servicios ecosistémicos consideró la provisión, flujo y demanda, condiciones de acceso, estacionalidad y beneficiarios del servicio. Finalmente, se realizó el mapeo de los medios de vida y servicios ecosistémicos.

La *identificación de impactos actuales y futuros* que afectan al sistema (anexo 3) se dio a través de talleres participativos (impactos actuales) y de revisión de literatura (impactos futuros). Los participantes fueron consultados por los eventos climáticos extremos ocurridos desde 1970 a la actualidad (2025) y las afectaciones causadas. Seguido de ello, se identificaron las principales variables climáticas y no climáticas y sus impactos en los medios de vida. Asimismo, se evaluó la magnitud, frecuencia y tendencia de estos. Posteriormente, se consultó sobre las variables subyacentes que impulsan la degradación de los ecosistemas, su tendencia y los ecosistemas afectados. Con las variables climáticas y no climáticas identificadas y mediante una revisión de literatura para Centroamérica y Belice, se sistematizaron las proyecciones futuras bajo escenarios de cambio climático (RCP 4.5, RCP 8.5) al 2050 y 2100, así como los impactos proyectados en agua, agricultura, biodiversidad y suelo, los cuales son componentes clave de los servicios ecosistémicos que sostienen el bienestar humano (MEA, 2005a) y que a su vez son los más vulnerables al cambio climático y críticos para la seguridad humana y ecológica (IPCC, 2022b).

En cuanto a la *evaluación de la capacidad adaptativa*, esta fue basada en tres condiciones clave: satisfacción de necesidades básicas, condiciones para la innovación y capacidades para la innovación en práctica (Bouroncle *et al.* 2017). Se elaboró una encuesta (anexo 4) con preguntas en función a criterios relacionados a cada condición clave (tabla 1), las respuestas fueron transformadas a valores números considerando una escala de 0 a 5, esto permitió analizar la capacidad de respuesta de los productores y sus medios de vida frente a perturbaciones identificando las oportunidades y limitaciones presentes.

Tabla 1. Condiciones y criterios de capacidad adaptativa

Condiciones	Criterios
Necesidades básicas	Seguridad alimentaria y salud Agua, saneamiento e higiene Vivienda y energía Educación Seguridad
Innovación	Disposición a cambiar

	Infraestructura Asistencia técnica Mercado Organización Medios
Acción	Mano de obra Finanzas Insumos

Fuente: Bouroncle et al. (2017).

2.2.2. Identificación y evaluación de medidas de adaptación

La sistematización de medidas de literatura constó de una recopilación de medidas de adaptación que incluyeron soluciones basadas en la naturaleza, provenientes de literatura científica y de experiencias de adaptación en contextos similares. La búsqueda fue guiada por la pregunta: ¿cuáles son las acciones que implican la gestión, restauración o protección/conservación de la biodiversidad, ecosistemas y sus servicios ecosistémicos, y el desarrollo local o indígena, y que contribuyan a mitigar los impactos de los eventos climáticos y no climáticos, a la vez que generan beneficios sociales y económicos?

Esta lista se empleó como guía para la identificación de medidas (anexo 5); primero, durante el taller con comunidades se empleó un rotafolio para colectar posibles medidas de adaptación frente a los impactos previamente identificados. Posteriormente, mediante entrevistas con actores del Gobierno y ONG y, empleando la data de impactos futuros, se preguntó ¿cuáles eran las posibles respuestas o medidas de adaptación en las que ya se estaba trabajando o en las que se podría trabajar para reducir los impactos del cambio climático?, y la ubicación geográfica donde se implementarían las medidas.

La evaluación de medidas se dio a través de conocimiento experto (ver lista de expertos en anexo 6). Empleando la lista de SbN previa y una guía de preguntas (anexo 7), se evaluó el potencial de una medida para contribuir a la mitigación de cierto impacto futuro. Los criterios fueron: 1) reducción de producción, 2) reducción de agua, y 3) erosión de suelo, ligados a los componentes clave de los servicios ecosistémicos (agua, agricultura, biodiversidad y suelo). La magnitud del efecto que tenía la medida para reducir cierto impacto futuro del cambio climático y el nivel de confianza o certeza asociado a esa valoración se cuantificaron bajo una escala Likert ampliamente utilizada en la medición de percepciones y actitudes (Likert, 1932; Joshi et al., 2015). Las escalas fueron de 1. Bajo (0 - 30%), 2. Medio (30 - 70%), 3. Alto (70 - 100%), (-) Efecto negativo y (o) No hay efecto, para la magnitud del efecto; y de 1. Confianza Baja (< 50%), 2. Confianza Media (50%), 3. Confianza Alta (> 50%), para el nivel de confianza.

Adicionalmente, a través de revisión de literatura y tomando la lista de SbN, se identificaron los mecanismos que emplean las SbN para mitigar los impactos de sequías, inundaciones e incremento del nivel del mar y mantener la provisión de servicios ecosistémicos. Finalmente, se evaluaron todas las medidas en términos de la fecha de caducidad o duración de la medida de 1. 0 a 5 años, 2. 5 a 15 años, 3. más de 15 años; la magnitud de los costos considerando 1. costo bajo (+), 2. costo medio (++) y 3. costo alto (+++), así como los aspectos técnicos para la implementación a través de las preguntas: 1) ¿qué instituciones están involucradas en la implementación de la medida? (1. Gobierno, 2. ONG, 3. comunidades, 4. sector privado, 5. investigación/academia); 2) ¿se cuenta

con un marco político existente para aplicar y gestionar la medida? (1. política existente, 2. política en desarrollo, 3. no hay política); y 3) ¿qué recursos se necesitan para aplicar y gestionar la medida? (1. físico, 2. financiero, 3. tecnológico, 4. humano, 5. tenencia de la tierra).

2.2.3. *Diseño de rutas de adaptación*

El tercer componente incluye el *diseño de la visión* o estado deseable en el futuro, el cual emplea la descripción del contexto socioecológico y climático obtenido del componente uno, sumado a los valores vividos, obtenidos a partir de la pregunta: ¿qué valora la población de la comunidad y de la cuenca, y de lo que les brinda? Luego, guiados con la pregunta: ¿cuáles son las aspiraciones que tienen las comunidades de la cuenca a lograr en el futuro? A partir de esta información, se podrá definir los desafíos actuales y futuros de la cuenca considerando un horizonte de tiempo donde se espera lograr esa visión; por ejemplo, en los próximos veinticinco o cincuenta años (anexo 8).

Para el *desarrollo de escenarios* se empleó la información de las variables climáticas y no climáticas, así como de los impactos futuros colectados en el componente uno, con lo cual se construyeron dos escenarios diferenciados: moderado (RCP 4.5) y extremo (RCP 8.5), reflejando diferentes niveles de presión climática. Con esta información, se procedió a la *identificación de umbrales y disparadores* que alerten cuando se está por alcanzar el umbral, a fin de prepararnos para activar la siguiente medida antes de que el sistema cambie.

La definición del umbral responde a la pregunta ¿en qué punto el sistema cambia de manera significativa y, por lo tanto, debe evitarse? Mientras que el disparador responde a ¿en qué punto se produce un cambio en las condiciones que da lugar a un cambio de medida?, ¿qué impactos son inaceptables para los medios de vida y la población, ya que tienen repercusiones perceptibles? Estas repercusiones pueden traducirse en impactos con valores específicos; por ejemplo, en ingresos, producción o infraestructura y que la población considere afecta su bienestar (anexo 9).

Finalmente, en el *diseño de rutas*, las medidas fueron concatenadas siguiendo una secuencia lógica y ordenada de modo temporal considerando la urgencia de las acciones, la fecha de caducidad y las posibles transferencias a otras medidas para extender su duración y, además, buscando mantenerlas abiertas ante los impactos que puedan afectar el sistema. La información construida en el componente tres (escenarios, umbrales, disparadores y mapa de rutas) será validada en espacios participativos para asegurar su coherencia y relevancia local con las partes interesadas, así también la selección de un abanico de rutas posibles a aplicar, destacando que estas son herramientas de planificación flexibles y ajustables en el tiempo.

3. RESULTADOS

El estudio se desarrolló en el marco del proyecto Refores-*Uso de soluciones basadas en la naturaleza para aumentar la resiliencia ante fenómenos climáticos extremos en la región atlántica de América Central*, el cual busca fortalecer la resiliencia climática de las comunidades y los ecosistemas de la región costera atlántica de Belice, Honduras y Guatemala que se ven directamente afectados por la intensificación de los fenómenos climáticos debido al cambio climático.

3.1.Estructura del sistema socioecológico de la cuenca del Monkey River

Los resultados del primer componente se muestran de manera secuencial. Se inicia con la descripción del contexto que delimita el área de estudio, las condiciones biofísicas y socioeconómicas. Posteriormente, se presentan los principales medios de vida, ecosistemas y servicios ecosistémicos, observando la dinámica de dependencia entre sociedad y ambiente. Luego, se identifican los impactos actuales y futuros del cambio climático que afectan a los servicios ecosistémicos y, por ende, a los medios de vida. Adicionalmente, se muestran los resultados de la evaluación de la capacidad adaptativa evidenciando los recursos y necesidades para hacer frente a los impactos. Finalmente, la síntesis de la información generada permite comprender la dinámica del SES y sentar la base para la identificación de medidas y diseño de rutas de adaptación.

3.1.1. Descripción del contexto

La cuenca del Monkey River se sitúa en el sur de Belice en el distrito de Toledo. Nace en las Montañas Mayas y desemboca en el mar Caribe cerca de la comunidad de Monkey River (Esselman, 2001). Cubre un área que supera las 341 000 hectáreas y sus principales afluentes son el río Swasey y río Bladen (figura 2).

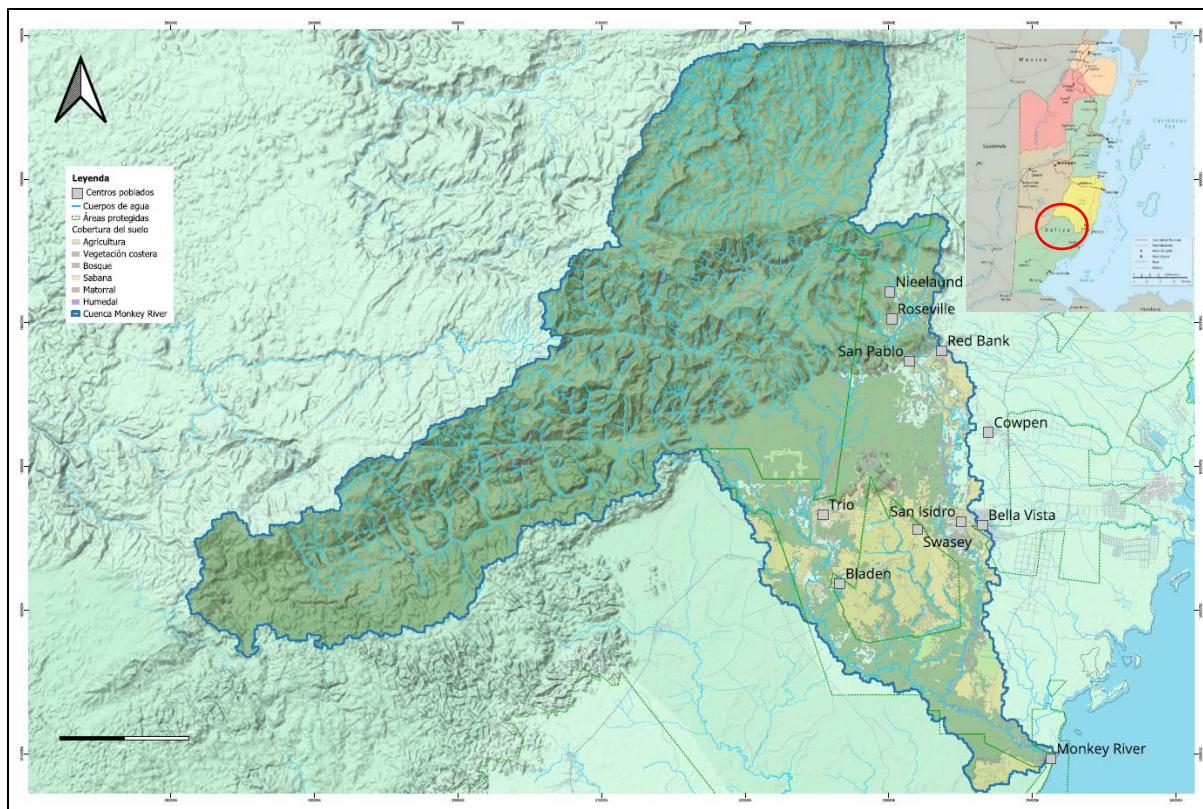


Figura 2. Mapa de área de estudio de la cuenca del Monkey River

Fuente: Elaboración propia.

Características biofísicas

El área de estudio está entre los 0 y 1135 ms. n. m. y la pendiente varía entre un 0 % y un 240 %. El 77 % de la cuenca tiene algún nivel de protección, albergando 14 áreas protegidas entre parques y reservas nacionales. En cuanto a los usos de suelo, 117 353 hectáreas son tierras forestales (bosques de hoja ancha y bosques de pino), seguidos de 15 248 hectáreas de tierras de cultivo, 11 837 hectáreas de sabana y poco más de 4000 hectáreas entre pastizales, humedales, cuerpos de agua y asentamientos. El clima es tropical con temperaturas promedio de 28°C y precipitaciones que superan los 300 mm en los meses de junio y octubre, y por debajo de 100 mm en la temporada seca de febrero a abril. La precipitación es variable de un año a otro (según análisis con datos CHIRPS y CHIRTS) (Funk *et al.*, 2015).

Características socioeconómicas

Dentro de la cuenca se encuentran 8 comunidades (Red Bank, San Pablo, Cowpen, Bella Vista, San Isidro, Trio, Bladen y Monkey River) que albergan 14 447 habitantes, un 51.1 % son varones y 48.9 % son mujeres, y habitan 3652 hogares (SIB, 2022); ubicadas en la cuenca media (Red Bank, San Pablo, San Isidro, Bella Vista, Cow Pen, Trio y Bladen) y cuenca baja y zona costera (Monkey River).

Se encuentra una población sustancial de garífunas, comunidades criollas y mestizas, incluidos pueblos indígenas Y'axche y Q'eqchi Maya, quienes en su mayoría laboran en fincas bananeras o en construcción, además de realizar agricultura de subsistencia, principalmente de cultivo de maíz (cuenca media) para autoconsumo, pesca y turismo (cuenca baja). La cuenca del Monkey River enfrenta sequías e inundaciones, así como deforestación y degradación, principalmente por expansión agrícola bananera, tala ilegal y extracción de arena no regulada, lo que ha generado conflictos por tierras y pérdida de hábitat.

La erosión costera y fluvial amenaza la seguridad y los medios de vida de las comunidades de la cuenca media y baja. Hay pérdida de patrimonio cultural y limitado apoyo gubernamental, con altos costos asociados a las soluciones. La industria bananera ha tenido impactos ambientales desde 2010, sin asumir plenamente su responsabilidad. La tabla 2 lista a los actores relacionados a la cuenca del Monkey River entre comunidades (que habitan la cuenca), ONG (que realizan acciones en el ámbito de la cuenca y cuentan con oficinas), instituciones del Gobierno (con oficinas en la ciudad de Belmopan) y sector privado (cuyas áreas agrícolas están ubicadas en el ámbito de la cuenca).

Tabla 2. Actores en la cuenca del Monkey River

Sector	Entidad
Comunidades	<ul style="list-style-type: none"> • Cuenca media: Trio, Bladen, San Isidro, Bella Vista, San Pablo, Cowpen, Red Bank • Cuenca baja: Monkey River
ONG	<ul style="list-style-type: none"> • Ya'axche Conservation Trust (YCT) • Toledo Institute for Development and Environment (TIDE)
Gobierno	<ul style="list-style-type: none"> • Ministry of Agriculture, Food Security and Enterprise (MAFSE) • Belize Agricultural Health Authority (BAHA) • Belize Livestock Producers Association (BLPA) • Fores Department • National Biodiversity Office (NBIO)

	<ul style="list-style-type: none"> • Department of hydrology • National Emergency Management Organization (NEMO) • Mining Department • Ministry of Infrastructure Development & Housing (MIDH) • Belize Trade and Investment Development Service (BELTRAIDE) • Development Finance Corporation Belize (DFC)
Sector privado	<ul style="list-style-type: none"> • Banana Growers Association (BGA) • Fyffes-PMS

3.1.2. *Medios de vida, ecosistemas y servicios ecosistémicos*

Los medios de vida principales presentes en la cuenca del Monkey River están ligados a la agricultura (en siete de las ocho comunidades), donde la producción de maíz y frijol es la base en las siete comunidades de la cuenca media en combinación con cultivos como la piña, naranja, cacao yuca, banano, chile habanero, plátano y hortalizas. Asimismo, algunas comunidades se dedican a la ganadería vacuna, el turismo y la pesca (en la comunidad de Monkey River) (tabla 3). Todos los miembros de la familia participan en la producción agrícola, tanto hombres como mujeres, quienes dirigen las labores y, durante la preparación de la tierra, siembra, limpieza y cosecha, se involucran los jóvenes y niños. Aunado a esto, las comunidades tienen un trabajo asalariado en las fincas bananeras, en las cuales se observa grandes extensiones de cultivo de banano ubicadas cerca de los ríos Swasey y Bladen, así como plantaciones de coco cerca del río Monkey River.

A diferencia de las fincas bananeras, la producción agrícola de las comunidades se da a escala pequeña en su mayoría (área varía en función del medio de vida) en tierras rentadas por el Gobierno con excepción de Red Bank y Bladen, que poseen tierra comunal designada por el líder. Los granos básicos se producen a pequeña escala (1 a 2 acres) y son cultivos de subsistencia destinados para el autoconsumo de las familias. Los frutales como la piña y naranja se producen en áreas de 30 acres en promedio, el plátano en áreas menores a 15 acres al igual que el chile habanero (vendido a la empresa Marie Sharp) y las hortalizas, que son fuente de ingresos extras para las familias.

La venta está destinada al mercado local y nacional principalmente y una pequeña parte para exportación (naranja y piña). En los años recientes, las plagas que afectan la naranja han generado el cambio a frutales como la piña, cuyo incremento en producción está considerando la instalación de sistemas de riego y preparación de suelo; así también en Trio se han implementado sistemas agroforestales con cacao a pequeña escala en áreas entre 1 a 10 acre, la venta está destinada al mercado local y exportación.

Tabla 3. Medios de vida principales presentes en las comunidades de la cuenca del Monkey River

Comunidad	Medio de vida			
	Agricultura	Ganadería vacuna	Turismo	Pesca
Red Bank	Maíz y frijol, habanero		X	
San Pablo	Maíz, frijol y plátano, yuca			
Cow Pen	Maíz, frijol, chile habanero y vegetales, frutales			

San Isidro	Maíz, frijol, plátano, vegetales, yuca y cacao			
Bella Vista	Maíz y frijol			
Trio	Maíz, frijol y piña, cacao, plátano	X		
Bladen	Maíz, frijol y plátano, frutales	X		
Monkey River			X	X

La ganadería está presente en las comunidades de Trio, Bladen, Cow Pen y una minoría en Red Bank; el mayor porcentaje se maneja a pequeña escala (en promedio 30 cabezas en áreas de 30 a 60 acres) y una minoría a gran escala (más de 100 cabezas). El ganado se ubica cercano a los ríos Bladen y Swasey de donde obtienen agua, así como de lagunas cuando el río se seca. La alimentación es a través de pasto natural y *Brachiaria humidicola* en las áreas de sabanas con prácticas de rotación de potreros. Cow Pen incluso ha implementado la siembra de semillas de grass como *Brachiaria brizantha*. Y en ciertas zonas ganaderas se ha plantado la especie *Gliricidia sepium* “madre cacao”, árbol fijador de nitrógeno y que se emplea como cerca viva, leña y como alimento para animales.

En cuanto a la tenencia de la tierra, entre el 80 y 90 % de la tierra está bajo arriendo con pago al Gobierno y el restante es privado. Si bien la ganadería no tiene como objetivo el comercio, sino más bien la ocupación de terrenos para indicar propiedad privada, cuando se realiza una venta esta se destina para exportación al mercado internacional (a través de un intermediario) y una minoría para el mercado local y nacional, así como para el autoconsumo.

El turismo está presente en las comunidades de Monkey River y Red Bank, y es el principal medio de vida de la primera, que recibe el 90 % de los turistas que visitan Placencia durante los meses de noviembre a marzo. En Monkey River, los hombres guían actividades turísticas como la observación de manatíes y aves, mientras que las mujeres gestionan pequeños restaurantes y tiendas de artesanías. En Red Bank, el turismo se viene impulsando y se busca crear un centro de bienvenida y la propuesta de un corredor biológico que preserve la especie *Ara macao cyanoptera* “guacamaya escarlata”, que se avista durante los meses de noviembre a marzo.

La pesca en Monkey River es para autoconsumo y venta, a través de la extracción de langosta y pargo, actividad que se concentra durante los meses de noviembre a marzo. Finalmente, años atrás también se realizaba pesca en Trio, pero en la actualidad existe la percepción local de que la sobreexplotación de la pesca de peces ha limitado su disponibilidad para el consumo.

La tabla 4 muestra los principales ecosistemas, servicios ecosistémicos y los medios de vida a los que están relacionados. El bosque de hoja ancha ubicado en la cuenca alta mantiene una funcionalidad adecuada, mientras que el bosque ribereño (cuenca media), sabana, bosque litoral y ríos (Bladen, Swasey y Monkey River) fueron clasificados como poco funcionales en términos de salud del ecosistema.

Las comunidades de la cuenca dependen de los servicios que le brinda el ecosistema (tabla 4); es así que el bosque ribereño provee de madera y leña que se emplea para cocinar, de alimentos a través de la caza de animales silvestres, así como de plantas medicinales para remedios caseros y que forman parte de su herencia cultural. De la misma forma, junto con el bosque litoral, brindan

servicios culturales de turismo, recreación y belleza escénica, y conservación de la biodiversidad en áreas aledañas a Red Bank y Monkey River.

La sabana provee de alimentos a través de la agricultura, que brinda seguridad alimentaria a la población; de la caza de subsistencia, practicada en Monkey River; al ganado a través de pastos naturales y plantados en el área; y es fuente de agua subterránea (del acuífero Savannah Province (UNDP, 2014)), que es extraída a través de pozos ubicados en las comunidades. El bosque litoral brinda el servicio de regulación de la erosión costera, con lo cual protege de inundaciones a la población e infraestructura de Monkey River.

Los ríos Swasey y Bladen proveen de agua al ganado, agua para riego (junto con el río Monkey River) a las fincas bananeras ubicadas en la margen de estos, así como agua para actividades domésticas (lavado de ropa, vajilla y utensilios de cocina) y recreativas (servicios culturales). El mar es fuente de alimentos para el pueblo de Monkey River a través de la pesca artesanal y es el acceso para los turistas que provienen de Plascencia, haciendo que este ecosistema y los servicios que le provee sean trascendentales para los pobladores (figura 3).

Tabla 4. Ecosistemas, servicios ecosistémicos y medios de vida relacionados presentes en la cuenca del Monkey River

Servicio ecosistémico	Ecosistema	Beneficio	Medio de vida	Beneficiarios
Provisión	Bosque ribeñero	Provisión de productos maderables y no maderables		Todas las comunidades
		Provisión de agua	Ganadería Agricultura	Red Bank, San Pablo, Cowpen, Bella Vista, San Isidro, Trio, Bladen
Cultural		Servicios culturales y biodiversidad	Turismo	Red Bank
Provisión	Sabana	Provisión de agua para consumo y alimentos	Ganadería Agricultura	Red Bank, San Pablo, Cowpen, Bella Vista, San Isidro, Trio, Bladen
Regulación	Bosque litoral	Regulación de erosión costera		Monkey River
Cultural		Servicios culturales y biodiversidad	Turismo	Monkey River
Provisión	Río	Provisión de agua	Ganadería Banano	Red Bank, San Pablo, Cowpen, Bella Vista, San Isidro, Trio, Bladen
Provisión	Mar	Provisión de alimentos	Pesca Turismo	Monkey River

Los servicios ecosistémicos contribuyen al bienestar de las comunidades a lo largo del año, pero suelen disminuir durante la época seca de febrero a mayo. La provisión de agua subterránea se mantiene constante durante todo el año; sin embargo, los pobladores perciben que durante la época

seca se han visto afectados por la reducción de lluvias y las sequías, y por incrementos en la demanda debido al aumento de población.

De igual modo, la extracción de agua de los ríos para el riego de fincas bananeras ha reducido la disponibilidad del recurso para el ganado y alterado el flujo en cuanto a la cantidad disponible. En cuanto a la extracción de arena, la percepción de las comunidades es que la actividad limita el transporte de sedimentos río abajo, necesarios para restaurar la playa naturalmente y proteger al pueblo de Monkey River de la erosión costera.

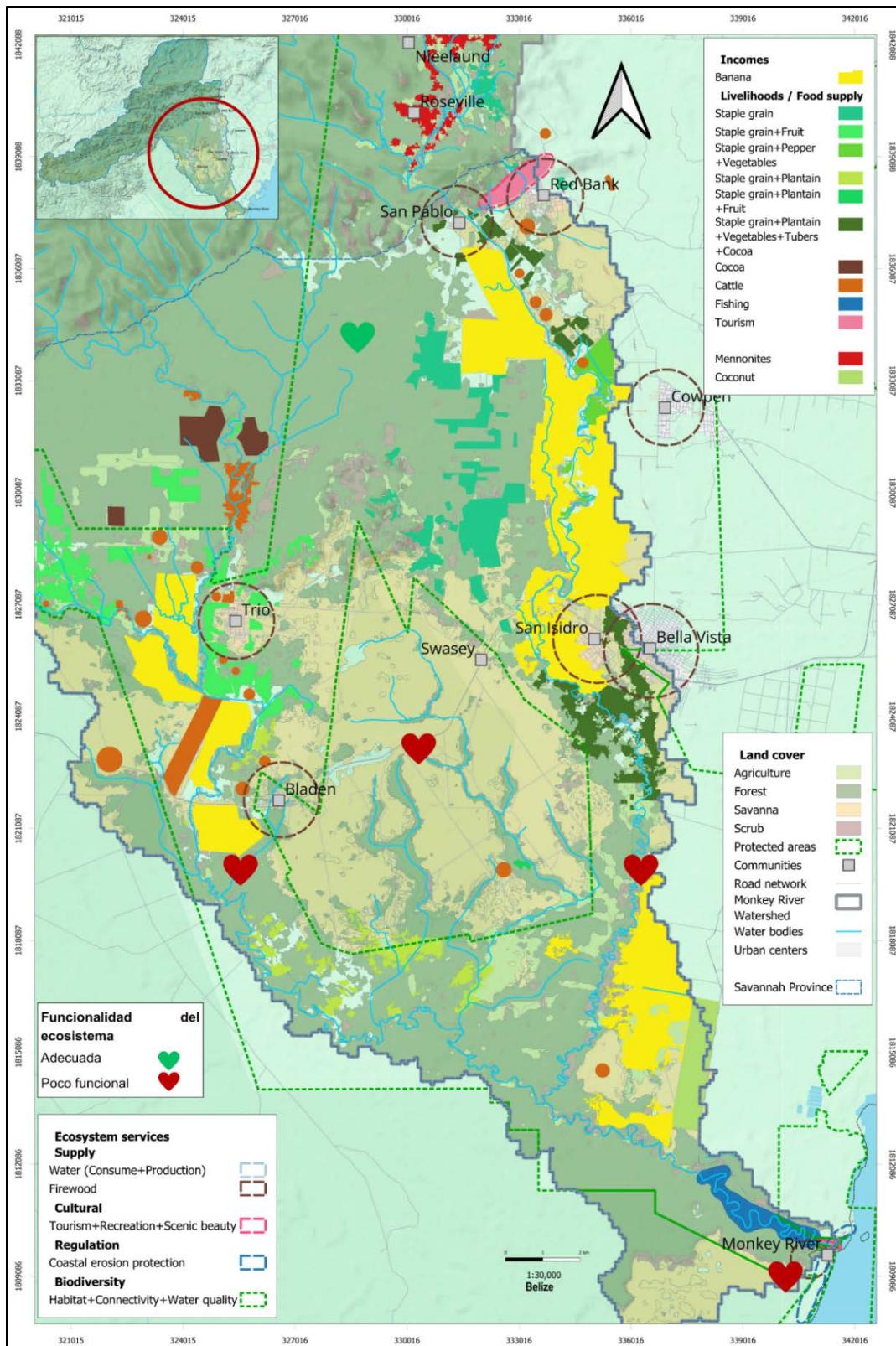


Figura 3. Medios de vida y servicios ecosistémicos presentes en la cuenca del Monkey River

Fuente: Elaboración propia.

3.1.3. Impactos climáticos actuales y futuros

Impactos actuales

A través de una línea de tiempo, los participantes mencionaron los eventos climáticos ocurridos desde 1970 a la actualidad (figura 4). Los huracanes, tormentas, inundaciones, así como los eventos de evolución gradual como las sequías son eventos frecuentes en el paisaje como se observa en la figura 4. La ocurrencia de huracanes y tormentas generaron fuertes vientos, lluvias e inundaciones en diferentes partes de Belice. Por ejemplo, los huracanes Iris, Iota y Eta provocaron inundaciones fluviales (Swasey y Bladen), pérdida de infraestructura agrícola y, posteriormente, evacuación de personas. Asimismo, durante el año 2024 se dio una gran sequía asociada a la ocurrencia de incendios forestales que causó la pérdida de 300 000 acres de bosques y tierras de cultivo en el distrito de Toledo, lo cual provocó grandes pérdidas económicas a los agricultores.

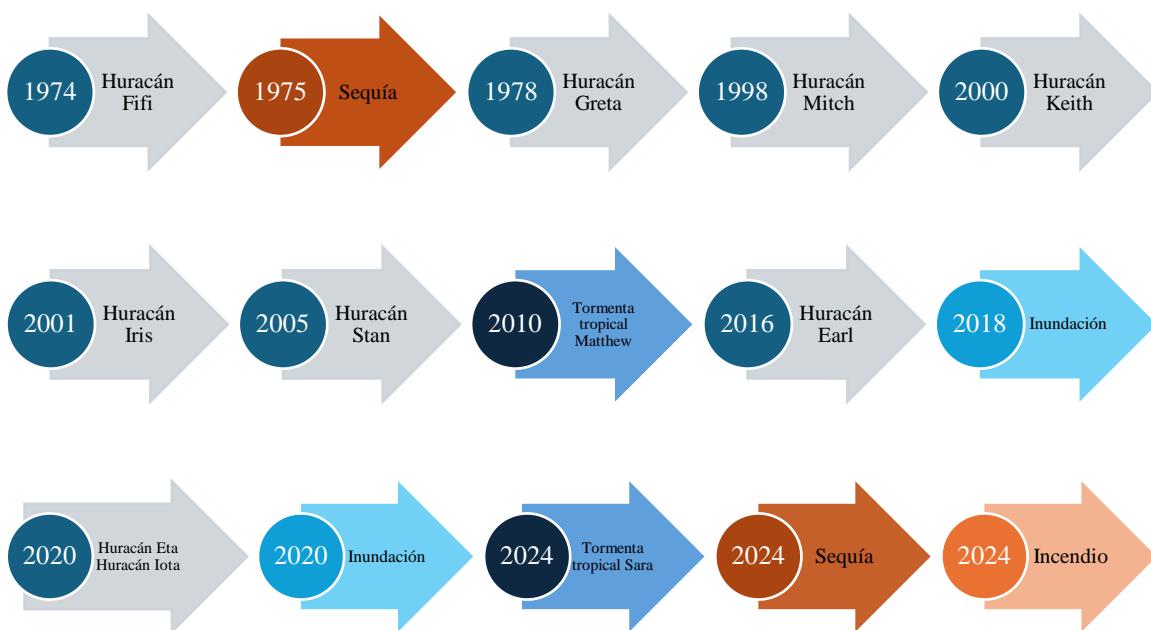


Figura 4. Eventos extremos ocurridos desde 1970 a la actualidad (2025)

Los participantes identificaron eventos como sequías (ocurridas de marzo a junio), incendios e inundaciones que afectaron la provisión de servicios ecosistémicos e impactaron negativamente a los medios de vida, la población y la infraestructura, pues causaron pérdidas en los cultivos y escasez de alimentos. La magnitud de estos eventos es alta al provocar la pérdida de producción de los agricultores, aunque su frecuencia no está determinada.

En cuanto a los impulsores de la degradación, los participantes indicaron que los ecosistemas sufren presiones y reducen su capacidad para brindar servicios, según su percepción, por la deforestación de bosques y tala ilegal en áreas protegidas y zonas ribereñas, impulsada por la expansión agrícola y la extracción de arena, que responde a la demanda del mercado agrícola (producción de banano y coco) y del mercado de la construcción de infraestructura y carreteras (madera y arena). Tales factores han sido percibidos durante más de dos décadas.

La pérdida de biodiversidad, aumento de la erosión del suelo, escasez y reducción de calidad de agua en los ríos son algunos de los impactos identificados por estos eventos frecuentes. Cabe resaltar que la débil aplicación de la normativa en cuanto a la deforestación de bosques (en zonas aledañas a Monkey River) y la protección de las riberas de los ríos (desde Newland hasta Cowpen) agrava el panorama, por lo que la invasión de áreas para establecer cultivos agrícolas y la extracción de madera y arena continúa en ascenso.

La figura 5 muestra la ubicación de eventos climáticos y no climáticos que afectan los ecosistemas, servicios ecosistémicos y medios de vida en la cuenca del Monkey River.

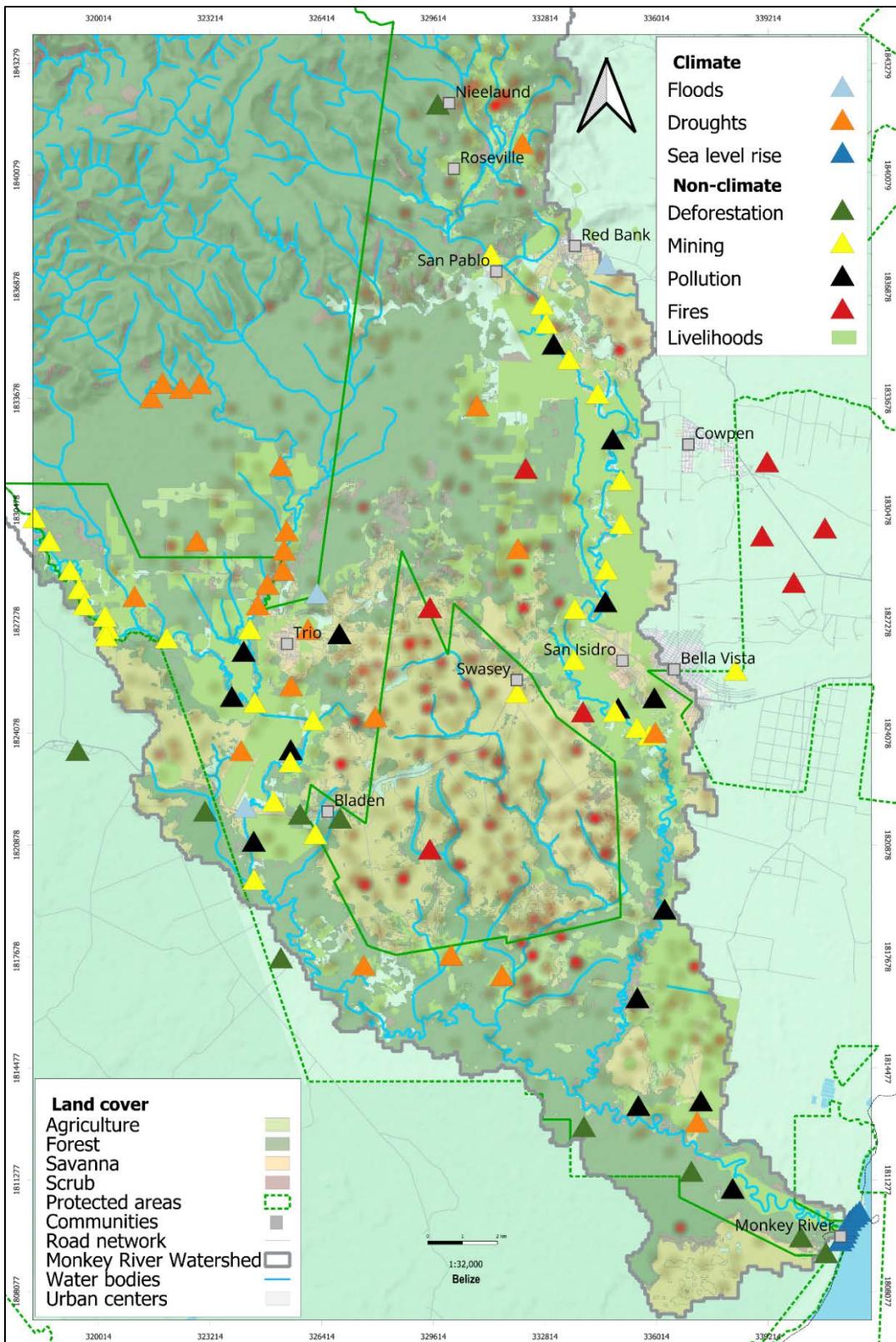


Figura 5. Mapa de eventos climáticos y no climáticos presentes en la cuenca del Monkey River

Fuente: Elaboración propia, datos de incendios de FIRMS (periodo 2020 al 2023).

Impactos futuros

Las proyecciones regionales, sistematizadas para dos escenarios de emisiones RCP 4.5-moderado (tabla 5) y RCP 8.5-extremo (tabla 6), evidencian una tendencia de incremento de temperatura de +2°C a +5°C (Imbach *et al.*, 2018; Lyra *et al.*, 2017) y reducción de precipitación de -5 % a -15 % (Navarro, 2023) hacia mediados y finales del siglo, lo que llevaría a la ocurrencia de sequías más severas y más frecuentes, lluvias más extremas que provocarían inundaciones, e incendios más frecuentes. En cuanto a la provisión de alimentos, los impactos proyectados indican cambios en los rendimientos de cultivos, reducción del 10 % al 2050 (escenario moderado) para el cultivo de maíz que puede llegar a una reducción del 50 % al 2100 (escenario extremo) para el cultivo de frijol (Cepal, 2013). Para el caso del banano, cultivo comercial de exportación y fuente de ingresos para las comunidades, si bien se prevé un aumento en el rendimiento de 0.59 t/ha para el 2050 bajo un escenario moderado, este aumento es menor (0.19 t/ha) bajo un escenario extremo; esto podría ser revertido con la mejora de prácticas agrícolas e inversión en tecnología como infraestructura para riego (Varma & Bebber, 2019). La ganadería también se vería afectada por el estrés hídrico y la reducción de forraje, lo cual ocasionaría que la producción disminuya (Hannah *et al.*, 2017; Hodson de Jaramillo *et al.*, 2023; Meza-Herrera *et al.*, 2022).

La provisión de agua también se vería afectada: las proyecciones indican una reducción de la escorrentía de hasta 60 % en la parte alta de la cuenca al 2050 (Imbach *et al.*, 2012), lo que conllevaría a una reducción de la disponibilidad de agua superficial, mayor presión por sequías y menor recarga de acuíferos. En cuanto a la regulación de la erosión, se prevé un incremento del nivel del mar que puede ir desde 0.09 m a mediados de siglo y superar 1 m a fin de siglo (Reguero *et al.*, 2015), con lo cual se incrementaría la exposición a inundaciones, erosión costera, perdida de playas y daños en la infraestructura (Alfieri *et al.*, 2017; Hagen *et al.*, 2022; Hirabayashi *et al.*, 2021; (IISD), 2025; Reguero *et al.*, 2015).

Finalmente, respecto a la biodiversidad, las proyecciones indican una reducción de cobertura vegetal arbórea de 0.2 a 0.6 y una reducción de biomasa de 4 a 8 kg/m² (Lyra *et al.*, 2017). Dichos factores generarían estrés en la flora y fauna, pérdida de biodiversidad y hábitats, migración de especies, así como el desplazamiento y cambio en distribución de especies (Feeley & Silman, 2010; Hoegh-Guldberg *et al.*, 2019; IISD, 2025; Parmesan *et al.*, 2022; Pörtner *et al.*, 2023).

Tabla 5. Impactos proyectados del cambio climático al 2050

Variable	↑ incremento, ↓ reducción	Agua	Sector clave	
	Descripción		Agricultura	Biodiversidad/Suelo
Precipitación anual	↓ 5 % ⁽¹⁾ ↓ 10 % ⁽¹⁾	↓ 0 a -182.5 mm/a ⁽⁴⁾ ↓ -730 a -1460 mm/a ⁽⁴⁾ ↓ precipitación en época lluviosa ⁽²⁾ Escorrentía: ⁽¹¹⁾ ↓ 40-60 % cuenca alta ↓ 20 % cuenca media = ↓ disponibilidad de agua superficial, presión sequías y menor recarga ↑ 0-17 % en cuenca media y baja (San Isidro, Bella Vista y Monkey River) = riesgo de inundación y erosión	Aptitud de granos básicos, arroz, chile, frijol, aguacate, papa, banana, cítricos, caña de azúcar, tomate: ↓ 5 % - ↓ 30 %, ↓ 5 % - ↓ 40 % ⁽¹⁾ Reducción de rendimiento de granos básicos: ⁽¹⁵⁾ ↓ 9.9-11.9 % frijol y <0.55 t/ha, ↓ 23 % frijol ↓ 10-20 % maíz y 1.0-1.5 t/ha, ↓ 21 % maíz ↓ cantidad, ↑ costos, pérdida en cosechas, ↑ plagas y enfermedades, ↓ seguridad alimentaria, ↓ calidad ⁽¹⁶⁾ Rendimiento banano: ⁽¹⁷⁾ ↑ 0.59 t/ha banano, ↑ 0.19 t/ha banano Ganadería: ganado afectado por estrés hídrico y reducción de forraje ^(18, 19, 20)	↑ 6.7 % erosión suelo ⁽²¹⁾ ↓ áreas de distribución de especies nativas ^(22, 23, 24) ↓ diversidad en tierras bajas ⁽²⁵⁾ ↓ cobertura vegetal arbórea - 0.2 a -0.6 ⁽⁴⁾ ↓ biomasa -4 a -8 kg.m-2 ⁽⁴⁾ pérdida moderada de biomasa
Temperatura	+2°C +1.6° a 2.4°C ⁽²⁾ +3°C +4.5° a 6°C ⁽³⁾ Días secos ↑ 20-40 días ⁽⁴⁾	Hasta 112 millones de personas con mayor estrés hídrico a +2.7°C ⁽¹²⁾		
Sequías	↑ frecuencia y severidad de sequías ^(2, 5, 6) , ↑ aridez ⁽⁶⁾ ↓ cantidad de precipitación ⁽²⁾	Escasez de agua ^(5, 13)	Pérdida de cosechas, ↓ seguridad alimentaria ⁽¹⁶⁾	Estrés de flora y fauna, pérdida de biodiversidad, migración de especies ⁽¹⁴⁾
Inundaciones	↑ lluvias extremas ⁽²⁾ , ↑ inundaciones	Intrusión salina ⁽⁵⁾	Pérdida de cosechas, ↓ seguridad alimentaria ⁽¹⁶⁾	Erosión de suelo, deterioro de ribera de ríos y tierras

	(7) ↑ frecuencia de ciclones y tormentas tropicales (6)		agrícolas. Destrucción de hábitats y desplazamiento de especies, pérdida de biodiversidad ⁽¹⁴⁾
Incendios	↑ frecuencia de incendios ^(8, 9)	Pérdida de cosechas, ↓ seguridad alimentaria ⁽¹⁶⁾	Perturbación de hábitats, destrucción de ecosistemas forestales, pérdida de biodiversidad y cambios en distribución de especies ⁽¹⁴⁾
Aumento del nivel del mar	↑ > 0.09 m ⁽¹⁰⁾ 0.22 % de acuíferos con intrusión salina ⁽¹⁴⁾ ↑ exposición a inundaciones ⁽¹⁴⁾	Erosión costera, inundaciones costeras. ⁽¹⁴⁾ Pérdida de playas, reducción hábitat de aves costeras. ⁽¹⁴⁾ Problemas en infraestructura y viviendas por el aumento del nivel del mar y las marejadas ciclónicas ^(6, 7, 10, 26)	

RCP 4.5, RCP 8.5. (1) Navarro, 2023; (2) Imbach *et al.*, 2018; (3) Gutiérrez *et al.*, 2021; (4) Lyra *et al.*, 2017; (5) Hidalgo *et al.*, 2013; (6) Hagen *et al.*, 2022; (7) Hirabayashi *et al.*, 2021; (8) Ranasinghe *et al.*, 2021; (9) Castellanos *et al.*, 2022; (10) Reguero *et al.*, 2015; (11) Imbach *et al.*, 2012; (12) Arnell *et al.*, 2016; (13) Imbach *et al.*, 2017; (14) IISD, 2025; (15) Cepal, 2013; (16) USDA & CATIE, 2023; (17) Varma & Bebber, 2019; (18) Meza-Herrera *et al.*, 2022; (19) Hodson de Jaramillo *et al.*, 2023; (20) Hannah *et al.*, 2017; (21) Eekhout & de Vente, 2022; (22) Hoegh-Guldberg *et al.*, 2019; (23) Parmesan *et al.*, 2022; (24) Pörtner *et al.*, 2023; (25) Feeley & Silman, 2010; (26) Alfieri *et al.*, 2017; (27) Veldkamp *et al.*, 2016; (28) ECLAC, 2010; (29) Magrin *et al.*, 2014.

Tabla 6. Impactos proyectados del cambio climático al 2100

Variable	↑ incremento, ↓ reducción Descripción	Sector clave		
		Agua	Agricultura	Biodiversidad/Suelo
Precipitación anual	↓ 10 % ⁽¹⁾ ↓ 15 % ⁽¹⁾	↓ 5–10 % (Jun-Oct) ⁽⁵⁾	Aptitud de granos básicos, arroz, chile, frijol, aguacate, papa, banana, cítricos, caña de azúcar, tomate: ↓ 15 % - 35 %, ↓ 5 % - 40 % ⁽¹⁾	↑ 14.2 % erosión suelo ⁽²¹⁾ Transición de selva tropical a sabana/pastizales ⁽⁴⁾ ↓ cobertura forestal en la cuenca ⁽¹⁴⁾ ↓ 77-89 % índice foliar ⁽¹¹⁾ ,
Temperatura	+3°C ⁽³⁾ +3.5°C a +5°C ⁽³⁾	El 40 % de América Latina expuesto a una	↑ 20 % y ↑ 30 % (aguacate y caña de azúcar) ⁽¹⁾	

Días secos ↑ 80-100 días ⁽⁴⁾	escasez absoluta de agua (27) Reducción del 80 % del consumo de agua per cápita ⁽²⁸⁾	Reducción de rendimiento de granos básicos: ⁽¹⁵⁾ ↓ 38 % maíz y <1 t/ha, ↓ 32-43 % maíz ↓ 17.2 % frijol, ↓ 36-53 % frijol y <0.3 t/ha Ganadería: reducción de la productividad, impactos derivados de la escasez de forraje y agua ^(18, 19, 20)	cobertura forestal reemplazada por vegetación seca ⁽⁴⁾ Pérdida de especies y desplazamiento del hábitat, reducción de la capacidad de los bosques para actuar como sumideros de carbono y pérdida asociada de biodiversidad ^(14, 29)
Sequías	Intensificación de canícula (sequía de verano), mayor aridez y prolongación e intensidad de canícula ^(2, 5)	Pérdida de cosechas, ↓ seguridad alimentaria ⁽¹⁶⁾	Estrés de flora y fauna, pérdida de biodiversidad, migración de especies ⁽¹⁴⁾
Inundaciones	Intrusión salina ⁽⁵⁾	Pérdida de cosechas, ↓ seguridad alimentaria ⁽¹⁶⁾	Erosión de suelo, deterioro de ribera de ríos y tierras agrícolas. ⁽¹⁴⁾ Destrucción de hábitats y desplazamiento de especies, pérdida de biodiversidad ⁽¹⁴⁾
Incendios		Pérdida de cosechas, ↓ seguridad alimentaria ⁽¹⁶⁾	Perturbación de hábitats, destrucción de ecosistemas forestales, pérdida de biodiversidad y cambios en distribución de especies ⁽¹⁴⁾
Aumento del nivel del mar ↑ 0.35 a > 1.0 m ⁽¹⁰⁾	Pérdida de 2.6 % de acuíferos abiertos de agua dulce ⁽¹⁴⁾ ↑ exposición a inundaciones ⁽¹⁴⁾		Deterioro crítico de arrecifes (blanqueamiento de los arrecifes de coral), pérdida de suelos, aumento de degradación ⁽¹⁴⁾

RCP 4.5, RCP 8.5. (1) Navarro, 2023; (2) Imbach *et al.*, 2018; (3) Gutiérrez *et al.*, 2021; (4) Lyra *et al.*, 2017; (5) Hidalgo *et al.*, 2013; (6) Hagen *et al.*, 2022; (7) Hirabayashi *et al.*, 2021; (8) Ranasinghe *et al.*, 2021; (9) Castellanos *et al.*, 2022; (10) Reguero *et al.*, 2015; (11) Imbach *et al.*, 2012; (12) Arnell *et al.*, 2016; (13) Imbach *et al.*, 2017; (14) IISD, 2025; (15) Cepal, 2013; (16) USDA & CATIE, 2023; (17) Varma & Bebbey, 2019; (18) Meza-Herrera *et al.*, 2022; (19) Hodson de Jaramillo *et al.*, 2023; (20) Hannah *et al.*, 2017; (21) Eekhout & de Vente, 2022; (22) Hoegh-Guldberg *et al.*, 2019; (23) Parmesan *et al.*, 2022; (24) Pörtner *et al.*, 2023; (25) Feeley & Silman, 2010; (26) Alfieri *et al.*, 2017; (27) Veldkamp *et al.*, 2016; (28) ECLAC, 2010; (29) Magrin *et al.*, 2014.

3.1.4. Capacidad adaptativa

El 80 % de la población económicamente activa trabaja en fincas bananeras, empleo que representa la principal fuente de ingresos para la mayoría de hogares. Adicionalmente, las siete comunidades de la cuenca media poseen fincas donde producen diversos cultivos (granos básicos, cultivos anuales, hortalizas y frutales). En la comunidad de Monkey River, ubicada en la cuenca baja y zona costera, entre un 60-80 % de la población se dedica a la pesca y el turismo. Esta diversificación de medios de vida les permite generar ingresos extra adicionales al salario; sin embargo, no es suficiente para su estabilidad económica. Las mujeres y los jóvenes participan en la agricultura en más del 50 % de las familias de las comunidades de la cuenca media, algo diferente para el turismo y pesca realizado en Monkey River, donde el porcentaje de mujeres se reduce a menos del 40 % y la participación de jóvenes no excede el 20 %. Aunado a esto, menos del 40 % de los hogares de la cuenca es liderado por mujeres.

La figura 7 muestra los resultados obtenidos de la encuesta aplicada a dos medios de vida: 1) pesca y turismo, 2) granos básicos y otros cultivos. Los valores más altos, cercanos a cinco se observan en una tonalidad roja más intensa; y los valores más bajos, cercanos a 1 se observan en tonalidad crema. En cuanto a las necesidades básicas, se observan valores medios a altos en acceso a energía. Si bien todas las comunidades tienen acceso a gas, mencionaron que prefieren seguir cocinando con leña. También se observaron valores medios a altos en seguridad alimentaria y ciudadana. Los encuestados mencionaron que producir sus propios alimentos para autoconsumo les brinda autonomía y estabilidad alimentaria, y que las comunidades son seguras para la población.

Sin embargo, se determinaron valores bajos para infraestructura de vivienda y salud, así como para economía. Los valores bajos de acceso a salud pueden reflejar las brechas en infraestructura y servicios de salud que precisan de mejoras. En cuanto a la economía, esta puede estar vinculada a un bajo ingreso en las fincas bananeras. Con respecto a la educación, todas las comunidades tienen un nivel medio a alto: la mayoría finaliza sus estudios de secundaria; sin embargo, en la comunidad de Monkey River no hay escuela.

En cuanto a la innovación, los encuestados indicaron una alta voluntad de cambio que evidencia la disposición a aceptar e implementar nuevas prácticas, clave para la resiliencia climática y socioeconómica. Los valores altos en el acceso a medios de comunicación les permiten acceder a datos y recursos informativos (por ejemplo, sobre prácticas agrícolas, cambio climático o mercados), insumo importante para innovar generando nuevas ideas. Sin embargo, los valores bajos en asistencia técnica, indican la falta de acompañamiento práctica o institucional que les permita transformar la información en acción.

En torno a la acción, las comunidades participan localmente y poseen conocimientos en cuanto a la gestión del agua donde hay juntas creadas para racionalizar el recurso y asegurar la reserva en épocas de escasez. No obstante, es preciso fortalecer la gobernanza comunal, así como la colaboración intersectorial para acceder a nuevas oportunidades y financiamiento, ya sea para mejora de insumos, acceso a mercado, infraestructura, soporte técnico y valor agregado. Algunos ejemplos incluyen a la comunidad de Cowpen, donde algunos emprendedores dan un valor agregado al chile transformándolo en salsas; la comunidad de Trio, que implementa sistemas agroforestales con la organización Ya'axché; y la comunidad de Monkey River, que con el apoyo de la organización TIDE viene promoviendo alternativas como acuaponía y emprendimientos de mujeres.

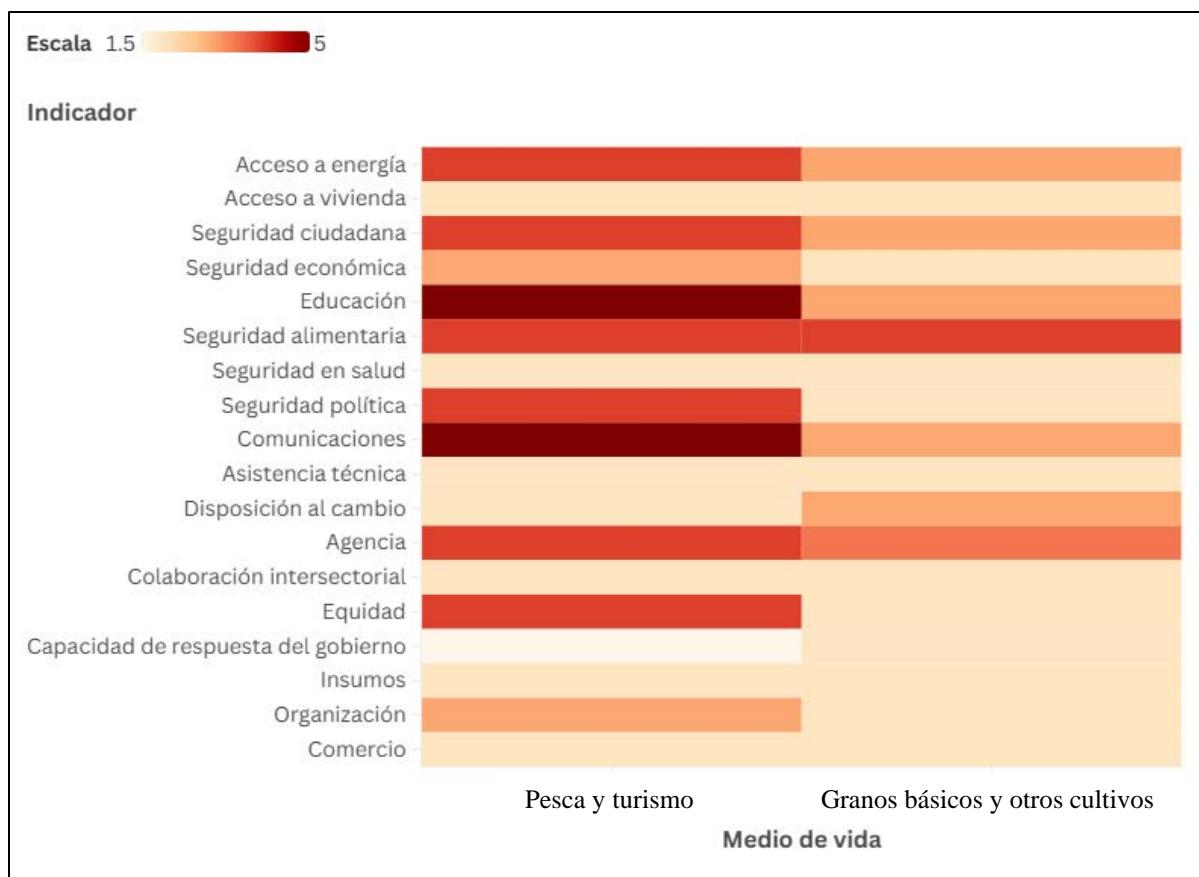


Figura 6. Capacidad adaptativa de los productores de la cuenca del Monkey River

Los resultados mostraron que se precisa fortalecer las capacidades para planificar, innovar e implementar medidas de respuesta, para lo cual es necesario fortalecer la gobernanza y la articulación con el Estado y otras instituciones. De esta forma, se podrá acceder a oportunidades de financiamiento y asistencia técnica.

3.2.Identificación y evaluación de medidas de adaptación

3.2.1. Sistematización de medidas de literatura

El resultado de este paso fue una lista de cuarenta y cinco medidas de adaptación que incluyeron soluciones basadas en la naturaleza y medidas no SbN (el detalle puede ser consultado en el anexo 10). Las medidas fueron agrupadas en cuatro tipologías: 1) gestión, 2) conservación, 3) infraestructura y 4) desarrollo local. Las medidas de gestión constituyen el grupo más numeroso (más de la mitad) e incluyen acciones orientadas a optimizar el manejo de recursos productivos y diversificación de prácticas. Entre ellas están la transición a sistemas agroforestales y silvopastoriles. El segundo grupo son las medidas de conservación dirigidas a la restauración y protección de ecosistemas, aquí se destacan la restauración de zonas ribereñas y bosques degradados, reforestación, manejo de fuentes de agua, conservación de ecosistemas litorales. El tercer grupo está conformado por medidas de infraestructura, que comprenden intervenciones estructurales y físicas. Este grupo incluye la construcción de muros de contención, estructuras artificiales costeras y sistemas de almacenamiento de agua. Finalmente, el cuarto grupo de

desarrollo local e indígena se asocia con el fortalecimiento de capacidades y diversificación económica. Algunas medidas incluyen la formación de líderes en manejo de recursos, capacitación a pescadores, desarrollo de turismo sostenible y desarrollo de cadenas de valor. Esta lista fue empleada como guía para el siguiente paso de identificación de medidas.

3.2.2. Identificación de medidas

Diecinueve medidas de adaptación fueron identificadas por los actores (comunidades, ONG y entidades del Gobierno) como respuesta al cambio climático. Se listan en la tabla 7, clasificadas según el sitio de implementación, escala temporal en el corto, mediano y largo plazo, así como el servicio ecosistémico al que contribuyen.

Las medidas propuestas responden a la construcción de resiliencia frente a una variedad de eventos climáticos. Por ejemplo, las medidas ligadas a la provisión de alimentos a través de la producción agrícola y la diversificación de cultivos se implementarían en áreas agrícolas y ganaderas. Estas medidas beneficiarían a las siete comunidades ubicadas en la cuenca media, cuyo medio de vida es la agricultura de granos básicos. Mientras que la comunidad de Monkey River, dedicada a la pesca y el turismo, se beneficiaría de medidas que diversifiquen sus medios de vida como la acuicultura y el ecoturismo. Por otro lado, medidas ligadas a la provisión de agua, como la restauración y reforestación, se darían en el área del acuífero provincia Savannah. En cuanto a la temporalidad, mientras las medidas en el corto plazo buscan mantener la provisión de alimentos, medidas en el mediano y largo plazo, como la transición a sistemas agroforestales, silvopastoriles y restauración de áreas, buscan asegurar la provisión de agua en la cuenca.

Tabla 7. Medidas de adaptación identificadas en la cuenca del Monkey River

Sitios de implementación	Tiempo	Medidas	Servicio ecosistémico
Áreas ganaderas entre Trio y Bladen y al sur de San Pablo (contiguo al río Swasey)	Corto	Implementación de pastos mejorados Manejo de pastos	Provisión de alimentos
	Largo	Transición a sistemas silvopastoriles Reforestación de zonas ganaderas	Provisión de agua
Áreas agrícolas ubicadas al margen de los ríos Swasey y Bladen	Corto	Manejo del suelo Diversificación de cultivos	Provisión de alimentos
	Mediano	Implementación de variedades resistentes Implementación de sistemas de riego Cosecha de agua	Provisión de agua
	Largo	Transición a sistemas agroforestales	Provisión de alimentos
Márgenes de los ríos Swasey y Bladen	Corto	Implementación de barreras vivas Implementación de barreras muertas	Regulación erosión
	Largo	Restauración de bosque ribereños	
Zona costera Monkey River	Corto	Construcción de muro en zona costera	
	Mediano	Acuicultura Ecoturismo	Culturales

	Largo	Diversificación de los medios de vida Reubicación de comunidad
Acuífero Provincia Savannah	Largo	Restauración de áreas Provisión de agua

3.2.3. Evaluación de medidas

Potencial de las medidas basadas en la naturaleza para mitigar los impactos

La tabla 8 presenta la evaluación, a través del conocimiento experto, de la eficacia de una medida para mitigar los impactos futuros del cambio climático: reducción de producción de cultivos, reducción de agua y erosión de suelo. El experto evaluó la eficacia de cada medida considerando su capacidad para mitigar el impacto que identificó como el más directamente relacionado, con base en su experiencia y conocimiento.

Las SbN identificadas muestran una alta eficacia para mitigar múltiples impactos con relevancia en la producción, la regulación hídrica y la conservación de suelos. Las medidas de manejo productivo, como pastos mejorados, manejo de suelos y diversificación de cultivos, muestran efectos positivos en contribuir a la estabilidad de la producción agrícola, aspecto crítico, ya que en la cuenca la seguridad alimentaria depende de la agricultura de subsistencia. Mientras tanto, las medidas de reforestación y restauración de zonas deforestadas y degradadas poseen una alta eficacia para mitigar el impacto de reducción de agua y mantener su provisión. En cuanto al control de la erosión del suelo, la implementación de barreras vivas y muertas presentan efectos altos, con potencial para proteger el suelo.

Tabla 8. Evaluación de la eficacia de las medidas para reducir impactos del cambio climático

Medidas	Mitigación de impacto en					
	↓ Producción		↓ Agua		Erosión suelo	
	E	C	E	C	E	C
Manejo del suelo	+++	+++				
Diversificación de cultivos	++	+++				
Implementación de variedades resistentes	+++	+++				
Implementación de sistemas de riego	+++	+++				
Cosecha de agua			++	+++		
Transición a sistemas agroforestales			++	++		
Transición a sistemas silvopastoriles			++	++		
Reforestación de zonas ganaderas			+++	+++		
Restauración de bosques ribereños			+++	+++		
Restauración de zonas deforestadas			+++	+++		

Restauración de zonas degradadas	+++	+++
Implementación de barreras vivas	++	+++
Implementación de barreras muertas	++	+++

Efecto (E). Confianza (C). Magnitud efecto: alto +++, medio ++, bajo +, negativo -, no hay efecto o. Confianza: baja + (< 50 %), media ++ (50 %), alta +++ (> 50 %).

Sistematización de literatura de mecanismos de mitigación de las SbN

La tabla 9 muestra las medidas basadas en la naturaleza que actúan frente a eventos climáticos como sequías, inundaciones e incremento del nivel de mar, a través de diversos mecanismos. Frente a las sequías, las medidas asociadas al manejo productivo y de suelos contribuyen a mejorar la capacidad de almacenamiento de agua (Dijk *et al.*, 2024; Netti *et al.*, 2024) en el suelo y mejorar la infiltración (Netti *et al.*, 2024). La cosecha de agua permite garantizar la disponibilidad de agua para consumo y producción mediante la recarga de acuíferos y la reducción de escorrentía superficial (Herrera-Franco *et al.*, 2024; Netti *et al.*, 2024; Vigerstol *et al.*, 2024).

Asimismo, prácticas agroforestales, silvopastoriles, y de reforestación en zonas productivas, regulan el microclima y la infiltración (Cisneros-Sagüilán *et al.*, 2024; Döbert *et al.*, 2021; Dobhal *et al.*, 2024; Ghaffariyan, 2025; Rolo *et al.*, 2023; Teague & Kreuter, 2020). En cuanto a las inundaciones, se observa que varias SbN favorecen la reducción de riesgos (Acreman *et al.*, 2021; Seddon *et al.*, 2020), mejoran la capacidad de infiltración y regulan los flujos hídricos (Acreman *et al.*, 2021; Cisneros-Sagüilán *et al.*, 2024; Dobhal *et al.*, 2024; Fahad *et al.*, 2022; Lalonde *et al.*, 2024; Netti *et al.*, 2024; Penning *et al.*, 2023; Rolo *et al.*, 2023; Teague & Kreuter, 2020).

La restauración de zonas costeras aporta a la estabilidad y protección en la costa y contribuye a reducir la erosión (OECD, 2020; Seddon *et al.*, 2020; World Bank, 2023), mientras que la transición a sistemas agroforestales y silvopastoriles crean una barrera natural que controla la escorrentía (Acreman *et al.*, 2021; Dobhal *et al.*, 2024; Fahad *et al.*, 2022; Kharel *et al.*, 2023; Penning *et al.*, 2023; Rolo *et al.*, 2023) y protege los suelos de la erosión (Cisneros-Sagüilán *et al.*, 2024; Fahad *et al.*, 2022; Suber *et al.*, 2019; Vigerstol *et al.*, 2024). Respecto al incremento del nivel del mar, las SbN con mayor potencial de mitigación se vinculan a la restauración de ecosistemas costeros y ribereños, contribuyendo a proteger (OECD, 2020; Seddon *et al.*, 2020; World Bank, 2023) y estabilizar las zonas expuestas a erosión (Seddon *et al.*, 2020; World Bank, 2023).

Tabla 9. Mecanismos de mitigación de las medidas de adaptación frente a eventos climáticos

Medida	Sequías	Inundaciones	Incremento del nivel del mar
Manejo del suelo	Mejora retención agua ⁽³⁾ , ¹⁶⁾ , reducción de escorrentía ^(1, 4) , mejora infiltración ⁽²⁾	Mejor infiltración ^(2, 5)	
Manejo de pastos	Mejor infiltración ⁽²⁾ , retención agua ^(2, 3)		

Diversificación de cultivos	Mejora retención hídrica (2, 6); aumenta diversificación (6)	
Implementación de variedades resistentes		
Cosecha de agua	Captación para épocas secas (10), mayor suministro de agua (1, 2), recarga de agua subterránea (1, 2), reduce escorrentía (1, 10)	Reduce velocidad de inundaciones (2)
Transición a sistemas agroforestales		Control de escorrentía (8, 11, 13, 16, 17, 18), estabiliza suelos (17, 18), intercepción de lluvias (11, 18), protección del suelo (11), reducción de eventos (7)
Transición a sistemas silvopastoriles	Regulación microclimática (11, 13, 15, 17), retención de agua (11, 13, 14, 17), mejora calidad de agua (15), reducción de escorrentía (4, 8, 11, 13, 16, 18), mejora infiltración (4, 5, 11, 17)	Disminuye escorrentía (8, 13, 16, 17), protección y control erosión (1, 13, 14, 18)
Reforestación de zonas ganaderas	Recarga de aguas subterráneas (1, 8), mejora retención de agua (1, 16), regula suministro de agua (1, 7)	Disminuye escorrentía (8, 12, 16), reduce riesgo de inundaciones (7, 8)
Restauración de bosques ribereños		Estabilización y protección de zonas costeras (7, 9, 19), reduce erosión (7, 19)
Restauración de zonas deforestadas y degradadas		

(1) Vigerstol *et al.* (2024); (2) Netti *et al.* (2024); (3) Kharel *et al.* (2023); (4) Döbert *et al.* (2021); (5) Teague & Kreuter (2020); (6) Dijk *et al.* (2024); (7) Seddon *et al.* (2020); (8) Acreman *et al.* (2021); (9) OECD (2020); (10) Herrera-Franco (2024); (11) Dobhal *et al.* 2024; (12) Lalonde, (2024); (13) Cisneros-Sagüilán *et al.* (2024); (14) Suber *et al.* (2019); (15) Ghaffariany (2025); (16) Penning *et al.* (2023); (17) Rolo *et al.* (2023); (18) Fahad *et al.* (2022); (19) World Bank (2023).

Evaluación de medidas

Las medidas de manejo productivo, como pastos mejorados, manejo de suelos y cultivos mixtos, muestran un horizonte de duración al 2050. Por su parte, las medidas de restauración (bosques ribereños, áreas degradadas y zonas bananeras) se proyectan como intervenciones con beneficios más allá del 2050. Sin embargo, requieren mayor articulación interinstitucional y disponibilidad de recursos financieros y de tierra para ser sostenibles.

Las medidas grises, como la construcción de muros, si bien se presentan como una respuesta inmediata frente a inundaciones costeras, tiene altos costos de implementación y una fecha de caducidad al 2030, lo cual limita su viabilidad. En contraste, las SbN como barreras vivas, reforestación y restauración, presentan costos menores.

Las medidas vinculadas a medios de vida alternativos, como la acuicultura, ecoturismo y diversificación de medios, son potencialmente aplicables en la zona costera y complementan la adaptación en la comunidad. Sin embargo, su desarrollo va a depender de la creación de marcos regulatorios claros y asistencia técnica, para hacerlas sostenibles económica y ambientalmente.

En términos institucionales, la mayoría de las medidas requieren la acción conjunta de Gobierno, comunidades y sector privado, con apoyo de la academia y las ONG presentes en el territorio, lo cual refuerza la necesidad del fortalecimiento de la coordinación intersectorial. También, se observó que las medidas con mayores beneficios ambientales y sociales tienen limitaciones por la falta de políticas claras y recursos financieros para su implementación, lo que condiciona su escalabilidad en la cuenca (tabla 10).

Tabla 10. Medidas, fechas de caducidad, costos, aspectos técnicos y escala de implementación basado en conocimiento de expertos

Medidas	Fecha de caducidad	Costos	Aspectos técnicos para la implementación		
			Instituciones involucradas	Políticas o regulaciones	Recursos
Implementación de pastos mejorados	2030	++	5,4,1	1	4,1,2
Manejo de pastos	> 2050	++	5,3,3	3	2,3
Reforestación de zonas ganaderas	> 2050	++	5,3,4,1	1	2,4,5
Transición a sistemas silvopastoriles	> 2050	++	1,2,3,4,5	3	1,2,4,5,3
Manejo del suelo	> 2050	++	1,4,5	1	4,3,2
Diversificación de cultivos	> 2050	+	5,1	2	2,3,4,5
Implementación de variedades resistentes	> 2050	++	1,5	2	4,2,1,3,5
Implementación de sistemas de riego	2035	++	1,4	1	2,4,3
Cosecha de agua	> 2050	+++	1,4	3	1,2,3,4
Transición a sistemas agroforestales	> 2050	++	2,3	1	2,4,5
Implementación de barreras vivas	> 2050	+	1,3,4,5,2	-	2,3,4,5
Implementación de barreras muertas	> 2050	+++	1,3,4,5,2	-	2,3,4,5,1
Restauración de bosques ribereños	2100	+++	1,3,4,2,5	1	2,3,4,5
Construcción de muro en zona costera	2030	+++	-	-	-
Acuicultura	> 2050	++	5,1,2,3,4	3	1,2,3,4
Ecoturismo	> 2050	++	2,3,4	1	1,2,4,5
Diversificación de los medios de vida	> 2050	+++	1,2,3,4,5	3	1,2,3,4,5
Reubicación de comunidad	> 2050	+++	1,3,2,4,5	3	1,2,3,4,5

Restauración de zonas deforestadas y degradadas	2100	+++	1,2,3,4,5	1	1,2,3,4,5
---	------	-----	-----------	---	-----------

Costos: bajo +, medio ++, alto +++ . Instituciones: 1- gobierno, 2- ONG, 3- comunidades, 4- sector privado, 5- investigación y academia. Políticas o regulaciones: 1-política existente, 2- política en desarrollo, 3- no hay política. Recursos: 1- físico, 2- financiero, 3- tecnológico, 4- humano, 5- tenencia de la tierra.

3.3.Diseño de rutas de adaptación

3.3.1. Desarrollo de escenarios

La tabla 11 muestra dos escenarios diferenciados: moderado y extremo, los cuales integran tanto trayectorias climáticas (temperatura, precipitación, días secos, aumento del nivel mar), como trayectorias socioeconómicas (crecimiento del PBI, presiones sobre ecosistemas, patrones de deforestación, gobernanza). Esto genera un panorama integral de los posibles futuros de clima y socioeconómicos en la cuenca del Monkey River.

Tabla 11. Escenarios moderado y extremo

Escenarios (2050-2100)	Escenario 1 Moderado	Escenario 2 Extremo
Variables climáticas y socioeconómicas	<p>aumento 2-3°C ^(2,3), 20-40 días secos/año ⁽⁴⁾</p> <p>disminución precipitación 5-10 % ⁽¹⁾</p> <p>incremento del nivel del mar > 0.09 - 0.35 m ⁽¹⁰⁾</p> <p>crecimiento estable de PBI con desigualdad ^(30, 31)</p> <p>deforestación moderada y presión en ecosistemas ^(30, 31)</p>	<p>aumento 3-4°C ⁽³⁾, 80-100 días secos/año ⁽⁴⁾</p> <p>disminución precipitación 10-15 % ⁽³⁾</p> <p>incremento del nivel del mar hasta 1.04 m ⁽¹⁰⁾</p> <p>crecimiento muy alto de PBI en países desarrollados ^(32, 31)</p> <p>presión y degradación en recursos ^(32, 31)</p>
Impactos	<p>escorrentía ↓20-60 % cuenca alta y media, presión sequías ⁽¹¹⁾</p> <p>↑ frecuencia y duración de sequías ^(2, 5, 6)</p> <p>más eventos de lluvias intensas y riesgo de inundaciones fluviales ^(2, 7)</p> <p>↓ rendimiento granos básicos 10-40 % ⁽¹⁵⁾</p> <p>pérdida en cosechas ⁽¹⁶⁾</p> <p>intrusión salina en 0.22 % de acuíferos ⁽⁵⁾</p> <p>riesgo de inundaciones costeras que afectan áreas aledañas ⁽¹⁴⁾</p> <p>↓ cobertura vegetal arbórea -0.2 a -0.6 ⁽⁴⁾</p>	<p>escorrentía ↓20-60 % cuenca alta y media, presión sequías ⁽¹¹⁾</p> <p>sequías más severas y prolongadas ^(2, 5, 6)</p> <p>lluvias extremas más frecuentes e intensas y riesgo de inundaciones ^(2, 7)</p> <p>↓ rendimiento granos básicos 20-50 % ⁽¹⁵⁾</p> <p>plagas y enfermedades severas ⁽¹⁶⁾</p> <p>ecosistemas costeros colapsados ⁽⁵⁾</p> <p>↑ inundaciones costeras y erosión y daño a infraestructura y población ⁽¹⁴⁾</p> <p>↓ cobertura vegetal arbórea -0.2 a -0.6 ⁽⁴⁾</p>

\downarrow biomasa -4 a -8 kg.m-2 ⁽⁴⁾	\downarrow biomasa -4 a -8 kg.m-2 ⁽⁴⁾
--	--

(1) Navarro, 2023; (2) Imbach *et al.*, 2018; (3) Gutiérrez *et al.*, 2021; (4) Lyra *et al.*, 2017; (5) Hidalgo *et al.*, 2013; (6) Hagen *et al.*, 2022; (7) Hirabayashi *et al.*, 2021; (8) Ranasinghe *et al.*, 2021; (9) Castellanos *et al.*, 2022; (10) Reguero *et al.*, 2015; (11) Imbach *et al.*, 2012; (12) Arnell *et al.*, 2016; (13) Imbach *et al.*, 2017; (14) IISD, 2025; (15) Cepal, 2013; (16) USDA & CATIE, 2023; (17) Varma & Bebber, 2019; (18) Meza-Herrera *et al.*, 2022; (19) Hodson de Jaramillo *et al.*, 2023; (20) Hannah *et al.*, 2017; (21) Eekhout & de Vente, 2022; (22) Hoegh-Guldberg *et al.*, 2019; (23) Parmesan *et al.*, 2022; (24) Pörtner *et al.*, 2023; (25) Feeley & Silman, 2010; (26) Alfieri *et al.*, 2017; (27) Veldkamp *et al.*, 2016; (28) ECLAC, 2010; (29) Magrin *et al.*, 2014; (30) Riahi *et al.* (2017); (31) IIASA (2023); (32) Leimbach *et al.* (2017).

3.3.2. Identificación de umbrales y disparadores

La tabla 12 muestra los umbrales y disparadores construidos a partir de la información generada en los escenarios futuros. De este modo, es posible reconocer las señales que deben ser monitoreadas prioritariamente y que activan la implementación de medidas de respuesta, con lo cual se evita llegar a un fallo en el sistema. Los umbrales en el escenario moderado se asocian con reducciones en la productividad agrícola, biomasa y daños en la infraestructura costera, definiendo disparadores relacionados con disminuciones en el rendimiento agrícola, la ocurrencia de sequías y lluvias intensas. En contraste, el escenario extremo intensifica la magnitud y frecuencia de los umbrales y disparadores, adicionando señales de tipo social e institucional, como la emergencia de conflictos por recursos y la incapacidad de coordinación entre actores.

Tabla 12. Umbrales y disparadores por escenario

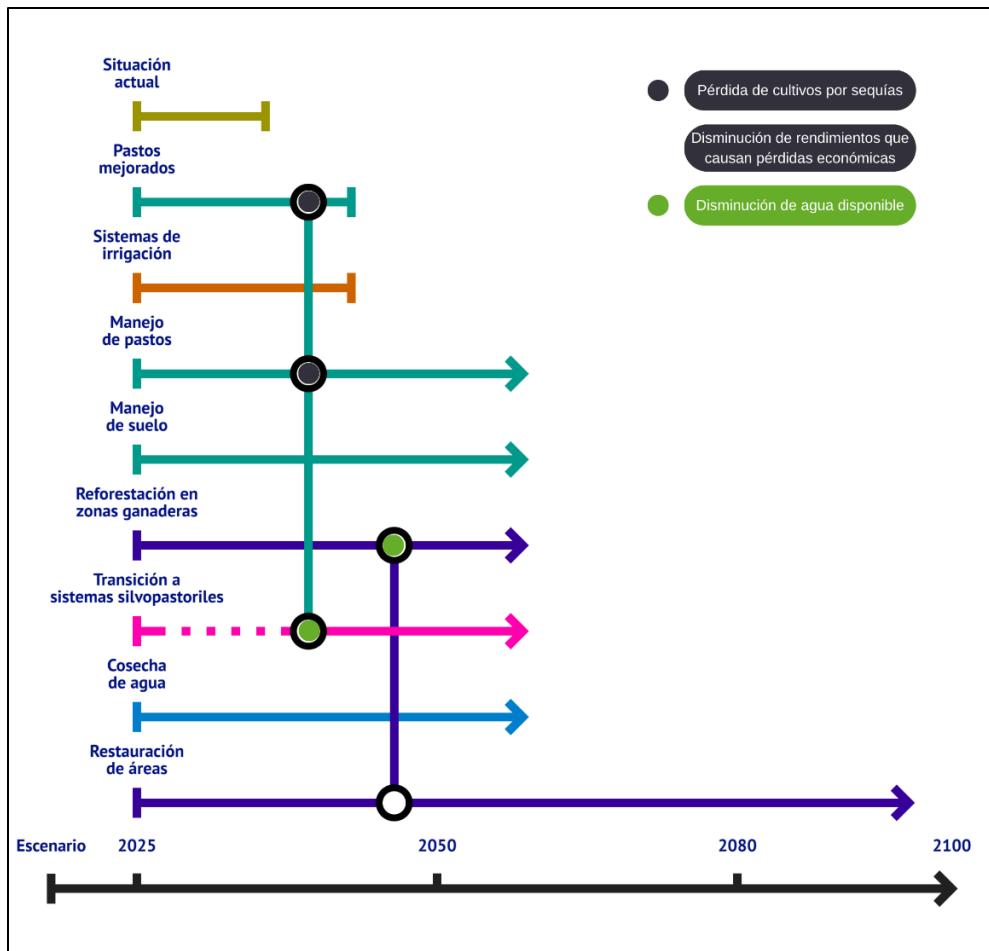
	Escenario 1 Moderado	Escenario 2 Extremo
Umbrales	Disminución de rendimiento cultivos en 20 %	Disminución de rendimiento cultivos en 40 %
	Más de 20 días secos consecutivos que provocan pérdidas de cultivo	Más de 40 días secos consecutivos que provocan pérdidas de cultivo
	Pérdida de cultivos e infraestructura por inundaciones cada dos años	Pérdida de cultivos e infraestructura por inundaciones cada año
	Disminución de biomasa de 4 kg.m-2	Disminución de biomasa de 6 kg.m-2
	Escorrentía \downarrow 20 %	Escorrentía \downarrow 40 %
	Gobernanza mixta con avances parciales en coordinación, cooperación y financiamiento	Conflictos por recursos, debilidad institucional, gobernanza colapsada sin cooperación ni financiamiento
Disparadores	Incremento de nivel del mar que causa inundaciones y daño de infraestructura cada tres años	Incremento de nivel del mar que causa inundaciones y daño de infraestructura cada dos años
	Lluvias más fuertes cada año e inundaciones por lluvias cada x años	Lluvias más fuertes cada año e inundaciones por lluvias cada x años
	Disminución de rendimiento de cultivos que causa pérdidas económicas importantes > 30 %	Disminución de rendimiento de cultivos que causa pérdidas económicas importantes > 40 %
	Poca participación de las comunidades, baja capacidad de tomar decisiones, débil liderazgo que provoca conflictos	Incapacidad de tomar decisiones, pérdida de alianzas con diferentes actores, ausencia de liderazgo

3.3.3. Diseño de rutas de adaptación para los medios de vida

Con base en las medidas, umbrales y disparadores previos, se desarrollaron tres mapas de rutas: 1) ganadera, 2) agrícola y 3) costera (figuras 7, 8 y 9). Los mapas tienen un diseño de rutas de metro y muestran las diversas formas de llegar a un punto; en este caso, de cumplir los objetivos planteados. Los mapas se extienden desde la actualidad (2025) hasta el 2100 e incluyen las medidas previamente identificadas, que abordan los problemas actuales y futuros de la cuenca, así como los disparadores que indican el término de una medida y el cambio a otra. Las medidas se ordenan por fecha de caducidad, de arriba hacia abajo, e inicia con las fechas cortas. Dentro de cada mapa de rutas, hay diversas rutas posibles, algunas pueden implementarse desde la actualidad, mientras que otras se activarán a través de un disparador. La elección de la ruta a seguir va a depender de los objetivos a abordar en determinado momento, lo cual implica que posteriormente puede elegirse otra ruta que permita continuar con el logro de los objetivos propuestos.

Tanto los mapas de rutas ganadero y agrícola plantean planes de adaptación para reducir impactos del cambio climático que afectan la provisión de servicios de alimentos y agua, debido a la reducción de producción de cultivos y disponibilidad de agua por incrementos de temperatura y disminución de precipitación, así como mayor frecuencia de eventos extremos como sequías. Con respecto al mapa de rutas para la zona costera, busca reducir los impactos por incremento del nivel del mar, que originan inundaciones y erosión del suelo, así como la afectación a la comunidad de Monkey River.

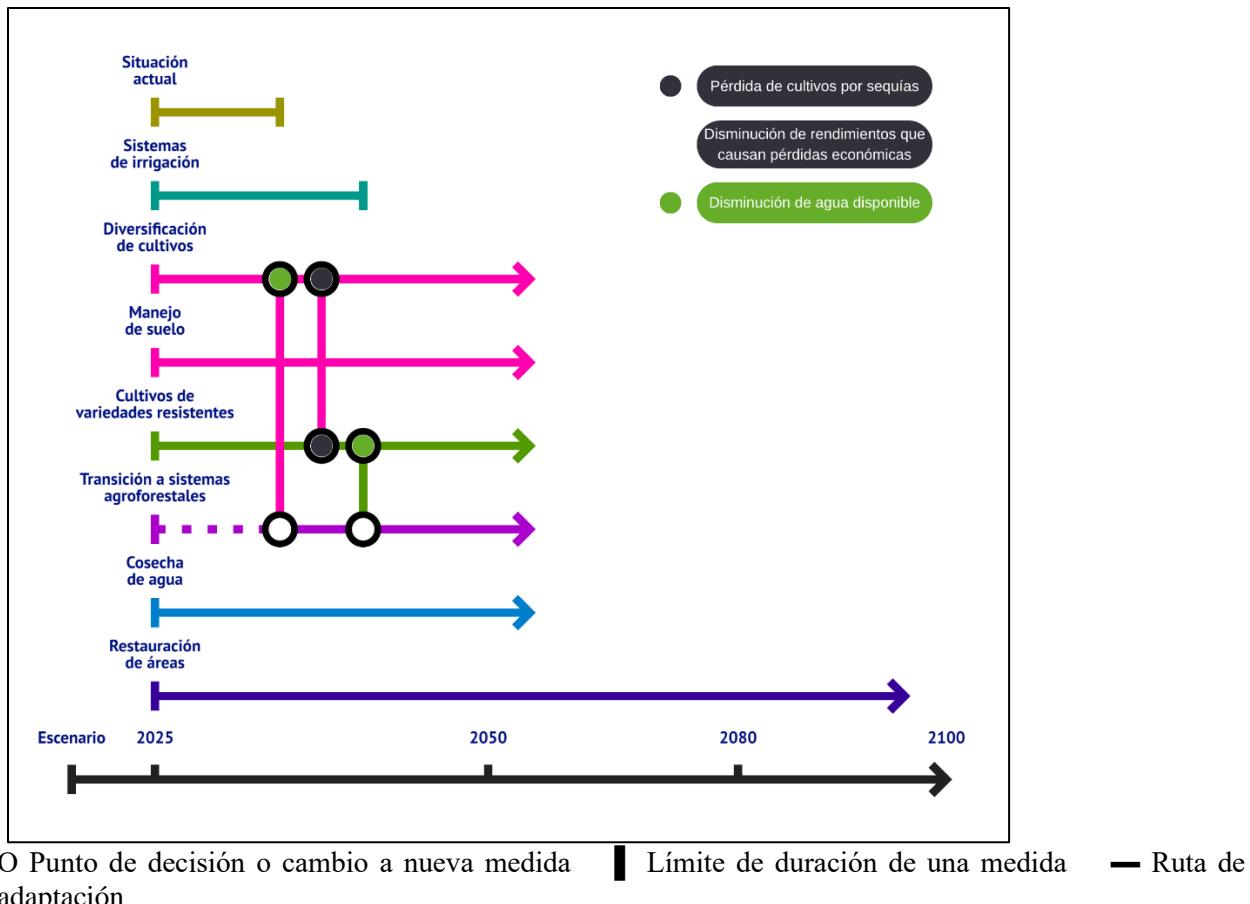
El mapa de rutas ganadero (figura 7) articula acciones desde pastos mejorados y manejo de suelos y pastos hasta la restauración de áreas y transición a sistemas silvopastoriles. Por su parte, la restauración de áreas degradadas funciona como eje estructural para la mejora de la retención hídrica, sobre todo frente a eventos extremos como las sequías.



O Punto de decisión o cambio a nueva medida | Límite de duración de una medida — Ruta de adaptación

Figura 7. Mapa de rutas de adaptación para ganadería

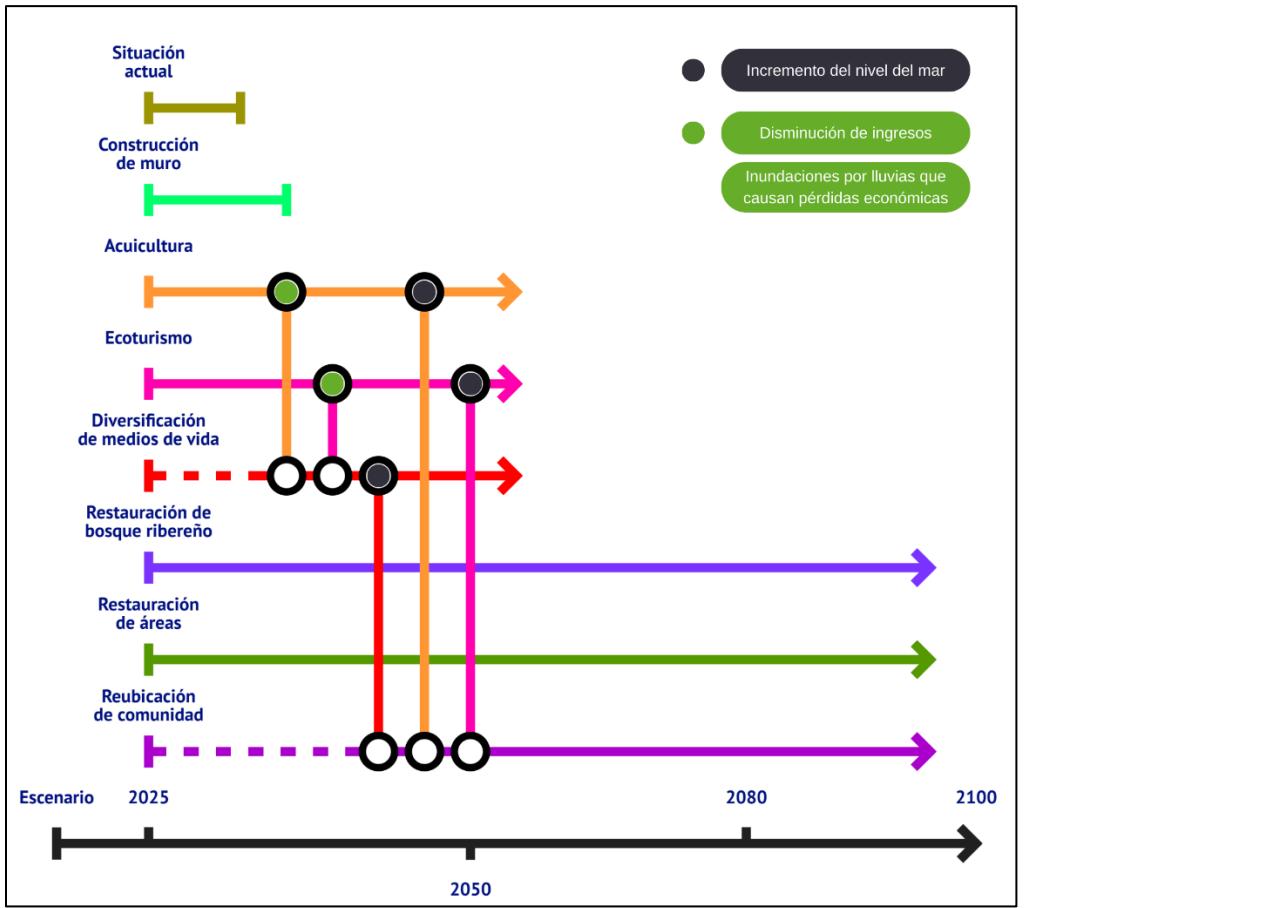
El mapa de rutas agrícola (figura 8) articula un paquete de medidas con puntos de decisión a lo largo del horizonte temporal, donde se priorizan medidas orientadas a la diversificación productiva y manejo agrícola, que transitán a medidas como la implementación de sistemas agroforestales. De manera similar al mapa de rutas ganadero, la restauración de áreas deforestadas y degradadas fortalece los procesos ecológicos que favorecen la retención de agua en el suelo.



O Punto de decisión o cambio a nueva medida ─ Límite de duración de una medida — Ruta de adaptación

Figura 8. Mapa de rutas de adaptación para agricultura

En la zona costera donde se ubica la comunidad de Monkey River, se desarrolló el mapa de rutas costero (figura 9). Considerando que esta zona enfrenta eventos climáticos de incremento del nivel del mar e inundaciones, se priorizaron medidas que buscan diversificar los medios de vida y restaurar ecosistemas, como el bosque litoral que sirve de barrera viva frente al mar. Medidas a corto y mediano plazo, como la acuicultura y ecoturismo, seguidas de la diversificación de medios de vida, permiten alternativas económicas que, además, sientan la base para medidas más profundas a aplicar a partir de mitad de siglo, como la reubicación de la comunidad.

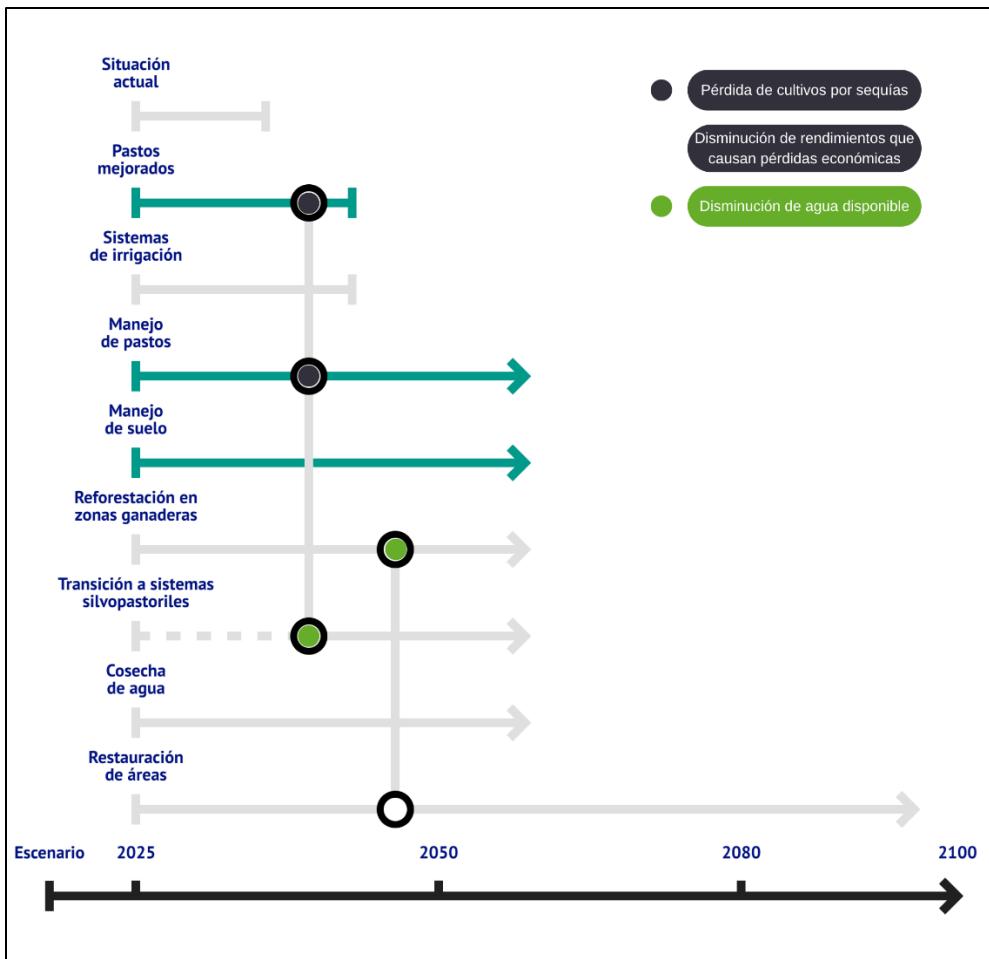


O Punto de decisión o cambio a nueva medida Límite de duración de una medida — Ruta de adaptación

Figura 9. Mapa de rutas de adaptación para zona costera

Fuente: Elaboración propia.

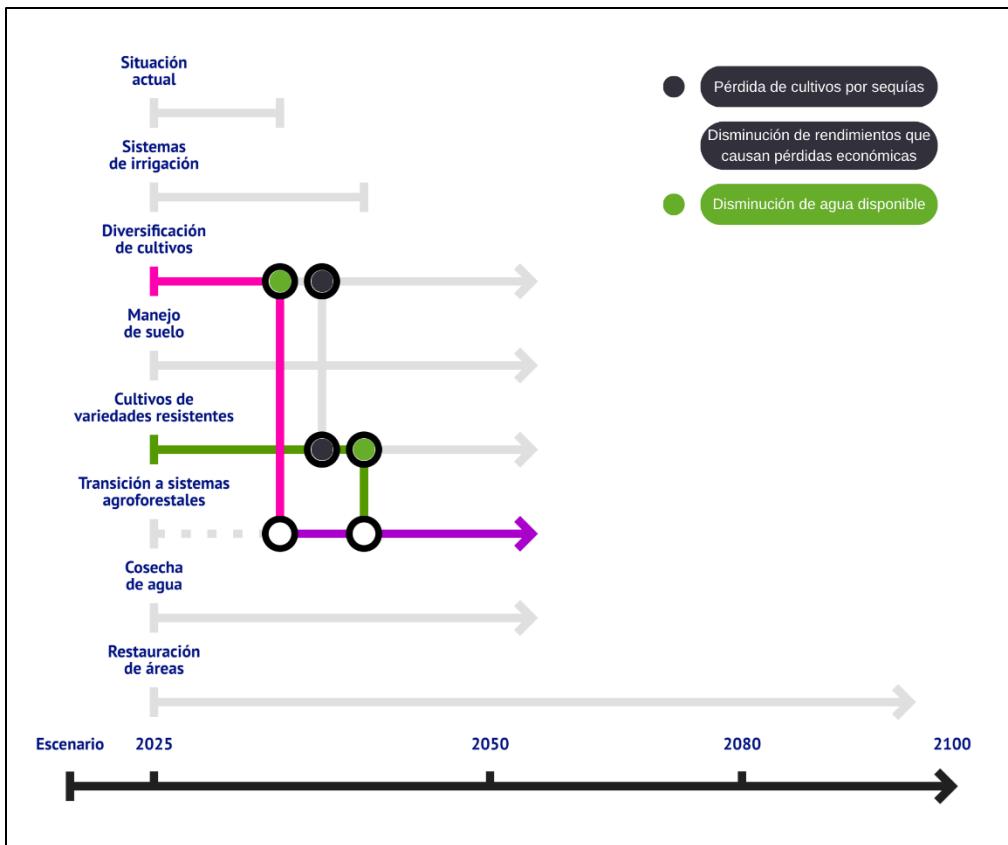
Se presentan casuísticas dentro de los mapas de rutas. Algunas rutas pueden llevarse a cabo sin un disparador que las active y pueden darse en simultáneo con otras rutas (caso 1). La figura 10 muestra tres rutas, cuyas medidas seleccionadas pueden darse sin un disparador que las active previamente. De esta forma, puede realizarse una implementación de pastos mejorados, o un manejo de pastos y manejo de suelo, en simultáneo.



O Punto de decisión o cambio a nueva medida | Límite de duración de una medida — Ruta de adaptación

Figura 10. Rutas para ganadería donde las medidas no son activadas por disparadores

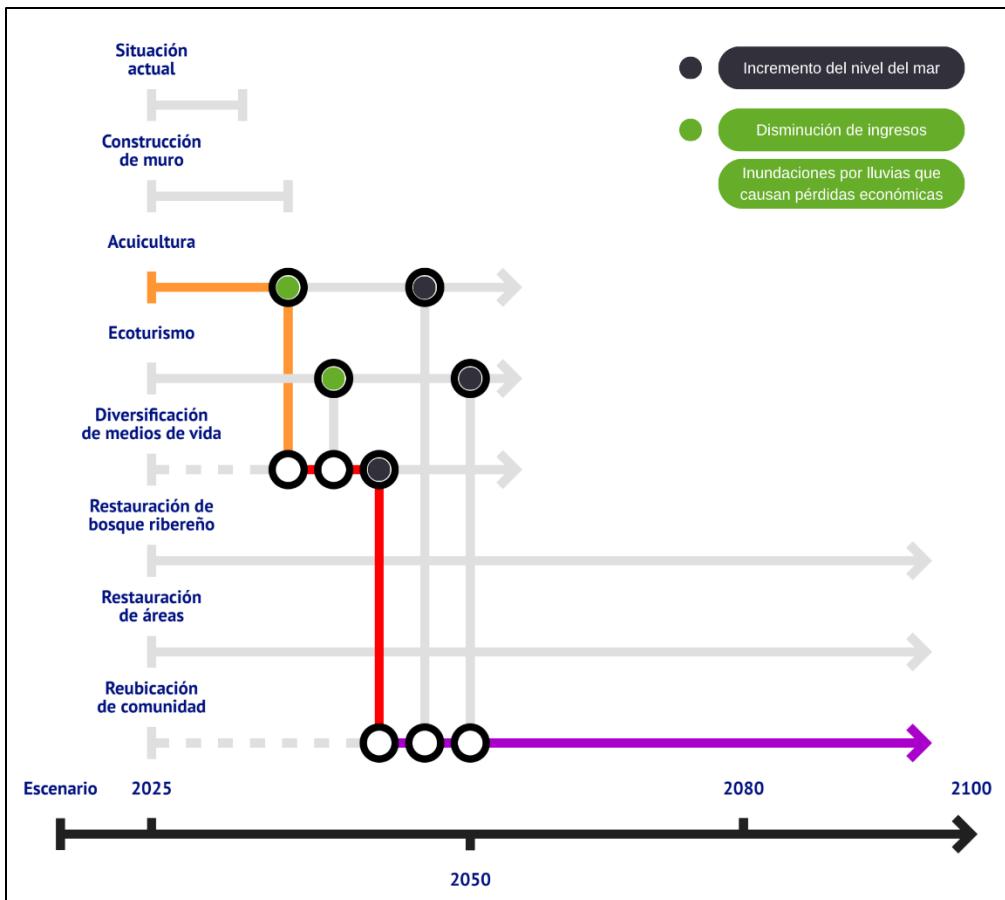
Por otro lado, otras rutas pueden iniciar con una u otra medida que, luego de activarse el disparador, transitan a una única medida. La diferencia se da en el momento en que el disparador es activado (caso 2). La figura 11 muestra dos rutas donde un disparador habilita el cambio a una misma medida; en este caso, una disminución en el agua disponible en diferente momento puede marcar un cambio de medidas, como la diversificación de cultivos o la implementación de variedades resistentes hacia la transición a sistemas agroforestales.



O Punto de decisión o cambio a nueva medida ■ Límite de duración de una medida — Ruta de adaptación

Figura 11. Rutas para agricultura donde una medida final es habilitada a partir de una u otra medida según la ruta elegida

Finalmente, una ruta puede estar definida por una situación específica, como la reubicación de una comunidad amenazada por el incremento del nivel del mar. Entonces, las medidas previas a implementar servirán de preparación y llevarán a una única medida final (caso 3). La figura 12 muestra una ruta donde una medida como la acuicultura, frente a las pérdidas económicas por inundaciones (disparador), implicaría un cambio a una diversificación de medios de vida, que serviría como preparación para una reubicación de la comunidad, cuando el disparador de inundaciones por incremento del nivel del mar se active.



O Punto de decisión o cambio a nueva medida Límite de duración de una medida — Ruta de adaptación

Figura 12. Ruta costera para reubicación de la comunidad

4. DISCUSIÓN

Metodología de análisis participativo

Los componentes de la vulnerabilidad (impactos potenciales y capacidad adaptativa de los medios de vida) fueron caracterizados a partir de percepciones locales y literatura científica, mientras que otros autores emplearon indicadores de exposición y sensibilidad a partir de data cartografiada en Belice (Carroll *et al.*, 2023; Singh, 2022; USAID, 2012) o un índice de idoneidad climática a través del modelado de aptitud de las zonas para los cultivos (Bouroncle *et al.*, 2017) para evaluar los impactos potenciales en Centroamérica. De manera similar al marco metodológico de Metternicht *et al.* (2014) y de (Bouroncle *et al.*, 2017), la capacidad adaptativa fue estimada considerando condiciones claves relacionadas a los recursos (humano, natural, construido y financiero), sobre los cuales se sustenta dicha capacidad (Flora *et al.*, 2016) y se incluyó un análisis de sensibilidad de los servicios ecosistémicos, tal como lo resalta (Metternicht *et al.*, 2014), identificando los ecosistemas y servicios brindados, su estado, y los impactos del cambio climático que afectan dichos servicios; insumo importante para identificar medidas de adaptación basadas en ellos.

En cuanto a las medidas de adaptación, identificar un abanico de medidas que combina literatura científica y el conocimiento de expertos locales favoreció seleccionar medidas aplicables al contexto estudiado. No obstante, el conocimiento aún limitado sobre la eficacia de las SbN (Seddon *et al.*, 2021) plantea desafíos significativos en la identificación de acciones de adaptación eficaces (Bednar-Friedl *et al.*, 2022; Simpson *et al.*, 2023). Frente a esto, el conocimiento experto permite tener una aproximación del efecto de las medidas para mitigar estos impactos. Esto debe ir acompañado de validación con datos siempre que sea posible (Kuhnert *et al.*, 2010). Adicionalmente, se resalta la importancia de incluir este conocimiento local proveniente de expertos de las comunidades e instituciones para abordar los impactos del cambio climático e identificar medidas de adaptación, como se ha hecho en el presente estudio, así como en estudios similares en Centroamérica (Donatti *et al.*, 2019; Harvey *et al.*, 2018).

El diseño de rutas de adaptación siguió una metodología de base cualitativa y mediante un proceso de codiseño participativo; si bien se tomó la base del enfoque de rutas de adaptación propuesto por Haasnoot *et al.* (2013), no se realizaron modelizaciones para generar los escenarios futuros específicos para el estudio, sino más bien estos fueron obtenidos de análisis de literatura científica. Esto puede limitar la construcción de umbrales y disparadores, pero, a su vez, facilita entender los alcances de la literatura existente bajo un enfoque con potencial de ser replicado en otros sitios.

Además, como parte de este estudio, se construyó una propuesta de umbrales y disparadores pendiente de validar con los actores locales y que puede sentar las bases para preguntas de investigación futuras. Según Di Fant *et al.* (2023), el análisis presentando se sitúa entre un primer nivel de análisis, que emplea métodos cualitativos predominantemente donde se identifica el objetivo y se secuencian al menos dos acciones a lo largo del tiempo; y un tercer nivel basado en Rutas de Políticas Adaptativas Dinámicas (DAPP) de (Haasnoot *et al.*, 2013), donde se usan escenarios transitorios, inclusión de medidas anticipatorias, una secuencia de medidas y el desarrollo de un sistema de seguimiento de los umbrales y disparadores previamente identificados.

Finalmente, alineando esta metodología a los arquetipos de planificación de rutas de adaptación presentados por Di Fant *et al.* (2025), se hallaron similitudes para clasificarla dentro del arquetipo de adaptadores tempranos, cuya metodología emplea análisis exploratorio y desarrollo de rutas en forma narrativa y una transición hacia el arquetipo de adaptadores emergentes. Esto se lleva a cabo al incluir análisis de evaluación para secuenciar medidas de adaptación y empezar a identificar umbrales y disparadores a través de metodologías cualitativas.

Vulnerabilidad del sistema socioecológico

Los resultados mostraron que la cuenca del Monkey River presenta vulnerabilidad al cambio climático, esto coincide con lo mencionado en la literatura, donde Belice está categorizado bajo una vulnerabilidad extrema dentro de la región de América Latina y el Caribe (CAF, 2014). La cuenca media donde se realiza agricultura presentó una capacidad adaptativa que muestra la necesidad de estrategias comunitarias y gobernanza participativa, de manera similar a lo encontrado por Bouroncle *et al.* (2017) en cuatro municipios rurales de Centroamérica (Guatemala, El Salvador, Honduras y Nicaragua), donde las zonas agrícolas con menos recursos para la innovación y acción presentaron baja capacidad adaptativa.

Asimismo, estudios de vulnerabilidad en el Caribe de Belice, Guatemala y Honduras muestran que la zona costera está expuesta a incrementos del nivel del mar, aumento de la intensidad de tormentas y cambios en los patrones de precipitación y temperatura (Nagy *et al.*, 2019; USAID,

2012), donde la presencia de comunidades, ecosistemas sensibles y una baja capacidad adaptativa, los convierten en regiones altamente vulnerables (USAID, 2012; Villamizar *et al.*, 2017). Lo anterior coincide con lo encontrado por Carroll *et al.* (2023) en comunidades costeras en Belice y Bahamas dependientes de la pesca, donde se recomiendan procesos de fortalecimiento de la gobernanza y participación local para fortalecer la capacidad adaptativa y reducir la vulnerabilidad.

En la cuenca de Monkey River, las comunidades no dependen directamente de los recursos naturales locales a través de la agricultura de subsistencia, como los municipios en Centroamérica en el estudio de Bouroncle *et al.* (2017), o de la pesca, como las comunidades pesqueras costeras de Bangladesh, donde la vulnerabilidad se agrava porque los hogares carecen de alternativas económicas distintas a la pesca y la toma de decisiones es limitada (Sultana *et al.*, 2023). En contraste, en Monkey River, las comunidades dependen del empleo en fincas bananeras como principal fuente de ingresos, lo que puede dar una falsa sensación de estabilidad, retrasar la percepción de las amenazas climáticas y debilitar la necesidad de estructuras organizativas limitando la capacidad de implementación de medidas de adaptación. Esto sumado a una abundancia relativa de recursos naturales y una demanda por recursos aún baja, limitaciones económicas, institucionales y organizativas, configuran un contexto de vulnerabilidad latente, lo que concuerda con Adger (2006).

Medidas de respuesta para la adaptación

La gran mayoría de medidas que se identificaron siguen el enfoque de la gestión basada en ecosistemas y contribuyen a mantener servicios ecosistémicos de provisión, regulación y culturales en la cuenca, componentes esenciales para el sustento de la vida (Munang *et al.*, 2011). Algunas de estas incluyeron la implementación de sistemas agroforestales y silvopastoriles, como en estudios similares en Centroamérica (CATIE, 2019; Harvey *et al.*, 2017). Sin embargo, también se identificaron algunas medidas grises, como la construcción de un muro frente al incremento del nivel del mar. Estas medidas grises pueden tener efectos negativos para el medio ambiente, incluidas las emisiones de gases de efecto invernadero, al ser ajena al sistema natural y deben evitarse en la medida de lo posible, tal y como lo menciona van der Meulen *et al.* (2023). En contraste con Reinders y Van Wesenbeeck (2013), no se registraron medidas híbridas que incluyan estructuras rígidas con una mejora ecológica.

En cuanto a la eficacia de las medidas, el presente estudio hizo una evaluación cualitativa del efecto de la medida para reducir los impactos del cambio climático y mantener la provisión de servicios. Los expertos identificaron que medidas como la diversificación de cultivos y variedades resistentes contribuyen a mantener la provisión de alimentos. Esto concuerda con estudios en Centroamérica que indican que medidas similares contribuyen a mantener la producción y seguridad alimentaria (Harvey *et al.*, 2018; Kumar & Singh, 2023). Así también indicaron que medidas como la reforestación y restauración de zonas deforestadas y degradadas pueden contribuir a mantener la disponibilidad de agua en el futuro, esto concuerda con Bruijnzeel (2004) y Chazdon (2008), quienes indican que la recuperación de cobertura contribuye a la provisión sostenida de servicios hídricos. No obstante, difiere con lo indicado por Andréassian (2004) y Farley *et al.* (2005), quienes mencionan que el rendimiento hídrico a menudo disminuye, sobre todo cuando la práctica implica plantaciones de especies exóticas y de rápido crecimiento.

Frente a esto, se resalta la necesidad de incluir sistemas de monitoreo a largo plazo para darle seguimiento a los beneficios y eficacia de las medidas. En concordancia con Muccione *et al.* (2024)

quien menciona la necesidad de avanzar a sistemas robustos de monitoreo diseñados y coordinados de forma intersectorial para lograr una adaptación eficaz.

Rutas de adaptación al cambio climático

El enfoque de rutas de adaptación se aplicó al sistema socioecológico de Monkey River, donde interactúan múltiples sectores (agricultura, ganadería y zona costera) y actores expuestos a una combinación de eventos climáticos y no climáticos, como sequías, inundaciones, deforestación e incremento del nivel del mar. Esto fue posible porque el enfoque transciende el ámbito sectorial utilizado en otros estudios (Cradock-Henry *et al.*, 2020; Haasnoot, Brown, *et al.*, 2019; Haasnoot *et al.*, 2013; Ramm *et al.*, 2018; Stephens *et al.*, 2018), al considerar la complejidad, la incertidumbre y la interdependencia en los sistemas socioecológicos. Aunque no se encontraron estudios en sistemas con dinámicas similares (múltiples sectores dentro del área de estudio), existen ejemplos de su aplicación en sistemas que enfrentan un evento climático determinado como la reducción de agua (Cradock-Henry *et al.*, 2020) o inundaciones por incremento del nivel del mar y mareas extremas (Barnett *et al.*, 2014; Stephens *et al.*, 2018).

En cuanto a las proyecciones climáticas, la revisión de literatura a nivel regional y de país posibilitó elaborar dos escenarios de emisiones moderado y extremo (RCP 4.5 y 8.5, respectivamente) con los posibles impactos en la agricultura, agua, biodiversidad y suelo, así como la construcción de umbrales y disparadores de manera descriptiva. Sin embargo, en el presente estudio no se elaboró algún modelo, lo cual contrasta con estudios donde la metodología incluye modelos específicos para el área de estudio, tales como modelos biofísicos y de cultivos específicos (Cradock-Henry *et al.*, 2020) y modelos de incremento del nivel del mar (Hall *et al.*, 2019; Ramm *et al.*, 2018; Stephens *et al.*, 2018). Esto podría favorecer la construcción de umbrales y disparadores más específicos y medibles en el tiempo, mejorando la capacidad de anticipación ante la necesidad de un cambio de medida.

Con respecto al mapa de rutas elaborado para la zona costera, las rutas identificadas se centraron principalmente en medidas orientadas a diversificar los medios de vida ante una eventual reubicación de la comunidad. No obstante, estas rutas no incorporaron fases preparatorias de reubicación tales como procesos de planificación, fortalecimiento institucional o mecanismos de coordinación previa. Este resultado contrasta con el estudio de Barnett *et al.* (2014), quienes desarrollaron una ruta de adaptación local para el pueblo de Lakes Entrance, en la costa australiana, que sí integró medidas de planificación anticipada, demandas de la población para establecer estructuras institucionales adecuadas, así como líneas claras de responsabilidad y comunicación entre actores y Gobierno.

Asimismo, la construcción de disparadores fue dada con los actores locales en base a los impactos sociales; por ejemplo, afectaciones en los negocios locales, empleos o acceso a bienes y servicios (Barnett *et al.*, 2014). En contraste, el presente estudio propone disparadores basados en proyecciones de incremento del nivel mar, los cuales requieren ser validados y ajustados mediante procesos participativos con los actores del territorio, además de ser complementados con disparadores sociales que reflejen la capacidad de afrontamiento de las comunidades (Stephens *et al.*, 2018).

Por otro lado, los mapas de rutas agrícola y ganadero presentaron medidas productivas que aseguren mantener la producción de alimentos, evitar la pérdida de cultivos y mantener la disponibilidad de agua frente a proyecciones de incrementos de temperatura y disminución de

precipitaciones. Estas medidas están asociadas al manejo agrícola e incluyen la diversificación de cultivos, implementación de variedades resistentes, implementación y manejo de pastos. Las cuales son similares a las identificadas en estudios de rutas de adaptación para la agricultura, como el de Bera *et al.* (2025), que resaltan la utilidad de implementar variedades de cultivos climáticamente eficaces para enfrentar los cambios en temperatura y la falta de precipitación; y el de Cradock-Henry *et al.* (2020), donde se identificaron medidas ligadas al cambio de prácticas de manejo, implementación de nuevas variedades y manejo del suelo para hacer frente a sequías, erosión del suelo y disponibilidad de agua.

Estos mapas de rutas combinan, primero, medidas existentes, como diversificación de cultivos y manejo agrícola. Esto permite dar tiempo para preparar medidas que demandan mayores recursos como la implementación de sistemas agroforestales y silvopastoriles, los cuales den paso a una adaptación transformadora. Lo anterior refuerza la relevancia de combinar medidas tempranas y graduales con acciones transformadoras para la adaptación a largo plazo. Aun así, en concordancia con lo mencionado por Muccione *et al.* (2024), ha de tenerse en cuenta el ritmo de cambio para generar respuestas en el momento crucial sin reducir su eficacia, a fin de evitar que los sistemas queden bloqueados y sin opciones de adaptación. Asimismo, muchas medidas dependen del cambio futuro en la precipitación, por lo que deben ser combinadas con tecnología e infraestructura, así como con medidas de gestión hídrica y evitar la dependencia de riego.

Adicionalmente, las rutas responden a diversos peligros que afectan determinada zona de la cuenca, por ejemplo: sequías en la zona agrícola e inundaciones en la zona costera. En ese sentido, precisa considerar la interacción e interdependencia entre las rutas de adaptación. La complejidad de lo anterior radica en que medidas como la reforestación y restauración de áreas pueden competir con el establecimiento de cultivos para la agricultura en términos de uso de la tierra y agua.

Finalmente, las rutas de adaptación deben considerar las necesidades tanto a corto como a largo plazo, ya que los cambios continuarán e incluso se agravarán en las siguientes décadas, según las proyecciones futuras. También se debe tomar en cuenta que puede darse una dicotomía a largo plazo entre dos rutas, por ejemplo: en la zona costera la elección de construir un muro y restaurar zonas degradadas manteniendo a la comunidad en el sitio, frente a otra ruta que considera la reubicación de la comunidad y restauración de zonas para protección costera; ambas son rutas posibles, aunque la primera se visualiza poco prometedora, debido a que el incremento del nivel del mar seguirá agravándose y, eventualmente, podrá en riesgo a la comunidad.

Con base en los párrafos anteriores, se precisa diseñar rutas de adaptación flexibles y específicas para cada contexto, pero, al mismo tiempo, multidimensionales, considerando la interdependencia dentro del sistema socioecológico, a fin de afrontar eficazmente los crecientes eventos climáticos y sus impactos; reconociendo las incertidumbres, las compensaciones y la interconexión entre los eventos y las respuestas. A su vez, se deben incorporar mecanismos de seguimiento y aprendizaje que ayuden a ajustar las decisiones a lo largo del tiempo y monitorear los umbrales, disparadores, así como las medidas de adaptación y su eficacia en el tiempo.

5. CONCLUSIONES

La presente investigación logró construir, aplicar y validar una metodología participativa de rutas de adaptación al cambio climático que incluyen soluciones basadas en la naturaleza. A través del análisis se comprobó que el enfoque de rutas presentado permite integrar el conocimiento

científico y los saberes locales, organizar decisiones secuenciales y promover acciones flexibles que se ajusten a la incertidumbre de diferentes escenarios de cambio. Además, el enfoque puede ser replicado y ajustado en otros sistemas socioecológicos, lo cual aporta a la planificación adaptativa y a la reducción de la vulnerabilidad.

Las soluciones basadas en la naturaleza se presentan como estrategias potenciales para mitigar impactos del cambio climático y reducir la vulnerabilidad. Estas medidas pueden ser útiles para afrontar uno o más eventos climáticos. Sin embargo, es preciso complementarlas con el monitoreo de su eficacia en el tiempo, marcos de gobernanza y financiamiento adecuado.

La planificación de rutas de adaptación puede ayudar a abordar eficazmente los crecientes eventos climáticos y sus impactos. Este enfoque requiere ser flexible para ir incorporando en el tiempo datos nuevos, conocimientos locales e incertidumbres dentro de un plan de seguimiento continuo de los objetivos, umbrales, disparadores y medidas. Aunado a esto, debe considerar la interacción e interdependencia entre las medidas, así como su implementación en el corto plazo sin perder de vista el largo plazo. Esto debe ir de la mano de políticas y normativas adecuados, toma de decisiones en todos los niveles, acuerdos de gobernanza e intervención oportuna del Gobierno. Esto es aún más importante en comunidades que están más expuestas como las poblaciones costeras y agrícolas, cuyos medios de vida dependen de los ecosistemas y son el sustento diario.

La investigación brinda una base para experimentar y expandir la metodología de rutas de adaptación frente al cambio climático en sistemas socioecológicos de América Latina. Si bien el fortalecimiento de la gobernanza no es una medida en sí, esta funciona como una condición habilitadora en el proceso de adaptación, que permitirá implementar efectivamente las rutas. Por lo que, se recomienda fortalecer los mecanismos participativos de toma de decisiones que integren a las comunidades de la cuenca, instituciones nacionales y organizaciones. Esto permitirá asegurar la sostenibilidad de las rutas de adaptación en el tiempo y un respaldo político y financiero de estas. Asimismo, futuros estudios podrían abordar el análisis de los arreglos institucionales y de políticas existentes, los vacíos de coordinación y las barreras normativas que limitan la adaptación y la adopción de medidas basadas en la naturaleza en el contexto de la cuenca.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Acreman, M., Smith, A., Charters, L., Tickner, D., Opperman, J., Acreman, S., Edwards, F., Sayers, P., & Chivava, F. (2021). Evidence for the effectiveness of nature-based solutions to water issues in Africa. *Environmental Research Letters*, 16(6), 063007. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/AC0210>
- Adger, W. N. (2006). Vulnerability. *Global Environmental Change*, 16(3), 268–281. <https://doi.org/10.1016/J.GLOENVCHA.2006.02.006>
- Alfieri, L., Bisselink, B., Dottori, F., Naumann, G., de Roo, A., Salamon, P., Wyser, K., & Feyen, L. (2017). Global projections of river flood risk in a warmer world. *Earth's Future*, 5(2), 171–182. <https://doi.org/10.1002/2016EF000485>
- Andréassian, V. (2004). Waters and forests: from historical controversy to scientific debate. *Journal of Hydrology*, 291(1–2), 1–27. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2003.12.015>
- Arnell, N. W., Brown, S., Gosling, S. N., Gottschalk, P., Hinkel, J., Huntingford, C., Lloyd-Hughes, B., Lowe, J. A., Nicholls, R. J., Osborn, T. J., Osborne, T. M., Rose, G. A., Smith, P., Wheeler, T. R., & Zelazowski, P. (2016). The impacts of climate change across the globe: A multi-sectoral assessment. *Climatic Change* 2014 134:3, 134(3), 457–474. <https://doi.org/10.1007/S10584-014-1281-2>
- Ballesteros, J., & Pérez, J. (2016). Functional diversity: a key aspect in the provision of ecosystem services. *Revista Colombiana de Ciencia Animal*, 8(1), 94–111. <https://revistas.unisucre.edu.co/index.php/recia/article/view/232/273>
- Barnett, J., Graham, S., Mortreux, C., Fincher, R., Waters, E., & Hurlimann, A. (2014). A local coastal adaptation pathway. *Nature Climate Change* 2014 4:12, 4(12), 1103–1108. <https://doi.org/10.1038/nclimate2383>
- Bednar-Friedl, B., Biesbroek, R., Schmidt, D., Alexander, P., Børshøj, K., Carnicer, J., Georgopoulou, E., Haasnoot, M., Le Cozannet, G., Lionello, P., Lipka, O., Möllmann, C., Muccione, V., Mustonen, T., Piepenburg, D., Pörtner, H., Roberts, D., Tignor, M., Poloczanska, E., ... Rama, B. (2022). Europe (Chapter 13). In: 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. In Ana Mijic (Issue Spain). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844.015>
- Bera, M., Das, S., Dutta, S., & Roy Choudhury, M. (2025). Navigating the Future: Climate Change Impacts, Mitigation Strategies, and Adaptation Pathways in Agriculture. 419–443. https://doi.org/10.1007/978-981-96-2413-3_19
- Bouroncle, C., Imbach, P., Rodríguez-Sánchez, B., Medellín, C., Martínez-Valle, A., & Läderach, P. (2017). Mapping climate change adaptive capacity and vulnerability of smallholder

agricultural livelihoods in Central America: ranking and descriptive approaches to support adaptation strategies. *Climatic Change*, 141(1), 123–137. <https://doi.org/10.1007/S10584-016-1792-0>

Bruijnzeel, L. A. (2004). Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees? *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 104(1), 185–228. <https://doi.org/10.1016/J.AGEE.2004.01.015>

CAF. (2014). Índice de vulnerabilidad y adaptación al cambio climático en la región de América Latina y el Caribe. <https://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/517/caf-indice-vulnerabilidad-cambio-climatico.pdf?sequence=5&isAllowed=y>

Carroll, G., Eurich, J. G., Sherman, K. D., Glazer, R., Braynen, M. T., Callwood, K. A., Castañeda, A., Dahlgren, C., Karr, K. A., Kleisner, K. M., Burns-Perez, V., Poon, S. E., Requena, N., Sho, V., Tate, S. N., & Haukebo, S. (2023). A participatory climate vulnerability assessment for recreational tidal flats fisheries in Belize and The Bahamas. *Frontiers in Marine Science*, 10, 1177715. <https://doi.org/10.3389/FMARS.2023.1177715>

Castellanos, E., Lemos, M. F., Astigarraga, L., Chacón, N., Cuvi, N., Huggel, C., Miranda, L., Moncassim Vale, M., Ometto, J. P., Peri, P. L., Postigo, J. C., Ramajo, L., Roco, L., Rusticucci, M., Pörtner, H.-O., Roberts, D. C., Tignor, M., Poloczanska, E. S., Mintenbeck, K., ... Rama, B. (2022). Central and South America. In: 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. Polo.... Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844.014>

CATIE. (2019). Nature-based solutions: Experiences and opportunities in agricultural landscapes in Latin America and the Caribbean.

Cepal. (2013). Impactos Potenciales del Cambio Climático sobre los Granos Básicos en Centroamérica. <https://archivo.cepal.org/pdfs/Mexico/2013/M20130042.pdf>

Cepal. (2018). Climate Change in Central America: Potential Impacts and Public Policy Options. 1–176. <https://www.cepal.org/en/publications/39150-climate-change-central-america-potential-impacts-and-public-policy-options>

Chausson, A., Turner, B., Seddon, D., Chabaneix, N., Girardin, C. A. J., Kapos, V., Key, I., Roe, D., Smith, A., Woroniecki, S., & Seddon, N. (2020). Mapping the effectiveness of nature-based solutions for climate change adaptation. *Global Change Biology*, 26(11), 6134–6155. <https://doi.org/10.1111/GCB.15310>

Chazdon, R. L. (2008). Beyond deforestation: Restoring forests and ecosystem services on degraded lands. *Science*, 320(5882), 1458–1460. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.1155365>

- Cisneros-Saguilán, P., Hernández-Salinas, G., Hernández, M. H., Cisneros-Saguilán, P., Hernández-Salinas, G., & Hernández, M. H. (2024). Silvopastoral systems, an alternative to mitigate the impact of climate change on livestock. *Idesia (Arica)*, 42(2), 51–58. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292024000200051>
- Cohen-Shacham, E., Andrade, A., Dalton, J., Dudley, N., Jones, M., Kumar, C., Maginnis, S., Maynard, S., Nelson, C. R., Renaud, F. G., Welling, R., & Walters, G. (2019). Core principles for successfully implementing and upscaling Nature-based Solutions. *Environmental Science & Policy*, 98, 20–29. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSCI.2019.04.014>
- Cohen-Shacham, E., Walters, G., Janzen, C., & Maginnis, S. (2016a). Nature-based Solutions to address global societal challenges. In *Nature-based solutions to address global societal challenges*. IUCN International Union for Conservation of Nature. <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2016.13.EN>
- Colloff, M. J., Doherty, M. D., Lavorel, S., Dunlop, M., Wise, R. M., & Prober, S. M. (2016). Adaptation services and pathways for the management of temperate montane forests under transformational climate change. *Climatic Change*, 138(1–2), 267–282. <https://doi.org/10.1007/S10584-016-1724-Z>
- Cradock-Henry, N. A., Blackett, P., Hall, M., Johnstone, P., Teixeira, E., & Wreford, A. (2020). Climate adaptation pathways for agriculture: Insights from a participatory process. *Environmental Science & Policy*, 107, 66–79. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSCI.2020.02.020>
- Cradock-Henry, N. A., Frame, B., Preston, B. L., Reisinger, A., & Rothman, D. S. (2018). Dynamic adaptive pathways in downscaled climate change scenarios. *Climatic Change*, 150(3–4), 333–341. <https://doi.org/10.1007/S10584-018-2270-7>
- Di Fant, V., Middelkoop, H., Dunn, F. E., & Haasnoot, M. (2025). Supporting adaptive pathways planning using archetypes for climate adaptation. *Regional Environmental Change* 2025 25:1, 25(1), 1–18. <https://doi.org/10.1007/S10113-024-02349-7>
- Di Fant, V., Warren, A., & De Bruin, K. (2023). D6.2-Methodologies for adaptation pathways formulation.
- Dijk, V., Godfroy, R., Nadeu, E., & Muro, M. (2024). Increasing climate change resilience through sustainable agricultural practices Evidence for wheat, potatoes, and olives.
- Döbert, T. F., Bork, E. W., Apfelbaum, S., Carlyle, C. N., Chang, S. X., Khatri-Chhetri, U., Silva Sobrinho, L., Thompson, R., & Boyce, M. S. (2021). Adaptive multi-paddock grazing improves water infiltration in Canadian grassland soils. *Geoderma*, 401, 115314. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2021.115314>

- Dobhal, S., Kumar, R., Bhardwaj, A. K., Chavan, S. B., Uthappa, A. R., Kumar, M., Singh, A., Jinger, D., Rawat, P., Handa, A. K., & Ramawat, N. (2024). Global assessment of production benefits and risk reduction in agroforestry during extreme weather events under climate change scenarios. *Frontiers in Forests and Global Change*, 7, 1379741. <https://doi.org/10.3389/FFGC.2024.1379741>
- Donatti, C. I., Harvey, C. A., Martinez-Rodriguez, M. R., Vignola, R., & Rodriguez, C. M. (2019). Vulnerability of smallholder farmers to climate change in Central America and Mexico: current knowledge and research gaps. *Climate and Development*, 11(3), 264–286. <https://doi.org/10.1080/17565529.2018.1442796>
- ECLAC. (2010). The Economics of Climate Change in Central America: Summary 2010. <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/8c03b8e0-524c-4550-810ca6c563bab4f9/content>
- Eekhout, J. P. C., & de Vente, J. (2022). Global impact of climate change on soil erosion and potential for adaptation through soil conservation. *Earth-Science Reviews*, 226, 103921. <https://doi.org/10.1016/J.EARSCIREV.2022.103921>
- Engle, N. L., de Bremond, A., Malone, E. L., & Moss, R. H. (2014). Towards a resilience indicator framework for making climate-change adaptation decisions. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 19(8), 1295–1312. <https://doi.org/10.1007/S11027-013-9475-X>
- Esselman, P. (2001). Estudio de referencia del río Monkey: investigación básica y aplicada para el monitoreo y la evaluación en el sur de Belice [recurso electrónico]. https://www.researchgate.net/publication/36219720_TheMonkey_River_baseline_study_basic_and_applied_research_for_monitoring_and_assessment_in_southern_Belize_electronic_resource
- Fahad, S., Chavan, S. B., Chichaghare, A. R., Uthappa, A. R., Kumar, M., Kakade, V., Pradhan, A., Jinger, D., Rawale, G., Yadav, D. K., Kumar, V., Farooq, T. H., Ali, B., Sawant, A. V., Saud, S., Chen, S., & Poczai, P. (2022). Agroforestry Systems for Soil Health Improvement and Maintenance. *Sustainability 2022, Vol. 14, Page 14877*, 14(22), 14877. <https://doi.org/10.3390/SU142214877>
- Farley, K. A., Jobbágy, E. G., & Jackson, R. B. (2005). Effects of afforestation on water yield: A global synthesis with implications for policy. *Global Change Biology*, 11(10), 1565–1576. <https://doi.org/10.1111/J.1365-2486.2005.01011.X>
- Feeley, K. J., & Silman, M. R. (2010). Biotic attrition from tropical forests correcting for truncated temperature niches. *Global Change Biology*, 16(6), 1830–1836. <https://doi.org/10.1111/J.1365-2486.2009.02085>.

- Flora, C., Flora, J., & Gasteyer, S. (2016). *Rural Communities: Legacy + Change* (5th ed.). <https://www.routledge.com/Rural-Communities-Legacy--Change/Flora-Flora-Gasteyer/p/book/9780813349718>
- Folke, C., Carpenter, S. R., Walker, B., Scheffer, M., Chapin, T., & Rockstrom, J. (2010). Resilience Thinking: Integrating Resilience, Adaptability and Transformability.
- Folke, C., Hahn, T., Olsson, P., & Norberg, J. (2005). Adaptive governance of social-ecological systems. *Annu. Rev. Environ. Resour.*, 30, 441–473. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.30.050504.144511>
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., & Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations - A new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, 2(1), 1–21. <https://doi.org/10.1038/SDATA.2015.66>
- Ghaffariyan, M. R. (2025). Silvopastoral systems as a strategy for drought resilience: A short international review. *Silva Balcanica* 26(1): 33-41, 26(1), 33–41. <https://doi.org/10.3897/SILVABALCANICA.26.E127074>
- Graham, S., Barnett, J., Fincher, R., Hurlimann, A., & Mortreux, C. (2014). Local values for fairer adaptation to sea-level rise: A typology of residents and their lived values in Lakes Entrance, Australia. *Global Environmental Change*, 29, 41–52. <https://doi.org/10.1016/J.GLOENVCHA.2014.07.013>
- Gutiérrez, J. (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 ed V Masson-Delmotte et al. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- Haasnoot, M., Brown, S., Scussolini, P., Jimenez, J. A., Vafeidis, A. T., & Nicholls, R. J. (2019). Generic adaptation pathways for coastal archetypes under uncertain sea-level rise. *Environmental Research Communications*, 1(7), 071006. <https://doi.org/10.1088/2515-7620/AB1871>
- Haasnoot, M., Kwakkel, J. H., Walker, W. E., & ter Maat, J. (2013). Dynamic adaptive policy pathways: A method for crafting robust decisions for a deeply uncertain world. *Global Environmental Change*, 23(2), 485–498. <https://doi.org/10.1016/J.GLOENVCHA.2012.12.006>
- Haasnoot, M., Middelkoop, H., Offermans, A., van Beek, E., & van Deursen, W. P. A. (2012). Exploring pathways for sustainable water management in river deltas in a changing environment. *Climatic Change*, 115(3–4), 795–819. <https://doi.org/10.1007/S10584-012-0444-2>

- Haasnoot, M., Warren, A., & Kwakkel, J. H. (2019). Dynamic Adaptive Policy Pathways (DAPP). *Decision Making under Deep Uncertainty: From Theory to Practice*, 71–92. https://doi.org/10.1007/978-3-030-05252-2_4
- Hagen, I., Huggel, C., Ramajo, L., Chacón, N., Ometto, J. P., Postigo, J. C., & Castellanos, E. J. (2022). Climate change-related risks and adaptation potential in Central and South America during the 21st century. *Environmental Research Letters*, 17(3), 033002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/AC5271>
- Hall, J. W., Harvey, H., & Manning, L. J. (2019). Adaptation thresholds and pathways for tidal flood risk management in London. *Climate Risk Management*, 24, 42–58. <https://doi.org/10.1016/J.CRM.2019.04.001>
- Hannah, L., Donatti, C. I., Harvey, C. A., Alfaro, E., Rodriguez, D. A., Bouroncle, C., Castellanos, E., Diaz, F., Fung, E., Hidalgo, H. G., Imbach, P., Läderach, P., Landrum, J. P., & Solano, A. L. (2017). Regional modeling of climate change impacts on smallholder agriculture and ecosystems in Central America. *Climatic Change* 141:1, 141(1), 29–45. <https://doi.org/10.1007/S10584-016-1867-Y>
- Harvey, C. A., Martínez-Rodríguez, M. R., Cárdenas, J. M., Avelino, J., Rapidel, B., Vignola, R., Donatti, C. I., & Vilchez-Mendoza, S. (2017). The use of Ecosystem-based Adaptation practices by smallholder farmers in Central America. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 246, 279–290. <https://doi.org/10.1016/J.AGEE.2017.04.018>
- Harvey, C. A., Saborio-Rodríguez, M., Martinez-Rodríguez, M. R., Viguera, B., Chain-Guadarrama, A., Vignola, R., & Alpizar, F. (2018). Climate change impacts and adaptation among smallholder farmers in Central America. *Agriculture and Food Security*, 7(1), 1–20. <https://doi.org/10.1186/S40066-018-0209-X>
- Herrera-Franco, G., Morante-Carballo, F., Bravo-Montero, Lady, Valencia-Robles, J., Aguilar-Aguilar, M., Martos-Rosillo, S., & Carrión-Mero, P. (2024). Water Sowing and Harvesting (WS&H) for Sustainable Management in Ecuador: A Review. *Heritage*, 7(7), 3696–3718. <https://doi.org/10.3390/HERITAGE7070175>
- Hidalgo, H. G., Amador, J. A., Alfaro, E. J., & Quesada, B. (2013). Hydrological climate change projections for Central America. *Journal of Hydrology*, 495, 94–112. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2013.05.004>
- Hirabayashi, Y., Tanoue, M., Sasaki, O., Zhou, X., & Yamazaki, D. (2021). Global exposure to flooding from the new CMIP6 climate model projections. *Scientific Reports* 2021 11:1, 11(1), 1–7. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-83279-w>
- Hodson de Jaramillo, E., Trigo, E. J., & Campos, R. (2023). The Role of Science, Technology and Innovation for Transforming Food Systems in Latin America and the Caribbean. *Science and*

Innovations for Food Systems Transformation, 737–749. https://doi.org/10.1007/978-3-031-15703-5_38

Hoegh-Guldberg, O., Jacob, D., Taylor, M., Guillén Bolaños, T., Bindi, M., Brown, S., Camilloni, I. A., Diedhiou, A., Djalante, R., Ebi, K., Engelbrecht, F., Guiot, J., Hijioka, Y., Mehrotra, S., Hope, C. W., Payne, A. J., Pörtner, H. O., Seneviratne, S. I., Thomas, A., ... Zhou, G. (2019). The human imperative of stabilizing global climate change at 1.5°C. *Science*, 365(6459). <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.AAW6974>

IIASA. (2023). Population and Human Capital Projections (SSP 2023) | IIASA. <https://iiasa.ac.at/models-tools-data/ssp-2023>

IISD. (2025). Climate Risk Profile: Belize CAPA REPORT Climate Adaptation and Protected Areas (CAPA) Initiative. <https://www.iisd.org/capa>.

Imbach, A. C. (2016). Estrategias de vida. Analizando las conexiones entre la satisfacción de las necesidades humanas fundamentales y los recursos de las comunidades rurales (Primera Edición). Geolatina S.A. https://www.academia.edu/25974254/ESTRATEGIAS_DE_VIDA

Imbach, A. C., Bouroncle, C., Díaz Briones, A. A., Zamora Trejos, A., Urueña Márquez, O., Aragón Merma, O., Colque Aguilar, B. L. P., Blas, R., Prado, P., Girón Solórzano, E. R., Imbach, P. A., & Medellín M., C. (2015). La construcción de estrategias locales de adaptación al cambio climático: una propuesta desde el enfoque de medios de vida. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/8204>

Imbach, P., Beardsley, M., Bouroncle, C., Medellin, C., Läderach, P., Hidalgo, H., Alfaro, E., Van Etten, J., Allan, R., Hemming, D., Stone, R., Hannah, L., & Donatti, C. I. (2017). Climate change, ecosystems and smallholder agriculture in Central America: an introduction to the special issue. *Climatic Change*, 141(1), 1–12. <https://doi.org/10.1007/S10584-017-1920-5>

Imbach, P., Chou, S. C., Lyra, A., Rodrigues, D., Rodriguez, D., Latinovic, D., Siqueira, G., Silva, A., Garofolo, L., & Georgiou, S. (2018). Future climate change scenarios in Central America at high spatial resolution. *PLOS ONE*, 13(4), e0193570. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0193570>

Imbach, P., Molina, L., Locatelli, B., Roupsard, O., Mahé, G., Neilson, R., Corrales, L., Scholze, M., & Ciais, P. (2012). Modeling Potential Equilibrium States of Vegetation and Terrestrial Water Cycle of Mesoamerica under Climate Change Scenarios. *Journal of Hydrometeorology*, 13(2), 665–680. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-11-023.1>

IPBES. (2019). Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. 1–1148. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.6417333>

IPCC. (2001). Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

IPCC. (2007). Climate Change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

IPCC. (2014). Climate Change 2014 Impacts, Adaptation, and Vulnerability Part A: Global and Sectoral Aspects Working Group II Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WGIIAR5-PartA_FINAL.pdf

IPCC. (2018). Global warming of 1.5°C. An IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty.

IPCC. (2022a). Annex II: Glossary. In: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Philippus Wester. <https://doi.org/10.1017/9781009325844.029>

IPCC. (2022b). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report.

IPCC. (2022c). IPCC WGII Sixth Assessment Report Chapter 12: Central and South America.

IPCC. (2022d). Summary for Policymakers. In: Pörtner H-O, Roberts DC, Poloczanska ES, Mintenbeck K, Tignor M, Alegría A, Craig M, Langsdorf S, Löschke S, Möller V, Okem A (eds) Climate Change 2022: impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of working group II to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. In *Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844.001>

IPCC. (2023). Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. 35–115. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>

Joshi, A., Kale, S., Chandel, S., & Pal, D. K. (2015). Likert Scale: Explored and Explained. *Current Journal of Applied Science and Technology*, 7(4), 396–403. <https://doi.org/10.9734/BJAST/2015/14975>

- Kay, S., Rega, C., Moreno, G., den Herder, M., Palma, J. H. N., Borek, R., Crous-Duran, J., Freese, D., Giannitsopoulos, M., Graves, A., Jäger, M., Lamersdorf, N., Memedemin, D., Mosquera-Losada, R., Pantera, A., Paracchini, M. L., Paris, P., Roces-Díaz, J. V., Rolo, V., ... Herzog, F. (2019). Agroforestry creates carbon sinks whilst enhancing the environment in agricultural landscapes in Europe. *Land Use Policy*, 83, 581–593. <https://doi.org/10.1016/J.LANDUSEPOL.2019.02.025>
- Key, I. B., Smith, A. C., Turner, B., Chausson, A., Girardin, C. A. J., Macgillivray, M., & Seddon, N. (2022). Biodiversity outcomes of nature-based solutions for climate change adaptation: Characterising the evidence base. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 905767. <https://doi.org/10.3389/FENVS.2022.905767>
- Kharel, G., Dhakal, M., Deb, S. K., Slaughter, L. C., Simpson, C., & West, C. P. (2023). Effect of Long-Term Semiarid Pasture Management on Soil Hydraulic and Thermal Properties. *Plants*, 12(7), 1491. <https://doi.org/10.3390/PLANTS12071491>
- Kumar, A., & Singh, B. (2023). The Role of Agronomic Interventions in Mitigating Climate Change Impacts on Crop Growth and Yield. *Plant Science Review*, 4(1), 29–35. <https://doi.org/10.51470/PSR.2023.04.01.29>
- Kuyah, S., Whitney, C. W., Jonsson, M., Sileshi, G. W., Öborn, I., Muthuri, C. W., & Luedeling, E. (2019). Agroforestry delivers a win-win solution for ecosystem services in sub-Saharan Africa. A meta-analysis. *Agronomy for Sustainable Development*, 39(5), 1–18. <https://doi.org/10.1007/S13593-019-0589-8>
- Kwadijk, J. C. J., Haasnoot, M., Mulder, J. P. M., Hoogvliet, M. M. C., Jeuken, A. B. M., van der Krogt, R. A. A., van Oostrom, N. G. C., Schelfhout, H. A., van Velzen, E. H., van Waveren, H., & de Wit, M. J. M. (2010). Using adaptation tipping points to prepare for climate change and sea level rise: a case study in the Netherlands. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 1(5), 729–740. <https://doi.org/10.1002/WCC.64>
- Kwakkel, J. H., Haasnoot, M., & Walker, W. E. (2016). Comparing Robust Decision-Making and Dynamic Adaptive Policy Pathways for model-based decision support under deep uncertainty. *Environmental Modelling & Software*, 86, 168–183. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSOFT.2016.09.017>
- Lalonde, M., Drenkhan, F., Rau, P., Baiker, J. R., & Buytaert, W. (2024). Scientific evidence of the hydrological impacts of nature-based solutions at the catchment scale. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 11(5), e1744. <https://doi.org/10.1002/WAT2.1744>
- Lansing, J. S. (2003). Complex adaptive systems. *Annual Review of Anthropology*, 32(Volume 32, 2003), 183–204. <https://doi.org/10.1146/ANNUREV.ANTHRO.32.061002.093440>

- Leimbach, M., Kriegler, E., Roming, N., & Schwanitz, J. (2017). Future growth patterns of world regions – A GDP scenario approach. *Global Environmental Change*, 42, 215–225. <https://doi.org/10.1016/J.GLOENVCHA.2015.02.005>
- Likert, R. (1932). A technique for the measurement of attitudes. *Archives of Psychology* (2nd ed., Vol. 140).
- Lyra, A., Imbach, P., Rodriguez, D., Chou, S. C., Georgiou, S., & Garofolo, L. (2017). Projections of climate change impacts on central America tropical rainforest. *Climatic Change* 2016 141:1, 141(1), 93–105. <https://doi.org/10.1007/S10584-016-1790-2>
- Magrin, G. O., Marengo, J. A., Boulanger, J.-P., Buckeridge, M. S., Castellanos, E., Alfaro, E., Anthelme, F., Barton, J., Becker, N., Bertrand, A., Confalonieri, U., Pereira de Souza, A., Demiguel, C., Francou, B., Garreaud, R., Losada, I., McField, M., Nobre, C., Romero Lankao, P., ... White, L. (2014). 27 Central and South America Coordinating Lead Authors: Lead Authors: Contributing Authors: Review Editors: to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M. I., Matthews, J. B. R., Berger, S., Huang, M., Yelekçi, O., Yu, R., Zhou, B., Lonnoy, E., Maycock, T. K., Waterfield, T., Leitzell, K., & Caud, N. (2021). Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Edited by. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- MEA, M. E. A. (2005a). Ecosystems and Human Well-being: Biodiversity Synthesis. <https://www.millenniumassessment.org/documents/document.354.aspx.pdf>
- MEA, M. E. A. (2005b). Ecosystems and Human Well-being: Current State and Trends. <https://www.millenniumassessment.org/en/Condition.html>
- Metternicht, G., Sabelli, A., & Spensley, J. (2014). Climate change vulnerability, impact and adaptation assessmentLessons from Latin America. *International Journal of Climate Change Strategies and Management*, 6(4), 442–476. <https://doi.org/10.1108/IJCCSM-06-2013-0076>
- Meza-Herrera, C. A., Navarrete-Molina, C., Luna-García, L. A., Pérez-Marín, C., Altamirano-Cárdenas, J. R., Macías-Cruz, U., de la Peña, C. G., & Abad-Zavaleta, J. (2022). Small ruminants and sustainability in Latin America & the Caribbean: Regionalization, main production systems, and a combined productive, socio-economic & ecological footprint quantification. *Small Ruminant Research*, 211, 106676. <https://doi.org/10.1016/J.SMALLRUMRES.2022.106676>
- Muccione, V., Haasnoot, M., Alexander, P., Bednar-Friedl, B., Biesbroek, R., Georgopoulou, E., Le Cozannet, G., & Schmidt, D. N. (2024). Adaptation pathways for effective responses to climate change risks. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 15(4), e883. <https://doi.org/10.1002/WCC.883>

- Munang, R. T., Thiaw, I., & Rivington, M. (2011). Ecosystem Management: Tomorrow's Approach to Enhancing Food Security under a Changing Climate. *Sustainability* 2011, Vol. 3, Pages 937-954, 3(7), 937–954. <https://doi.org/10.3390/SU3070937>
- Nagy, G. J., Gutiérrez, O., Brugnoli, E., Verocai, J. E., Gómez-Erache, M., Villamizar, A., Olivares, I., Azeiteiro, U. M., Leal Filho, W., & Amaro, N. (2019). Climate vulnerability, impacts and adaptation in Central and South America coastal areas. *Regional Studies in Marine Science*, 29, 100683. <https://doi.org/10.1016/J.RSMA.2019.100683>
- Narayan, S., Beck, M. W., Reguero, B. G., Losada, I. J., Van Wesenbeeck, B., Pontee, N., Sanchirico, J. N., Ingram, J. C., Lange, G. M., & Burks-Copes, K. A. (2016). The Effectiveness, Costs and Coastal Protection Benefits of Natural and Nature-Based Defences. *PLOS ONE*, 11(5), e0154735. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0154735>
- Navarro, C. (2023). Impacto del cambio climático sobre cultivos relevantes de Centroamérica, este de México y el Caribe [University of Salzburg]. https://issuu.com/unigis_latina/docs/106855
- Netti, A. M., Abdelwahab, O. M. M., Datola, G., Ricci, G. F., Damiani, P., Oppio, A., & Gentile, F. (2024). Assessment of nature-based solutions for water resource management in agricultural environments: a stakeholders' perspective in Southern Italy. *Scientific Reports*, 14(1), 1–18. <https://doi.org/10.1038/S41598-024-76346-5>
- OECD. (2020). Nature-based solutions for adapting to water-related climate risks.
- Ostrom, E. (2007). A diagnostic approach for going beyond panaceas. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104(39), 15181–15187. <https://doi.org/10.1073/PNAS.0702288104>
- Palomo, I., Locatelli, B., Otero, I., Colloff, M., Crouzat, E., Cuni-Sánchez, A., Gómez-Bagethun, E., González-García, A., Grêt-Regamey, A., Jiménez-Aceituno, A., Martín-López, B., Pascual, U., Zafra-Calvo, N., Bruley, E., Fischborn, M., Metz, R., & Lavorel, S. (2021). Assessing nature-based solutions for transformative change. *One Earth*, 4(5), 730–741. <https://doi.org/10.1016/J.ONEEAR.2021.04.013>
- Parmesan, C., Morecroft, M. D., Trisurat, Y., Adrian, R., Anshari, G. Z., Arneth, A., Gao, Q., Gonzalez, P., Harris, R., Price, J., Stevens, N., & Talukdarr, G. H. (2022). Terrestrial and Freshwater Ecosystems and Their Services. In: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In *Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844.004>
- Penning, E., Burgos, R. P., Mens, M., Dahm, R., & Bruijn, K. de. (2023). Nature-based solutions for floods AND droughts AND biodiversity: Do we have sufficient proof of their functioning? *Cambridge Prisms: Water*, 1, e11. <https://doi.org/10.1017/WAT.2023.12>

Pörtner, H. O., Scholes, R. J., Arneth, A., Barnes, D. K. A., Burrows, M. T., Diamond, S. E., Duarte, C. M., Kiessling, W., Leadley, P., Managi, S., McElwee, P., Midgley, G., Ngo, H. T., Obura, D., Pascual, U., Sankaran, M., Shin, Y. J., & Val, A. L. (2023). Overcoming the coupled climate and biodiversity crises and their societal impacts. *Science*, 380(6642). <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.ABL4881>

Prober, S. M., Colloff, M. J., Abel, N., Crimp, S., Doherty, M. D., Dunlop, M., Eldridge, D. J., Gorddard, R., Lavorel, S., Metcalfe, D. J., Murphy, H. T., Ryan, P., & Williams, K. J. (2017). Informing climate adaptation pathways in multi-use woodland landscapes using the values-rules-knowledge framework. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 241, 39–53. <https://doi.org/10.1016/J.AGEE.2017.02.021>

Ramm, T. D., Watson, C. S., & White, C. J. (2018). Strategic adaptation pathway planning to manage sea-level rise and changing coastal flood risk. *Environmental Science & Policy*, 87, 92–101. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSCI.2018.06.001>

Ranasinghe, R., Ruane, A. C., Vautard, R., Arnell, N., Coppola, E., Cruz, F. A., Dessai, S., Saiful Islam, A. K. M., Rahimi, M., Carrascal, D. R., Sillmann, J., Sylla, M. B., Tebaldi, C., Wang, W., & Zaaboul, R. (2021). Climate change information for regional impact and for risk assessment. *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis*, 1767–1926. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.014>

Ranger, N., Reeder, T., & Lowe, J. (2013). Addressing ‘deep’ uncertainty over long-term climate in major infrastructure projects: four innovations of the Thames Estuary 2100 Project. *EURO Journal on Decision Processes*, 1(3–4), 233–262. <https://doi.org/10.1007/S40070-013-0014-5>

Reguero, B. G., Losada, I. J., Díaz-Simal, P., Méndez, F. J., & Beck, M. W. (2015). Effects of Climate Change on Exposure to Coastal Flooding in Latin America and the Caribbean. *PLOS ONE*, 10(7), e0133409. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0133409>

Reinders, J., & Van Wesenbeeck, B. (2013). Eco-engineering in the Netherlands. Soft interventions with a solid impact.

Riahi, K., van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S., Bauer, N., Calvin, K., Dellink, R., Fricko, O., Lutz, W., Popp, A., Cuaresma, J. C., KC, S., Leimbach, M., Jiang, L., Kram, T., Rao, S., Emmerling, J., ... Tavoni, M. (2017). The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change*, 42, 153–168. <https://doi.org/10.1016/J.GLOENVCHA.2016.05.009>

Rolo, V., Rivest, D., Maillard, É., & Moreno, G. (2023). Agroforestry potential for adaptation to climate change: A soil-based perspective. *Soil Use and Management*, 39(3), 1006–1032. <https://doi.org/10.1111/SUM.12932>

Ruangpan, L., Vojinovic, Z., Di Sabatino, S., Leo, L. S., Capobianco, V., Oen, A. M. P., McClain, M. E., & Lopez-Gunn, E. (2020). Nature-based solutions for hydro-meteorological risk reduction: a state-of-the-art review of the research area. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(1), 243–270. <https://doi.org/10.5194/NHESS-20-243-2020>

Santos, E. (2025). Nature-Based Solutions for Water Management in Europe: What Works, What Does Not, and What's Next? *Water* 2025, Vol. 17, Page 2193, 17(15), 2193. <https://doi.org/10.3390/W17152193>

Seddon, N. (2022). Harnessing the potential of nature-based solutions for mitigating and adapting to climate change. *Science*, 376(6600), 1400–1416. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.ABN9668>

Seddon, N., Chausson, A., Berry, P., Girardin, C. A. J., Smith, A., & Turner, B. (2020). Understanding the value and limits of nature-based solutions to climate change and other global challenges. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 375(1794). <https://doi.org/10.1098/RSTB.2019.0120>

Seddon, N., Smith, A., Smith, P., Key, I., Chausson, A., Girardin, C., House, J., Srivastava, S., & Turner, B. (2021). Getting the message right on nature-based solutions to climate change. *Global Change Biology*, 27(8), 1518–1546. <https://doi.org/10.1111/GCB.15513>

Simpson, N. P., Williams, P. A., Mach, K. J., Berrang-Ford, L., Biesbroek, R., Haasnoot, M., Segnon, A. C., Campbell, D., Musah-Surugu, J. I., Joe, E. T., Nunbogu, A. M., Sabour, S., Meyer, A. L. S., Andrews, T. M., Singh, C., Siders, A. R., Lawrence, J., van Aalst, M., & Trisos, C. H. (2023). Adaptation to compound climate risks: A systematic global stocktake. *IScience*, 26(2), 105926. <https://doi.org/10.1016/J.ISCI.2023.105926>

Singh, A. (2022). Vulnerability and Livelihood Assessment of the Fisheries Sector and Coastal Areas of Belize.

Statistical Institute of Belize (SIB). (2022). *Census / Statistical Institute of Belize*. <https://sib.org.bz/census/2022-census/>

Stephens, S. A., Bell, R. G., & Lawrence, J. (2018). Developing signals to trigger adaptation to sea-level rise. *Environmental Research Letters*, 13(10), 104004. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/AADF96>

Stewart, A. (2006). Guía rápida para misiones. Analizar las instituciones locales y los medios de vida. In E. Crowley (Ed.), *ROMA*. Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación. <http://www.fao.org/3/a0273s/a0273s00.htm#Contents>

Suber, M., Gutierrez Beltrán, N., Felipe Torres, C., David Turriago, J., Arango, J., Romina Banegas, N., Berndt, A., Margarel Bidó, D., Burghi, V., Cardenas Bautista, D., Cañada, P., Antonio Canu, F., Rita Chacón, A., Chacón Navarro, M., Chará, J., Díaz, L., Huamán Fuertes,

- E., Galbusera, S., Gutierrez Solis, J., ... Woo Poquioma, N. (2019). Mitigación con Sistemas Silvopastoriles en Latinoamérica: Aportes para la incorporación en los sistemas de Medición Reporte y Verificación bajo la CMNUCC Working Paper No. 254 CGIAR Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS). www.cgiar.org.
- Sultana, R., Irfanullah, H. M., Selim, S. A., & Alam, M. S. (2023). Social-ecological vulnerability to climate change and risk governance in coastal fishing communities of Bangladesh. *Frontiers in Marine Science*, 10, 1174659. <https://doi.org/10.3389/FMARS.2023.1174659>
- Taylor, M. A., Clarke, L. A., Centella, A., Bezanilla, A., Stephenson, T. S., Jones, J. J., Campbell, J. D., Vichot, A., & Charlery, J. (2018). Future Caribbean Climates in a World of Rising Temperatures: The 1.5 vs 2.0 Dilemma. *Journal of Climate*, 31(7), 2907–2926. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0074.1>
- Teague, R., & Kreuter, U. (2020). Managing Grazing to Restore Soil Health, Ecosystem Function, and Ecosystem Services. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4, 534187. <https://doi.org/10.3389/FSUFS.2020.534187>
- Turner, B., Devisscher, T., Chabaneix, N., Woroniecki, S., Messier, C., & Seddon, N. (2022). The Role of Nature-Based Solutions in Supporting Social-Ecological Resilience for Climate Change Adaptation. *Annual Review of Environment and Resources*, 47(Volume 47, 2022), 123–148. <https://doi.org/10.1146/ANNUREV-ENVIRON-012220-010017>
- UNDP. (2014). Assessment of Groundwater Resources in the Southern Coastal Water Province of Belize Referred to as Savannah Groundwater Province Final Report Volume A: Vol. A. www.geomedia.cz
- USDA, & CATIE. (2023). Assessment of agricultural resilience under climate change and its relation to food insecurity and migration in the Northern Triangle of Central America. <https://www.climatehubs.usda.gov/sites/default/files/ASSESSMENT%20OF%20AGRICULTURAL%20RESILIENCE%20UNDER%20CLIMATE%20CHANGE%20AND%20ITS%20RELATION%20TO%20FOOD%20INSECURITY%20AND%20MIGRATION%20INTHE%20NORTHERN%20TRIANGLE%20OF%20CENTRAL%20AMERICA.pdf>
- USAID. (2012). Vulnerability analysis to climate change in the Caribbean Belize, Guatemala and Honduras. <https://research.fit.edu/media/site-specific/researchfitedu/coast-climate-adaptation-library/latin-america-and-caribbean/central-america/USAID.--Vulnerability-Analysis-to-CC-in-the-Caribbean,-Belize,-Guatemala--Honduras..pdf>
- van der Meulen, F., IJff, S., & van Zetten, R. (2023). Nature-based solutions for coastal adaptation management, concepts and scope, an overview. *Nordic Journal of Botany*, 2023(1). <https://doi.org/10.1111/NJB.03290>
- Varma, V., & Bebber, D. P. (2019). Climate change impacts on banana yields around the world. *Nature Climate Change*, 9(10), 752. <https://doi.org/10.1038/S41558-019-0559-9>

- Veldkamp, T. I. E., Wada, Y., Aerts, J. C. J. H., & Ward, P. J. (2016). Towards a global water scarcity risk assessment framework: incorporation of probability distributions and hydro-climatic variability. *Environmental Research Letters*, 11(2), 024006. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/2/024006>
- Vervoort, J. M., Thornton, P. K., Kristjanson, P., Förch, W., Ericksen, P. J., Kok, K., Ingram, J. S. I., Herrero, M., Palazzo, A., Helfgott, A. E. S., Wilkinson, A., Havlík, P., Mason-D'Croz, D., & Jost, C. (2014). Challenges to scenario-guided adaptive action on food security under climate change. *Global Environmental Change*, 28, 383–394. <https://doi.org/10.1016/J.GLOENVCHA.2014.03.001>
- Vigerstol, K., Gibson, K., Magero, C., & Massey-Bierman, M. (2024). *Nature-based Solutions for Drought Resilience Policy Brief*.
- Villamizar, A., Gutiérrez, M. E., Nagy, G. J., Caffera, R. M., & Leal Filho, W. (2017). Climate adaptation in South America with emphasis in coastal areas: the state-of-the-art and case studies from Venezuela and Uruguay. *Climate and Development*, 9(4), 364–382. <https://doi.org/10.1080/17565529.2016.1146120>
- Werners, S. E., Wise, R. M., Butler, J. R. A., Totin, E., & Vincent, K. (2021). Adaptation pathways: A review of approaches and a learning framework. *Environmental Science & Policy*, 116, 266–275. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSCI.2020.11.003>
- Wiek, A., & Iwaniec, D. (2014). Quality criteria for visions and visioning in sustainability science. *Sustainability Science*, 9(4), 497–512. <https://doi.org/10.1007/S11625-013-0208-6>
- Wise, R. M., Fazey, I., Stafford Smith, M., Park, S. E., Eakin, H. C., Archer Van Garderen, E. R. M., & Campbell, B. (2014). Reconceptualising adaptation to climate change as part of pathways of change and response. *Global Environmental Change*, 28, 325–336. <https://doi.org/10.1016/J.GLOENVCHA.2013.12.002>
- World Bank. (2023). Guía para la gestión de procesos frente a la erosión costera. <https://documents1.worldbank.org/curated/en/099052524112010683/pdf/P17913515a78a50341bb8c1b6b6a7b77bbc.pdf>
- Woroniecki, S., Spiegelenberg, F. A., Chausson, A., Turner, B., Key, I., Md. Irfanullah, H., & Seddon, N. (2022). Contributions of nature-based solutions to reducing people's vulnerabilities to climate change across the rural Global South. *Climate and Development*, 15(7), 590–607. <https://doi.org/10.1080/17565529.2022.2129954>
- Yousefpour, R., & Hanewinkel, M. (2016). Climate Change and Decision-Making Under Uncertainty. *Current Forestry Reports*, 2(2), 143–149. <https://doi.org/10.1007/S40725-016-0035-Y>

Zamora, A., Bouroncle, C., Skrinjaric, T., & Imbach, P. (2025). Uniendo saberes, Fortaleciendo territorios. Mapeo participativo para analizar la vulnerabilidad ante el cambio climático en medios de vida agropecuarios. 1–114. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/12730>

7. ANEXOS

Material complementario (MC): [Material complementario \(MC\).xlsx](#)

Anexo 1: MC1 - Marco metodológico de rutas de adaptación

Anexo 2: MC2 - Lista de actores presentes en la cuenca del Monkey River

Anexo 3: MC3 - Matrices para la identificación de medios de vida, servicios ecosistémicos y valores vividos

Anexo 4: MC4 - Matrices para la identificación de impactos actuales

Anexo 5: MC5 - Encuesta de capacidad adaptativa

Anexo 6: MC6 - Matrices para la identificación de medidas

Anexo 7: MC7 - Lista de expertos entrevistados

Anexo 8: MC8 - Matrices para evaluación de medidas

Anexo 9: MC9 - Matrices para el diseño de visión

Anexo 10: MC10 - Matrices para el desarrollo de escenarios, umbrales y disparadores

Anexo 11: MC11 - Lista de medidas de adaptación