CONAMA 2026

Evaluación de medidas de adaptación para la planificación hidrológica

Aplicación de IH-SIMC en el proyecto Cuencas Resilientes

Edita: Fundación Conama

Año: 2026

Este documento está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional.

Personas autoras de la presente comunicación técnica

Autora principal de la comunicación: Beatriz Tejerina Vega. Consultora Senior. IHCantabria.

Otros Autores: Natalia Sampedro Carral. Consultora Senior. IHCantabria.

Eduardo García Alonso. Consultor Senior. IHCantabria.

César Álvarez Díaz. Responsable del grupo de Ingeniería Hidráulica. IHCantabria.

Amaia María Ruiz Gordon. Consultora. IHCantabria.

Índice

Resumen **1**

Palabras clave **1**

1. Introducción **2**

2. El proyecto Cuencas Resilientes **2**

3. Metodología **4**

3.1. Arquitectura de IH-SIMC 4

3.2. Representación de medidas 5

3.3. Escenarios e indicadores 8

4. Aplicación y resultados **10**

4.1. Implementación y calibración 10

4.2. Priorización y escenarios 11

4.3. Resultados de las medidas 13

4.4. Compromisos y limitaciones 17

5. Potencial de IH-SIMC para la planificación hidrológica en España **17**

6. Conclusiones **19**

Agradecimientos **20**

Material suplementario..... 20

7. Bibliografía..... 20

Resumen

La planificación hidrológica necesita instrumentos que permitan reevaluar el riesgo climático bajo escenarios con las medidas aplicadas y cuantificar su eficacia frente al escenario sin intervención, considerando sus efectos sobre el conjunto del sistema hídrico. Esta comunicación presenta la experiencia del proyecto Cuencas Resilientes, en el que se aplicó el sistema de apoyo a la decisión IH-SIMC para evaluar y comparar medidas de adaptación al cambio climático a escala de cuenca.

IH-SIMC, desarrollado por IHCantabria y accesible mediante una plataforma web, se estructura en cinco módulos interconectados: (i) Hidrología, (ii) Gestión del agua, (iii) Erosión, (iv) Usos del suelo y Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN) y (v) Indicadores de servicios ecosistémicos y desempeño hídrico. La herramienta permite construir y comparar escenarios que combinan cambio climático, evolución de las demandas, transformaciones del territorio y medidas de adaptación y gestión, representando explícitamente sus efectos sobre los procesos hidrológicos y erosivos mediante indicadores cuantitativos comparables.

En el proyecto Cuencas Resilientes, implementado por el PNUMA para el Ministerio de Ambiente de Panamá y financiado por Euroclima+, se evaluaron la vulnerabilidad y el riesgo climático del sector hídrico frente a sequías e inundaciones en diez cuencas, bajo el clima histórico y los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5, y en tres cuencas priorizadas se simularon escenarios de intervención de ambición creciente con conservación y restauración forestal, sistemas agroforestales y silvopastoriles, recuperación de bosque de ribera y caudales ecológicos. Su efecto se evaluó mediante indicadores asociados a cuatro servicios ecosistémicos: regulación de caudales de estiaje (seguridad hídrica), medios (recursos hídricos y satisfacción de demandas) y máximos (riesgo de inundación), y regulación de procesos erosivos (turbidez y aportes sólidos). Los resultados, sustentados en una calibración con datos de aforo y evapotranspiración de satélite, muestran mejoras en la regulación de los estiajes y reducciones del riesgo potencial de inundación y de los aportes de sedimentos, con efectos diferenciados por cuenca, y permiten comparar alternativas e identificar compromisos entre objetivos de gestión y usos del agua.

La herramienta y los escenarios del proyecto se pusieron a disposición de los gestores, junto con un visor web para la consulta de los resultados. La metodología es transferible a las demarcaciones hidrográficas españolas como apoyo a la evaluación y priorización de medidas de adaptación bajo distintos escenarios climáticos, y ya se está trabajando en una versión para Cantabria y Asturias.

Palabras clave

Adaptación al cambio climático; soluciones basadas en la naturaleza; seguridad hídrica; sistemas de apoyo a la decisión; IH-SIMC; planificación hidrológica.

1. Introducción

La preparación del cuarto ciclo de planificación hidrológica (2028-2033) coincide con la elaboración del segundo Programa de Trabajo (2026-2030) del Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC). En este contexto, los Estudios de Adaptación a los Riesgos del Cambio Climático (EACC), elaborados para las demarcaciones hidrográficas, constituyen una base común para identificar los impactos y riesgos climáticos sobre los recursos hídricos y orientar la definición de medidas de adaptación. El reto es avanzar desde este diagnóstico hacia la evaluación y priorización de actuaciones concretas, incorporando criterios que permitan valorar su eficacia y realizar un seguimiento de sus resultados.

Para ello, la planificación necesita herramientas que permitan evaluar los efectos de las medidas de adaptación bajo diferentes escenarios climáticos, cuantificar su eficacia frente a situaciones sin intervención y considerar sus repercusiones sobre el conjunto del sistema hídrico. Una medida puede mejorar determinados servicios ecosistémicos (por ejemplo, la regulación de los caudales de estiaje o el control de la erosión) y perjudicar otros, o reducir un riesgo a costa de disminuir la garantía de algún uso del agua. Identificar estos compromisos antes de su implantación resulta fundamental para evitar situaciones de mala adaptación. Esta necesidad es especialmente relevante en el caso de las Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN), cuyos beneficios dependen de las características de cada cuenca, del tipo y extensión de las actuaciones y de las condiciones climáticas. Asimismo, la incorporación efectiva de estos análisis a la planificación requiere sistemas de apoyo a la decisión que puedan ser utilizados por los propios organismos gestores, sin depender permanentemente de equipos especializados.

Esta comunicación presenta la experiencia del proyecto Cuencas Resilientes, desarrollado en Panamá, en el que IHCantabria aplicó IH-SIMC (Sistema Integrado de Modelación de Cuencas) para evaluar y comparar medidas de Adaptación basada en Ecosistemas (AbE). Tras presentar el contexto y las actividades del proyecto, se describe la metodología de evaluación y su aplicación en tres cuencas priorizadas, analizando los beneficios, compromisos y limitaciones identificados. Finalmente, se examina el potencial de este enfoque para complementar los EACC y apoyar la selección de medidas de adaptación en la planificación hidrológica española, incluyendo su aplicación incipiente en Cantabria y Asturias.

2. El proyecto Cuencas Resilientes

El proyecto «Cuencas Resilientes: fomentando la adaptación al cambio climático en Panamá a través del enfoque ecosistémico para la seguridad hídrica a nivel de cuenca hidrográfica» fue implementado por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) para la Dirección de Cambio Climático del Ministerio de Ambiente de Panamá (MiAMBIENTE), con financiación del programa Euroclima+ de la Unión Europea. Panamá presenta una elevada exposición a múltiples amenazas climáticas, con importantes repercusiones sobre los recursos

hídricos y sobre sectores dependientes del agua, como la agricultura y la energía. El proyecto tuvo como objetivo integrar la seguridad hídrica y la resiliencia climática en la planificación y gestión de los recursos hídricos, mediante la mejora del acceso a la información climática, el fortalecimiento de las capacidades técnicas y la evaluación de medidas de AbE. Para ello, se abordaron las barreras identificadas en el proyecto (IHCantabria, 2025a), que coinciden en buena medida con los retos actuales de la planificación hidrológica en España: la escasez de información climática a escala de cuenca, la limitada capacidad para integrarla en la toma de decisiones y la falta de herramientas de apoyo a la decisión para la planificación a largo plazo.

El trabajo se desarrolló en diez cuencas hidrográficas representativas de diferentes condiciones climáticas, hidrológicas y territoriales: Changuinola y río Indio, en la vertiente del Caribe; Chiriquí Viejo, Chico y Chiriquí, en el Pacífico occidental; Grande, Santa María, Parita y La Villa, en el Pacífico central, con parte de su territorio en el denominado Arco Seco, una región caracterizada por precipitaciones anuales relativamente bajas y una estación seca marcada y prolongada (Ministerio de Ambiente de Panamá [MiAMBIENTE], 2019); y Chucunaque, en el Pacífico oriental, en la provincia de Darién (Figura 1).



Figura 1. Cuencas panameñas analizadas en el proyecto Cuencas Resilientes. En azul, las tres cuencas priorizadas para la modelización de medidas de AbE: Chiriquí, Grande y Parita.
Fuente: IHCantabria (2025a).

La participación de IHCantabria en el proyecto comprendió cuatro actividades principales: (i) la evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo climático, (ii) la modelización de medidas de AbE, (iii) el desarrollo de herramientas de apoyo a la decisión y (iv) la transferencia de capacidades a los equipos técnicos.

Como punto de partida, se evaluaron la vulnerabilidad y el riesgo climático del sector hídrico en las diez cuencas, considerando el periodo histórico (1981-2022) y los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 en los horizontes 2030 y 2050. Se analizaron los riesgos de escasez hídrica para la población, la agricultura y otros usos del agua, incluidos los aprovechamientos hidroeléctricos, así como los

riesgos económicos y humanos por inundación fluvial y el estado de los ecosistemas acuáticos y terrestres. La evaluación incorporó indicadores de amenaza, exposición y vulnerabilidad, incluyendo información sensible al género cuando estuvo disponible. Los resultados pusieron de manifiesto diferencias entre cuencas y sectores, con una especial incidencia de la escasez hídrica sobre las actividades agrícolas y determinados usos consuntivos, y una tendencia general al agravamiento de las condiciones de riesgo bajo los escenarios climáticos futuros.

A partir de este diagnóstico, se llevó a cabo un proceso participativo con los actores implicados en el proyecto para seleccionar las tres cuencas priorizadas: Chiriquí, Grande y Parita. La selección se realizó mediante una matriz de priorización multicriterio aplicada en un taller, en la que se valoraron los riesgos de inundación y sequía, la presencia de comunidades indígenas y población vulnerable, la importancia económica, el grado de alteración ambiental, la vulnerabilidad frente al cambio climático, el potencial de implantación de SbN y el solapamiento con otros proyectos de inversión, considerando la adicionalidad potencial de las actuaciones. En las tres cuencas seleccionadas se identificaron las áreas prioritarias de intervención y se modelizó el impacto hidrológico de diferentes escenarios de medidas de AbE.

IH-SIMC desempeñó un papel central en el desarrollo del proyecto: sus módulos hidrológico y de gestión permitieron caracterizar la amenaza de escasez hídrica en las diez cuencas, mientras que el sistema integrado se utilizó para evaluar los escenarios de medidas en las tres cuencas priorizadas. Al finalizar el proyecto, se puso a disposición de MiAMBIENTE una instancia operativa de IH-SIMC con las diez cuencas configuradas y los escenarios del estudio precargados, complementada con un visor web para la consulta de los resultados; la herramienta permite también a los usuarios crear y ejecutar sus propios escenarios, además de visualizar los precargados. La transferencia incluyó también un manual de usuario y actividades de formación de los equipos técnicos, para facilitar el uso de estas herramientas en la evaluación de nuevas alternativas de adaptación y gestión.

3. Metodología

3.1. Arquitectura de IH-SIMC

IH-SIMC es un sistema de apoyo a la decisión desarrollado por IHCantabria para evaluar alternativas de planificación y gestión de los recursos hídricos a escala de cuenca. Su diseño responde a un principio de parsimonia, utilizando un número reducido de parámetros para representar los principales procesos hidrológicos y erosivos, lo que facilita su aplicación en contextos con disponibilidad limitada de información.

IH-SIMC se estructura en cinco módulos interconectados (Figura 2), cuyos resultados se transmiten entre sí, de modo que los cambios introducidos en uno de ellos repercuten en el conjunto del sistema. El módulo hidrológico transforma las series de precipitación y evapotranspiración potencial en caudales naturales mediante el Modelo de Equilibrio Logístico (LEM) (Prieto et al., 2013), un modelo conceptual semidistribuido basado en el marco de Budyko (Budyko, 1974). El módulo de gestión del agua calcula los caudales disponibles considerando demandas, retornos, embalses, trasvases, prioridades de uso y caudales ecológicos. El módulo de erosión estima la producción y el

transporte de sedimentos por lavado de cuenca y erosión de márgenes. El módulo de usos del suelo y SbN permite modificar las coberturas del territorio e incorporar medidas de conservación, restauración o manejo sostenible, cuyos efectos se traducen en cambios de los parámetros hidrológicos y erosivos. Finalmente, el módulo de indicadores sintetiza los resultados de las simulaciones en métricas asociadas a los servicios ecosistémicos, comparables entre escenarios. Su descripción detallada puede consultarse en Sampedro et al. (2026a, 2026b).

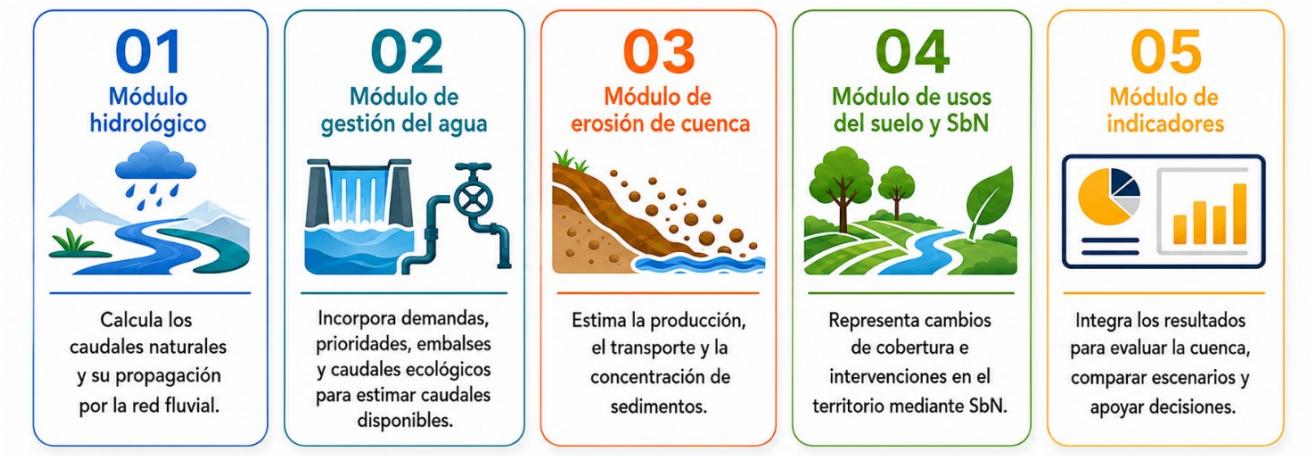


Figura 2. Arquitectura modular de IH-SIMC, compuesta por cinco módulos interconectados: hidrología, gestión del agua, erosión de cuenca, usos del suelo y SbN, e indicadores.
Fuente: Sampedro et al. (2026a).

3.2. Representación de medidas

Las medidas de adaptación y gestión se incorporan a IH-SIMC mediante modificaciones de las condiciones de gestión, las coberturas del suelo o los parámetros que caracterizan los procesos hidrológicos y erosivos, cuyos efectos se transmiten a los distintos módulos del modelo.

Las medidas de gestión del agua se representan mediante la modificación de las demandas y sus retornos (por ejemplo, reducciones de la demanda por ahorro o mejora de la eficiencia), las prioridades de asignación, los caudales ecológicos, las reglas de explotación de los embalses y los trasvases. En particular, los caudales ecológicos se incorporan como una restricción ambiental que compite con el resto de las demandas según su prioridad. Estas modificaciones afectan a la distribución de los recursos disponibles en la red fluvial y permiten evaluar sus efectos sobre las garantías de satisfacción de las distintas demandas y la alteración del régimen hidrológico (Figura 3).

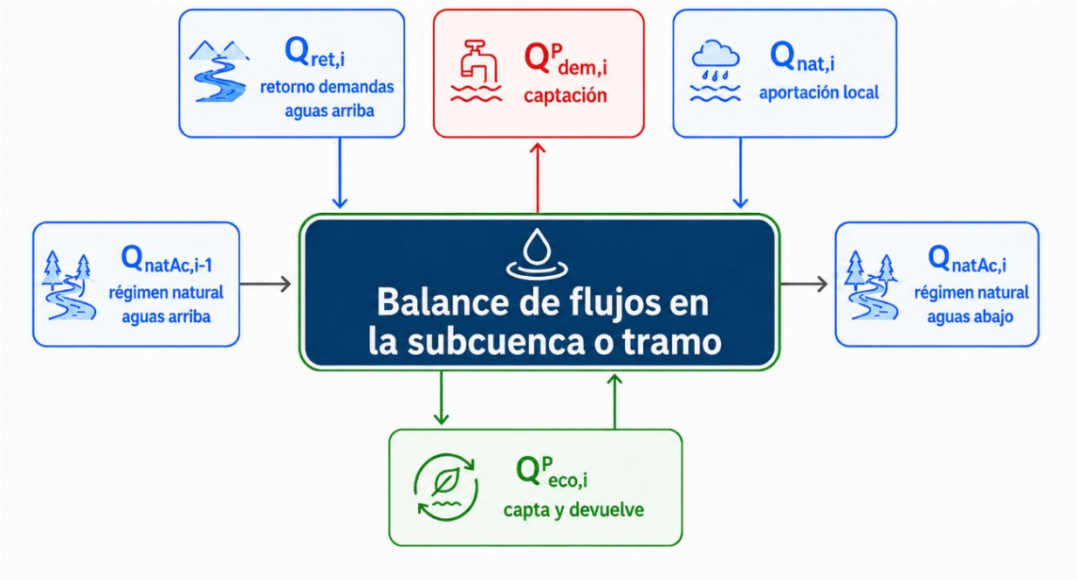


Figura 3. Esquema del balance de flujos en un tramo de río del módulo de gestión de IH-SIMC. QnatAc, i-1 es el caudal acumulado aguas arriba; Qret, el vertido procedente del retorno de las demandas; Qnat, la aportación local de la subcuenca; Qdem, la captación de las demandas; Qeco, el caudal ecológico; y QnatAc, i es el caudal acumulado aguas abajo.
Fuente: Sampedro et al. (2026a).

Las SbN se representan mediante el módulo de usos del suelo, que permite modificar libremente las coberturas existentes o incorporar actuaciones predefinidas de conservación, restauración y manejo sostenible, aplicables a escala de subcuenca o de tramo fluvial. La herramienta contempla cuatro tipologías de SbN: conservación y restauración del bosque, agroforestería, sistemas silvopastoriles y restauración del bosque de ribera (Figura 4).

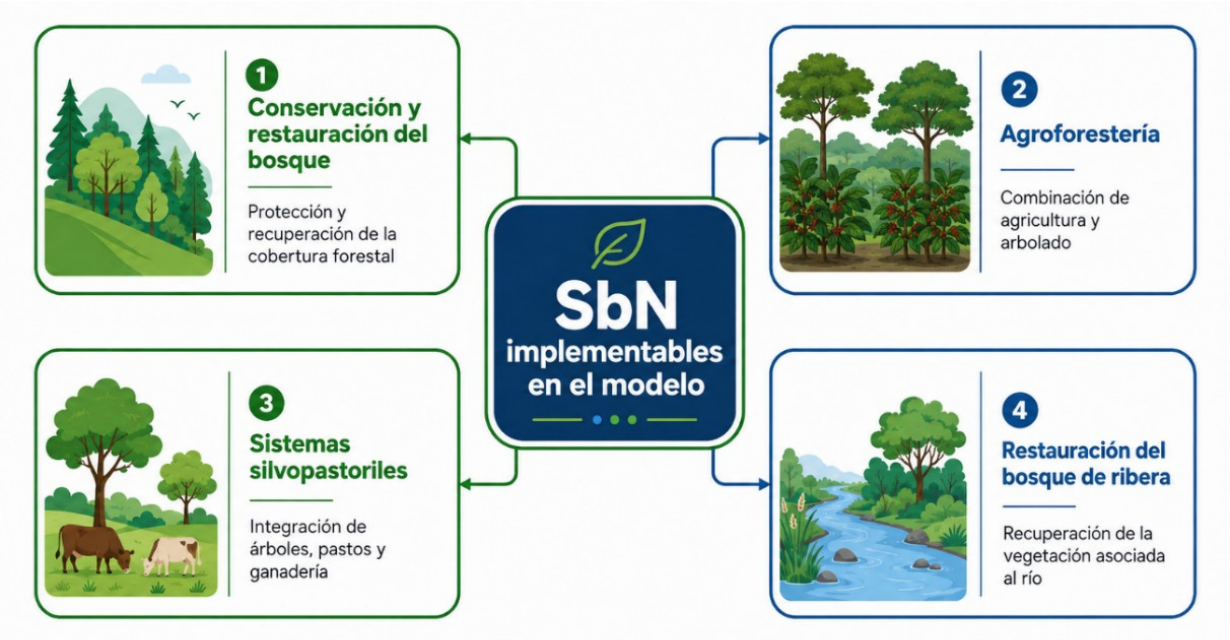


Figura 4. SbN implementables en IH-SIMC: conservación y restauración del bosque, agroforestería, sistemas silvopastoriles y restauración del bosque de ribera.
Fuente: Sampedro et al. (2026a).

Las tres primeras tipologías actúan principalmente sobre las laderas y los usos productivos del territorio. La conservación y restauración del bosque representa la protección y evolución de las coberturas forestales existentes y la recuperación del bosque en superficies agrícolas o de pastos. La agroforestería y los sistemas silvopastoriles incorporan distintos grados de cobertura arbórea en zonas agrícolas y ganaderas, respectivamente, y permiten añadir prácticas complementarias de conservación del suelo. Estas intervenciones se traducen en modificaciones de la evapotranspiración, mediante factores que dependen de la cobertura forestal, y de la capacidad de almacenamiento del suelo, que afectan a la generación y regulación de los caudales. Asimismo, modifican el factor antropogénico de la formulación BQART (Syvitski y Milliman, 2007), utilizado para estimar la producción de sedimentos por erosión de laderas. Las prácticas complementarias de conservación del suelo pueden reducir esta producción sin modificar los parámetros hidrológicos.

Por su parte, la restauración del bosque de ribera se representa mediante cambios en la proporción de tramo encauzado y en la cobertura de vegetación ribereña, considerando las longitudes de cauce asociadas a llanuras de inundación. Estas modificaciones afectan a la protección de las márgenes frente a la erosión y a la representación del daño potencial por inundación en el modelo. El módulo de erosión integra las aportaciones de sedimentos procedentes de las laderas y de las márgenes, y simula su transporte a través de la red fluvial (Figura 5).

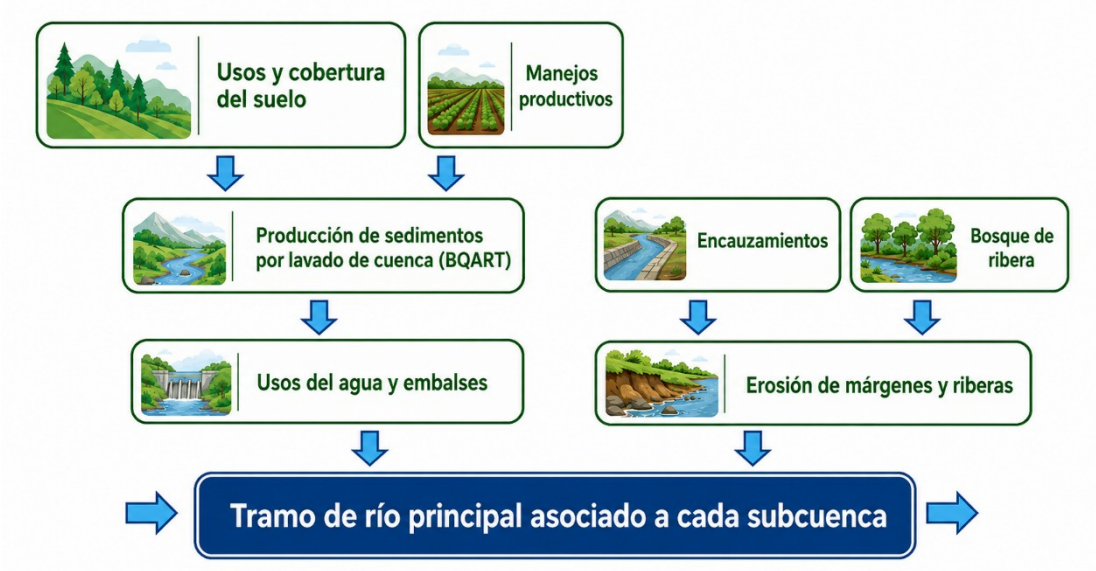


Figura 5. Esquema conceptual del módulo de erosión de cuenca: producción de sedimentos por lavado de cuenca y erosión de márgenes.
Fuente: Sampedro et al. (2026a).

Una característica de IH-SIMC es que los efectos de las medidas sobre los servicios ecosistémicos se obtienen de la simulación integrada de los procesos hidrológicos, erosivos y de gestión, en lugar de asignarse a priori mediante coeficientes fijos de provisión de servicios asociados a cada cobertura. De esta forma, una misma intervención puede modificar simultáneamente el régimen de caudales, la disponibilidad de recursos, la satisfacción de las demandas y la carga de sedimentos. El Cuadro 1 resume, para cada tipología de SbN, los parámetros que definen la intervención y los procesos del modelo sobre los que actúa.

Cuadro 1. Tipos de SbN implementadas en IH-SIMC y procesos del modelo sobre los que actúan. Fuente: IHCantabria (2025a).

Tipo de SbN	Parámetros de la intervención	Procesos afectados
Conservación y restauración del bosque	Superficie intervenida y transición entre categorías de cobertura forestal	Evapotranspiración, almacenamiento del suelo y erosión de laderas
Agroforestería	Superficie agrícola intervenida, grado de cobertura arbórea y prácticas complementarias de conservación del suelo	Evapotranspiración, almacenamiento del suelo y erosión de laderas
Sistemas silvopastoriles	Superficie de pastos intervenida, grado de cobertura arbórea y prácticas complementarias de conservación del suelo	Evapotranspiración, almacenamiento del suelo y erosión de laderas
Restauración del bosque de ribera	Proporción del tramo encauzado y proporción con bosque de ribera	Erosión de márgenes e indicador de riesgo potencial de inundación

3.3. Escenarios e indicadores

La evaluación en IH-SIMC se organiza mediante escenarios, que constituyen la unidad básica de análisis y comparación. Cada escenario se define a partir de cuatro dimensiones configurables: (i) el clima, mediante series históricas o proyecciones de cambio climático; (ii) los usos y coberturas del suelo; (iii) los usos del agua, incluyendo demandas, embalses y trasvases, y (iv) las medidas de adaptación y gestión consideradas.

A partir de escenarios base que representan las condiciones de referencia de la cuenca, se construyen alternativas en las que se introducen las modificaciones correspondientes a las medidas propuestas. Su eficacia se evalúa comparando los resultados de los escenarios con y sin intervención bajo las mismas condiciones climáticas, lo que permite distinguir el efecto de las medidas del asociado al cambio climático. Asimismo, la repetición de estas comparaciones bajo distintos escenarios climáticos permite analizar cómo varía su eficacia ante diferentes condiciones futuras.

Los resultados se sintetizan en el módulo de indicadores mediante métricas calculadas a partir de las mismas simulaciones y agrupadas en cuatro servicios ecosistémicos de regulación hídrica. La regulación de caudales de estiaje (seguridad hídrica) se evalúa mediante los caudales Q10 y Q20, el caudal mínimo anual y el índice de aridez, y permite identificar situaciones de estrés hídrico durante la estación seca. La regulación de caudales medios (recursos hídricos y satisfacción de demandas) se caracteriza mediante el caudal medio anual, el coeficiente de escorrentía, el índice de alteración del régimen de caudales (MAC) y las garantías de satisfacción de las demandas. La regulación de caudales máximos (riesgo de inundación) se analiza a partir de los caudales Q80 y Q90, el caudal máximo anual y el indicador de riesgo potencial de inundación (FDI). Por último, la regulación de procesos erosivos (turbidez y aportes sólidos) se describe mediante el caudal sólido, la

concentración de sedimentos, la producción específica por lavado de cuenca y por erosión de márgenes y el índice de alteración del régimen de caudales sólidos (MACal), indicadores relacionados con la calidad del agua, la vida útil de los embalses y el estado del hábitat acuático.

Entre estos indicadores, el MAC cuantifica la modificación del régimen natural mediante una métrica basada en las diferencias logarítmicas entre las series diarias de caudales naturales y modificados por la gestión. El indicador toma valores entre 0 (sin alteración) y 1 (alteración máxima), otorgando especial importancia a las diferencias en los caudales bajos, relevantes para el funcionamiento ecológico de los ríos. De forma análoga, el MACal cuantifica las modificaciones de las concentraciones de sedimentos respecto al régimen natural (IHCantabria, 2025b).

Por su parte, el FDI estima una superficie equivalente de daño en la llanura de inundación a partir de los caudales que superan un umbral de desbordamiento y de una función de daño dependiente del calado (IHCantabria, 2025b). Su formulación descuenta de la superficie potencialmente afectada los tramos encauzados y, con mayor peso, aquellos con bosque de ribera, bajo la hipótesis simplificada de que estos espacios no generan daño. Así, la restauración del bosque de ribera reduce el valor del indicador al recuperar espacios fluviales compatibles con la inundación, aunque sigan inundándose. El FDI no incorpora explícitamente la vulnerabilidad social ni los tipos de bienes expuestos, por lo que sus variaciones deben interpretarse como cambios en el daño potencial representado por el modelo y no como una estimación directa de la reducción del riesgo real de inundación.

El módulo incluye además un comparador de escenarios que contrasta dos simulaciones sobre las mismas métricas, de forma visual y cuantitativa (Figura 6). Al proceder todos los indicadores de la misma simulación, el comparador permite comprobar si una medida mejora o empeora cada uno de ellos respecto del escenario de referencia e identificar efectos contrapuestos entre servicios.

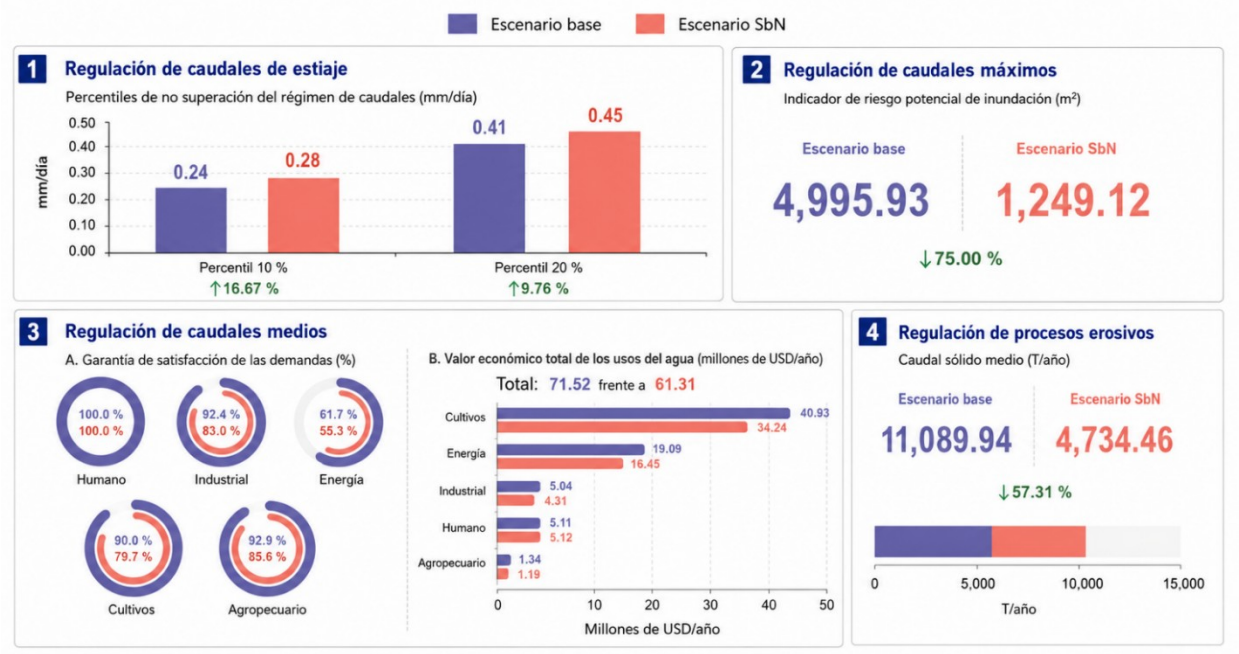


Figura 6. Comparador de escenarios de IH-SIMC: comparación de un escenario base con otro que incorpora SbN, mediante indicadores asociados a los cuatro servicios ecosistémicos.
Fuente: IHCantabria (2025a).

Esta metodología se aplicó en el proyecto Cuencas Resilientes mediante la definición y comparación de escenarios de intervención en las tres cuencas priorizadas, cuyos resultados se presentan en el capítulo siguiente.

4. Aplicación y resultados

4.1. Implementación y calibración

La aplicación de IH-SIMC en Panamá requirió calibrar el modelo hidrológico en un contexto de disponibilidad limitada de información, caracterizado por la escasez de estaciones de aforo, la heterogeneidad de las series disponibles y la baja densidad de pluviómetros. La estrategia de calibración combinó tres fuentes de información (IHCantabria, 2025a): la formulación de Budyko de Fu (1981), para establecer la partición media entre precipitación y escorrentía; las series de caudal diario de las estaciones disponibles, para calibrar los parámetros de almacenamiento y respuesta hidrológica (S_{max} y S_0), con eficiencias de Nash-Sutcliffe (Nash y Sutcliffe, 1970) de entre 0,7 y 0,8 (Figura 7), y la evapotranspiración real del producto MOD16A2GF de MODIS (Running et al., 2021), para corregir la evapotranspiración potencial calculada mediante la fórmula de Hargreaves (Hargreaves y Samani, 1985), que tiende a sobrevalorarse en torno a un 15 % en las zonas boscosas frente a la de Penman-Monteith (Allen et al., 1998).

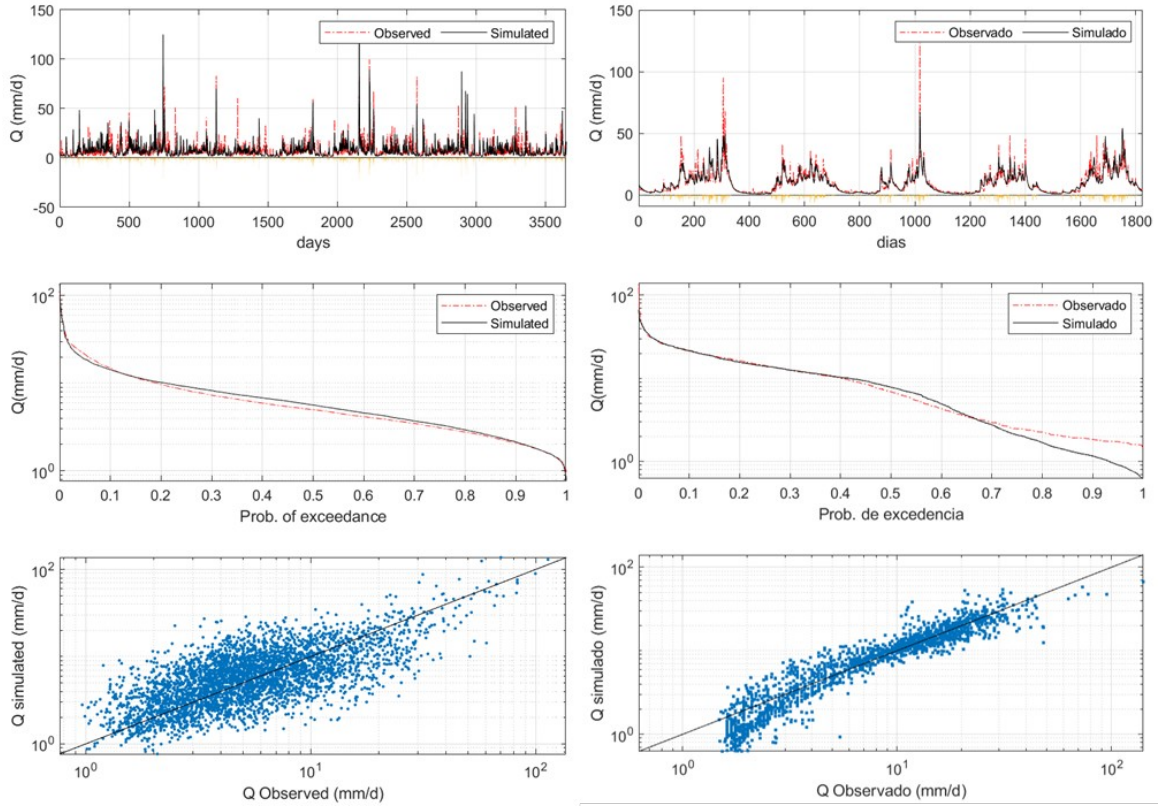


Figura 7. Ejemplo de ajuste del modelo hidrológico frente a las series de caudal diario en dos estaciones de la cuenca del río Chiriquí (izquierda: estación de aforo de Bijao; derecha: David).
Fuente: IHCantabria (2025a).

El resultado fundamental para la evaluación de medidas fue el establecimiento de relaciones cuantitativas entre los parámetros hidrológicos, el clima y las coberturas del suelo. Por ejemplo, la capacidad efectiva de almacenamiento del suelo (S_{max}) se expresó en función del índice de aridez (ARI) y de las proporciones de bosque maduro (BM), bosque secundario (BS), rastrojo (RAS) y superficies agrícolas o de pastos (PAS), con un error medio de 23 mm: S_{max} = ARI · (420 · BM + 603 · BS) + 135 · RAS + 48 · PAS

Los factores de corrección de la evapotranspiración potencial se ajustaron igualmente en función de la cobertura forestal y la altitud, con coeficientes de determinación (R^2) de 0,88 y 0,82. Estas relaciones permiten representar los cambios inducidos por las medidas sobre la respuesta hidrológica de la cuenca, extendiendo su aplicación a las subcuencas sin estaciones de aforo.

4.2. Priorización y escenarios

La evaluación de medidas se desarrolló en las tres cuencas priorizadas, con características hidrológicas y problemáticas diferenciadas. Chiriquí (1925 km² y 220 913 habitantes), situada en el Pacífico occidental, presenta una mayor cobertura forestal y una marcada importancia de los aprovechamientos hidroeléctricos. Grande (2384 km² y 157 247 habitantes) y Parita (603 km² y 29 198 habitantes) se sitúan, en parte, en el Arco Seco, una región especialmente expuesta a la variabilidad climática y a la escasez de recursos hídricos, con una importante actividad agropecuaria.

Previamente a la definición de los escenarios de intervención, se identificaron las áreas con mayor potencial para la implementación de SbN mediante un análisis espacial de los servicios ecosistémicos. Para ello, se utilizó el software NetMap (Benda et al., 2007), que permitió representar la red fluvial y delimitar las unidades funcionales asociadas a laderas, riberas y llanuras de inundación. En cada unidad se calcularon indicadores de su contribución a la regulación de la escorrentía y de la erosión en laderas, a la regulación de la erosión de márgenes en las riberas y a la capacidad de almacenamiento de las llanuras de inundación, y las unidades se clasificaron en cuatro niveles de prioridad, de baja a muy alta. Las zonas con bosque nativo que ya prestan el servicio se priorizaron para su conservación, y las de pastos o cultivos con mayor potencial, para su restauración o para la aplicación de buenas prácticas de manejo. Como ejemplo, la Figura 8 muestra el resultado para el servicio de regulación de la escorrentía en laderas en la cuenca de Chiriquí: la prioridad de conservación, en verde, se concentra en la cabecera y en los tramos medios de la cuenca, mientras que la de restauración, en rojo, se localiza sobre todo en los sectores intermedios ocupados por pastizales. Este análisis, realizado para cada servicio ecosistémico y cada cuenca, sirvió de base para delimitar las superficies de intervención de cada escenario.

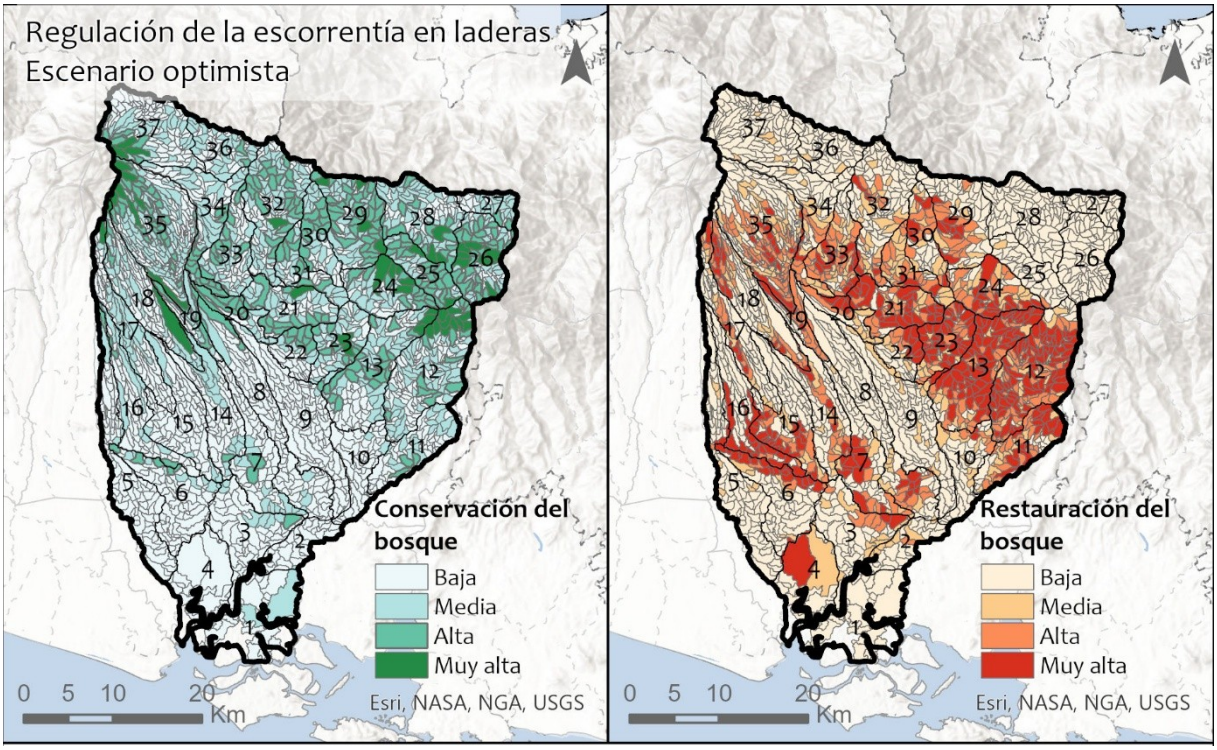


Figura 8. Prioridad para la conservación (izquierda) y la restauración (derecha) del bosque en laderas según el servicio de regulación de la escorrentía, en la cuenca de Chiriquí (escenario optimista, E3). Fuente: IHCantabria (2025a).

Sobre esta base se definieron tres escenarios de intervención con niveles de ambición creciente (Cuadro 2). El escenario de conservación (E1) contempla la protección del bosque existente y el establecimiento de caudales ecológicos. El escenario intermedio (E2) incorpora adicionalmente la restauración parcial del bosque en laderas y riberas, la agroforestería, los sistemas silvopastoriles y las prácticas de conservación del suelo en las áreas identificadas como prioritarias. Finalmente, el escenario optimista (E3) amplía la superficie de intervención hasta alcanzar el máximo potencial identificado para las distintas medidas. Los porcentajes del Cuadro 2 indican la fracción del beneficio total del servicio de regulación que se alcanza con las áreas seleccionadas, determinada a partir de curvas de acumulación del beneficio; en las buenas prácticas, este beneficio se suma al de las áreas de restauración. Los rangos recogen las diferencias entre cuencas y servicios.

Cada escenario se simuló bajo las condiciones climáticas históricas y los escenarios futuros SSP2-4.5 y SSP5-8.5, con horizonte 2050, comparando sus resultados con los del escenario sin intervención correspondiente al mismo clima. Los resultados de los escenarios sin intervención muestran la magnitud de los impactos climáticos frente a los que deben evaluarse las medidas. Bajo SSP5-8.5 en 2050, el caudal de estiaje Q20 disminuye respecto al periodo histórico un 72 % en Chiriquí, un 50 % en Grande y un 69 % en Parita, mientras que el indicador de riesgo potencial de inundación (FDI) aumenta considerablemente en las tres cuencas. Estos escenarios constituyen la referencia para analizar la contribución de los distintos paquetes de adaptación.

Cuadro 2. Escenarios de intervención evaluados.
Fuente: IHCantabria (2025a).

Escenario 1 (Conservación)	Escenario 2 (Intermedio)	Escenario 3 (Optimista)
• Conservación de bosque de ladera • Caudal ecológico del 10 % del caudal medio	• Conservación de bosque de ladera • Restauración activa de bosque de ladera (20–30 %) • Buenas prácticas de manejo: agroforestería y sistemas silvopastoriles (35–50 %) • Restauración de bosque de ribera en llanuras de inundación • Caudal ecológico del 10 % del caudal medio	• Conservación de bosque de ladera • Restauración activa de bosque de ladera (40–50 %) • Buenas prácticas de manejo: agroforestería y sistemas silvopastoriles (70–80 %) • Restauración de bosque de ribera en llanuras de inundación • Caudal ecológico del 10 % del caudal medio

4.3. Resultados de las medidas

La evaluación de los escenarios de intervención muestra efectos diferenciados según el servicio ecosistémico considerado, la intensidad de las medidas y las características de cada cuenca. En términos generales, los escenarios E2 (intermedio) y E3 (optimista) presentan las mayores mejoras en la regulación de los caudales de estiaje y en la reducción del indicador de riesgo potencial de inundación (FDI) y de los aportes de sedimentos, aunque también se identifican efectos contrapuestos sobre otros indicadores, especialmente las garantías de satisfacción de las demandas.

En la regulación de los caudales de estiaje, la restauración del bosque en laderas y la recuperación de suelos degradados favorecen una mayor capacidad de almacenamiento y la regulación de los caudales durante los periodos secos. La respuesta es más acusada en Grande y Parita, cuencas del Arco Seco con mayor superficie potencial de restauración, donde el Q20 aumenta en E3 un 10,4 % y un 16,7 % en el periodo histórico, respectivamente, y hasta un 20,3 % y un 31,4 % bajo SSP5-8.5 en 2050. En Chiriquí, con una mayor cobertura forestal inicial, las mejoras son mucho más moderadas, del 0,4 % en el periodo histórico y del 4,3 % en el escenario climático futuro más desfavorable.

En Chiriquí (Figura 9), los mayores incrementos del Q20 en E3, superiores localmente al 5 %, se concentran en las microcuencas altas y medias de los sectores central y oriental, donde se localizan las actuaciones de restauración, mientras que en las microcuencas del norte, con bosque maduro y escasas intervenciones nuevas, las variaciones son muy reducidas o incluso ligeramente negativas. En Grande se observa un patrón similar, con incrementos más generalizados en las zonas altas y medias, donde se concentran la reforestación y el manejo de laderas. Esta respuesta diferenciada, que a escala local es mayor que el efecto agregado en la cuenca, muestra la importancia del estado de partida y de la localización de las intervenciones para evaluar su eficacia.

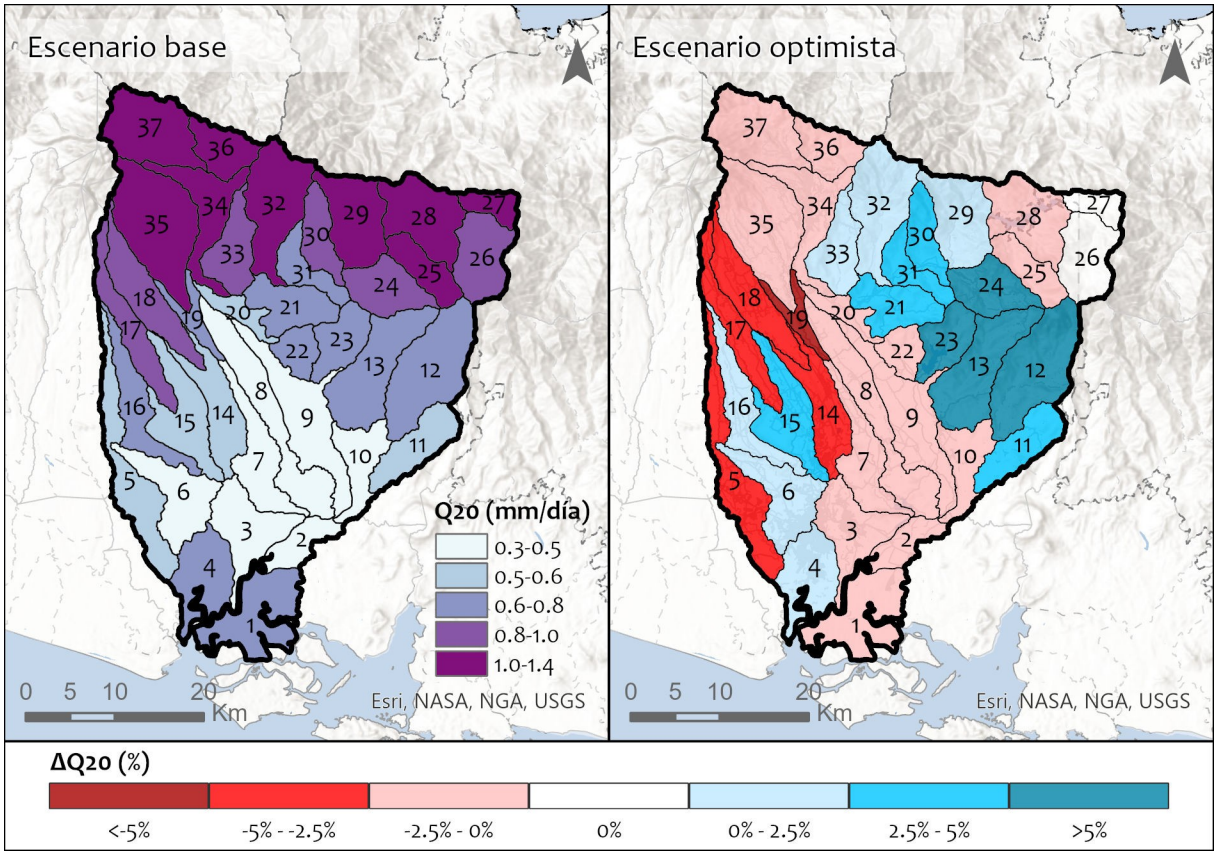


Figura 9. Caudal de estiaje (Q20) en el escenario base (izquierda) y variación relativa obtenida con el escenario optimista E3 (derecha) en la cuenca de Chiriquí, para el periodo histórico.
Fuente: IHCantabria (2025a).

En la regulación de los caudales medios, la mayor cobertura forestal produce ligeras reducciones del caudal medio anual, asociadas al incremento de la evapotranspiración. Sin embargo, el índice de alteración del régimen de caudales (MAC) disminuye sustancialmente en las tres cuencas, principalmente por la incorporación de los caudales ecológicos. En E3, la reducción del MAC alcanza el 52 % en Chiriquí y el 81 % en Grande y Parita. La garantía del abastecimiento humano mejora ligeramente o se mantiene, pasando de 0,92 a 0,94 en Chiriquí y de 0,97 a 0,99 en Parita, mientras que en Grande permanece prácticamente inalterada. Por el contrario, la garantía agrícola disminuye en las tres cuencas, pasando de 0,97 a 0,85 en Chiriquí, de 0,90 a 0,80 en Grande y de 0,80 a 0,67 en Parita. Estos resultados ponen de manifiesto los compromisos entre la conservación del régimen hidrológico y la satisfacción de las demandas, que se analizan en el apartado siguiente.

En la regulación de los caudales máximos, los cambios más acusados se observan en el indicador de riesgo potencial de inundación (FDI). Su reducción está asociada principalmente a la restauración del bosque de ribera. En el periodo histórico, el FDI disminuye en E2 un 55,4 % en Chiriquí, un 23,2 % en Grande y un 93,5 % en Parita. En E3, las reducciones alcanzan el 83,1 %, el 75,0 % y el 99,2 %, respectivamente, y son todavía mayores en términos relativos bajo los escenarios climáticos futuros. Estas reducciones no significan que la llanura deje de inundarse, sino que la restauración del bosque de ribera reduce la superficie considerada susceptible de daño en la formulación del indicador. Esto explica que el FDI presente disminuciones muy superiores a las variaciones de los caudales máximos.

Por último, en la regulación de los procesos erosivos, la combinación de restauración forestal en laderas y riberas, agroforestería, sistemas silvopastoriles y prácticas de conservación del suelo reduce notablemente los aportes de sedimentos. En E3, la concentración media disminuye entre un 43,5 % en Chiriquí y un 53,1 % en Grande, con una reducción del 49,6 % en Parita. La mayor parte de estas mejoras se obtiene ya en E2, con disminuciones de entre el 42 % y el 50 %, de modo que la ampliación de las actuaciones hasta E3 aporta beneficios adicionales relativamente reducidos para este servicio.

La Figura 10 sintetiza la evolución de los principales indicadores en las tres cuencas para las diferentes combinaciones de escenarios climáticos y de intervención. Su comparación permite apreciar tanto la eficacia de las medidas como las diferencias entre cuencas y los compromisos entre los servicios ecosistémicos evaluados.

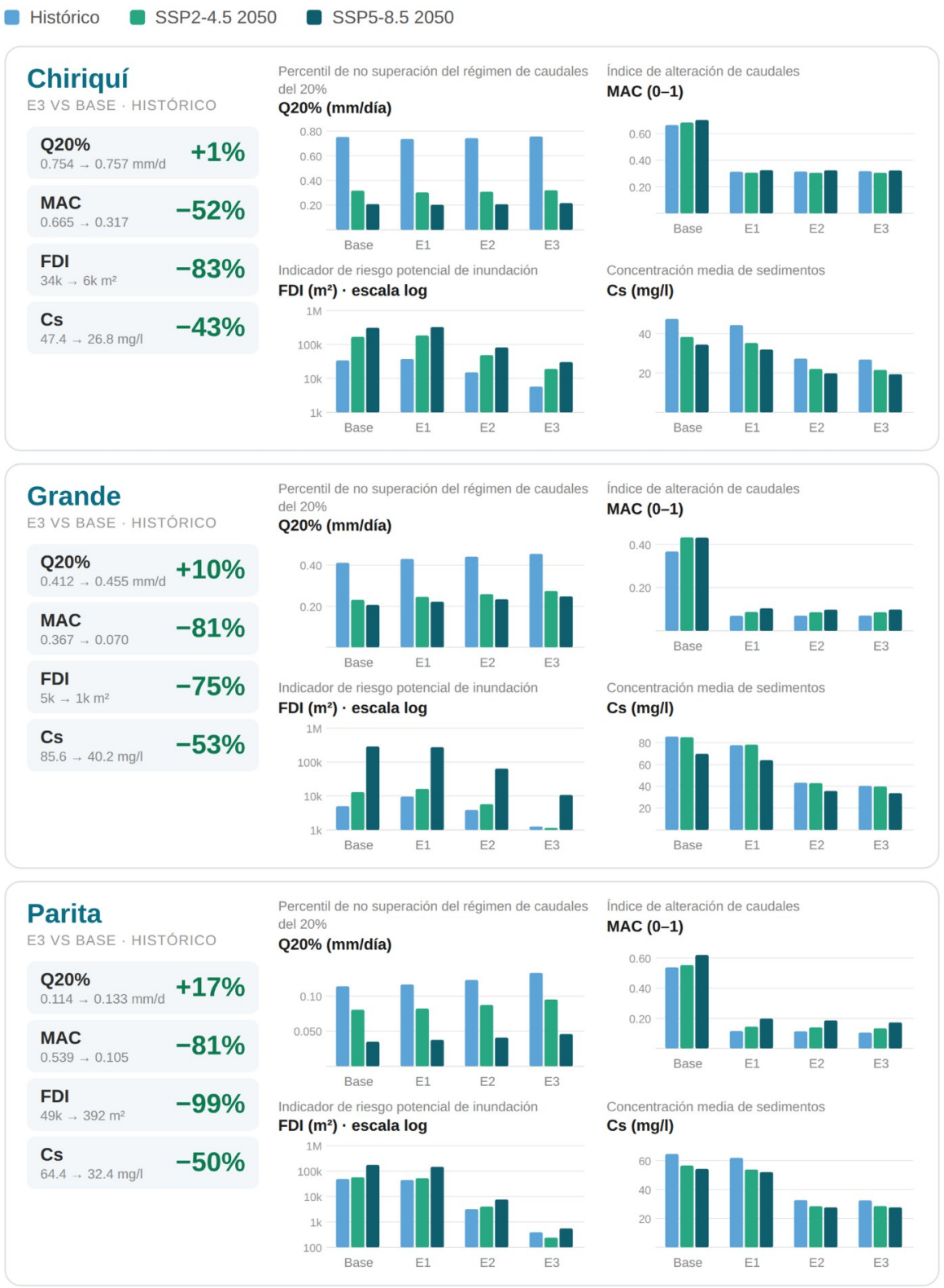


Figura 10. Evolución de los indicadores de regulación de estiajes (Q20), alteración del régimen de caudales (MAC), riesgo potencial de inundación (FDI) y concentración media de sedimentos (Cs) en las tres cuencas priorizadas, bajo los escenarios climáticos histórico, SSP2-4.5 y SSP5-8.5 (2050) y los escenarios de intervención base, E1, E2 y E3.
Fuente: IHCantabria (2025a).

4.4. Compromisos y limitaciones

La evaluación conjunta de los indicadores permite identificar no solo los beneficios de las medidas, sino también sus efectos contrapuestos y sus límites. En primer lugar, no todas las intervenciones mejoran simultáneamente los servicios evaluados. El escenario de conservación (E1), por ejemplo, no garantiza por sí solo una reducción del indicador de riesgo potencial de inundación: en el periodo histórico, el FDI aumenta un 91 % en Grande y un 10 % en Chiriquí, mientras que en esta última cuenca el Q20 disminuye alrededor de un 2 %. Las reducciones más importantes del FDI aparecen al incorporar la restauración del bosque de ribera en los escenarios E2 y E3, lo que pone de manifiesto la importancia de combinar diferentes actuaciones.

La incorporación de caudales ecológicos también evidencia un compromiso entre la conservación del régimen hidrológico y la garantía de los distintos usos del agua. Aunque contribuye a reducir la alteración del régimen natural, modifica la distribución de los recursos disponibles en función de las prioridades de asignación. Este resultado no implica que la medida sea inadecuada, sino que evidencia la necesidad de evaluar conjuntamente los objetivos ambientales y las demandas existentes, e identificar medidas complementarias de gestión que permitan reducir los posibles efectos desfavorables sobre determinados usos.

Por otra parte, las SbN compensan solo parcialmente los impactos del cambio climático. Bajo SSP5-8.5 en 2050, el Q20 del escenario optimista (E3) permanece muy por debajo del correspondiente al periodo histórico sin intervención en las tres cuencas. Asimismo, en Grande el FDI de E3 bajo SSP5-8.5 continúa siendo aproximadamente el doble del valor histórico sin medidas. Estos resultados muestran que las actuaciones de conservación y restauración, aun siendo beneficiosas para determinados servicios, no eliminan los impactos asociados a los escenarios climáticos más desfavorables y deben integrarse con medidas de gestión de la demanda y de los recursos.

5. Potencial de IH-SIMC para la planificación hidrológica en España

La experiencia de Cuencas Resilientes muestra el potencial de IH-SIMC para complementar los EACC y apoyar la planificación hidrológica española mediante la simulación de alternativas de adaptación bajo diferentes condiciones climáticas. Su enfoque integrado permite considerar conjuntamente objetivos abordados habitualmente desde distintos instrumentos de planificación, como los planes hidrológicos, los planes especiales de sequía (PES) y los planes de gestión del riesgo de inundación (PGRI), contribuyendo así a responder a la pregunta de cuándo una medida puede considerarse realmente adaptativa.

Su disponibilidad en una plataforma web facilita que los equipos técnicos de los organismos gestores construyan, modifiquen y evalúen nuevos escenarios, favoreciendo la continuidad del

análisis y su incorporación a los procesos de planificación. El Cuadro 3 recoge las principales familias de medidas de adaptación que pueden ser relevantes para la planificación hidrológica española, su posible representación en IH-SIMC y los indicadores que permitirían evaluar sus efectos.

Cuadro 3. Familias de medidas de adaptación, representación en IH-SIMC e indicadores de evaluación. Fuente: elaboración propia.

Familia de medidas	Representación en IH-SIMC	Indicadores de evaluación
Gestión de la demanda (ahorro, eficiencia y dotaciones)	Modificación de demandas, retornos y prioridades de asignación	Garantías de satisfacción de las demandas, MAC y caudales disponibles
Caudales ecológicos y explotación de embalses	Restricciones ambientales con prioridad de asignación y modificación de reglas de explotación	MAC, garantías de satisfacción de las demandas y caudales de estiaje
Gestión forestal de cabeceras y restauración de laderas	Conservación y restauración del bosque mediante cambios en la cobertura del suelo y los parámetros hidrológicos y erosivos	Q20, caudal medio y producción de sedimentos
Restauración de riberas y llanuras de inundación	Modificación de la cobertura de bosque de ribera y de la proporción de tramos encauzados	FDI y erosión de márgenes
Prácticas agrarias sostenibles	Agroforestería, sistemas silvopastoriles y prácticas de conservación del suelo	Regulación de caudales y producción y concentración de sedimentos
Diversificación de recursos	Representación de trasvases; la incorporación explícita de recursos alternativos, como la reutilización y la desalación, requiere adaptaciones del módulo de gestión	Garantías de satisfacción de las demandas y disponibilidad de recursos
Incorporación de información climática	Simulación de escenarios climáticos históricos y futuros y comparación de alternativas con y sin medidas	Conjunto de indicadores hidrológicos, de gestión y de erosión

La aplicación de IH-SIMC en las demarcaciones españolas requiere adaptar y recalibrar el modelo a las condiciones climáticas, hidrológicas y territoriales de cada ámbito. Las relaciones entre cobertura forestal, índice de aridez y parámetros hidrológicos obtenidas en Panamá responden a las características de sus cuencas y no pueden trasladarse directamente a otros territorios. Para esta adaptación, las demarcaciones españolas disponen de información procedente de las redes de aforo, la cartografía de usos del suelo y la caracterización de demandas e infraestructuras recogida en los planes hidrológicos.

También deben considerarse las simplificaciones de la versión de IH-SIMC aplicada en el proyecto. En Cuencas Resilientes, la calidad del agua se representó únicamente a través de los sedimentos en suspensión (turbidez), y no se representaron explícitamente la dinámica de los acuíferos y las extracciones subterráneas ni la operación coordinada de sistemas complejos de embalses. Asimismo, la evaluación del daño potencial por inundación se basa en una representación hidráulica simplificada, por lo que no sustituye los estudios hidráulicos y de riesgo detallados necesarios para diseñar actuaciones concretas. La arquitectura modular del sistema permite ampliar estas capacidades. Tras el proyecto Cuencas Resilientes, se han desarrollado nuevos módulos o mejoras de IH-SIMC, incluidos los de calidad del agua, hidroeconomía básica, criosfera (nieve y glaciares) y acuíferos (simplificados).

También se ha iniciado la aplicación de IH-SIMC en Cantabria y Asturias, donde ya se ha calibrado una primera versión del módulo hidrológico, con modificaciones específicas para representar acuíferos de alta montaña, procesos kársticos y surgencias. En el País Vasco también se utiliza desde 2021 una versión adaptada de IH-SIMC (aplicación específica de escritorio) como sistema de alerta temprana de inundaciones.

Estos desarrollos constituyen un primer paso para adaptar IH-SIMC a las condiciones de las cuencas españolas y explorar su utilidad como herramienta de apoyo a la evaluación y priorización de medidas de adaptación en la planificación hidrológica.

6. Conclusiones

Los EACC proporcionan una base para incorporar el riesgo climático a la planificación hidrológica española. Sin embargo, para pasar del diagnóstico a la toma de decisiones es necesario disponer de herramientas que permitan evaluar cuantitativamente la eficacia de las medidas de adaptación frente a escenarios sin intervención, considerando tanto sus beneficios como los posibles efectos sobre otros servicios y usos del agua.

La experiencia del proyecto Cuencas Resilientes demuestra la utilidad de integrar la modelización hidrológica, la gestión de los recursos hídricos y la evaluación de servicios ecosistémicos en un sistema de apoyo a la decisión. Mediante IH-SIMC se caracterizó la amenaza de escasez hídrica en diez cuencas panameñas y se evaluaron diferentes escenarios de AbE en las tres cuencas priorizadas, Chiriquí, Grande y Parita. La representación de las medidas mediante modificaciones explícitas de los parámetros del modelo permitió cuantificar sus efectos y comparar alternativas de intervención bajo condiciones climáticas históricas y futuras.

Los resultados muestran que la combinación de restauración de laderas y riberas con prácticas agroforestales y silvopastoriles puede mejorar la regulación de los caudales de estiaje y reducir el indicador de riesgo potencial de inundación (FDI) y los aportes de sedimentos, con respuestas diferentes según las características de cada cuenca, mientras que la implantación de caudales ecológicos contribuye a reducir la alteración del régimen hidrológico. La evaluación también puso de manifiesto compromisos y limitaciones relevantes: la conservación forestal, por sí sola, no garantiza una reducción de este indicador; los caudales ecológicos pueden disminuir la garantía de determinados usos consuntivos, y las medidas basadas en ecosistemas no compensan

necesariamente los efectos del cambio climático bajo los escenarios más desfavorables. Estos resultados confirman que la eficacia de una medida no puede asumirse a priori, sino que debe evaluarse en función de las condiciones de cada cuenca, de las actuaciones con las que se combina y del escenario climático considerado.

La transferencia de IH-SIMC a MiAMBIENTE, mediante una plataforma operativa y actividades de formación, constituye un paso hacia la incorporación de estas evaluaciones a los procesos de planificación y gestión. La metodología presenta potencial para complementar los EACC en las demarcaciones hidrográficas españolas, mediante la comparación de alternativas de adaptación y la identificación de sus beneficios y compromisos, siempre que se adapte y calibre a las condiciones de cada ámbito.

Agradecimientos

Los autores agradecen a los equipos técnicos de la Oficina del PNUMA en Panamá, del Ministerio de Ambiente de Panamá y de IHCantabria su colaboración en el desarrollo del proyecto Cuencas Resilientes, financiado por el programa Euroclima+ de la Unión Europea. Asimismo, agradecen la contribución de todas las personas que, a lo largo de las distintas etapas de desarrollo, han hecho de IH-SIMC la herramienta que es actualmente.

Material suplementario

Se puede acceder a un vídeo de presentación de IH-SIMC en el siguiente enlace: https://vimeo.com/groups/ihit/videos/1161730951

7. Bibliografía

[1] Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. y Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements* (FAO Irrigation and Drainage Paper 56). FAO.

[2] Benda, L., Miller, D., Andras, K., Bigelow, P., Reeves, G. y Michael, D. (2007). NetMap: A new tool in support of watershed science and resource management. *Forest Science, 53*(2), 206–219.

[3] Budyko, M. I. (1974). *Climate and life*. Academic Press.

[4] Fu, B. P. (1981). On the calculation of the evaporation from land surface. *Scientia Atmospherica Sinica, 5*, 23–31.

[5] Hargreaves, G. H. y Samani, Z. A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture, 1*(2), 96–99.

[6] IHCantabria. (2025a). *Proyecto Cuencas Resilientes: fomentando la adaptación al cambio climático en Panamá a través del enfoque ecosistémico para la seguridad hídrica a nivel de cuenca hidrográfica* [Informes técnicos]. PNUMA; Ministerio de Ambiente de Panamá.

[7] IHCantabria. (2025b). *Simulador integrado de sistemas hídricos (IH-SIMC). Versión Panamá* [Manual de usuario]. PNUMA; Ministerio de Ambiente de Panamá.

[8] Ministerio de Ambiente de Panamá. (2019). *Tercera comunicación nacional sobre cambio climático de Panamá*. https://cdn.miambiente.gob.pa/wp-content/uploads/2020/11/3.TERCERA-COMUNICACION-NACIONAL.pdf

[9] Nash, J. E. y Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I: A discussion of principles. *Journal of Hydrology, 10*(3), 282–290.

[10] Prieto, C., García, E., Mínguez, R., Álvarez, C. y Medina, R. (2013). *Propuesta de un modelo hidrológico agregado basado en ecuaciones generales de crecimiento. Aplicación a la cuenca del río Teifi (UK)* [Ponencia]. Jornadas de Ingeniería del Agua, Valencia, España.

[11] Running, S., Mu, Q., Zhao, M. y Moreno, A. (2021). *MOD16A2GF MODIS/Terra net evapotranspiration gap-filled 8-day L4 global 500m SIN grid V061* [Conjunto de datos]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD16A2GF.061

[12] Sampedro, N., García, E., Álvarez, C., Tejerina, B., Rojo, J. y Cacho, E. (2026a, 19–23 de octubre). *IH-SIMC: herramienta integrada de simulación para la gestión hídrica y la resiliencia de cuencas hidrográficas* [Ponencia]. XXXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Valparaíso y Viña del Mar, Chile. Artículo aceptado para su publicación en las memorias del congreso.

[13] Sampedro, N., García, E., Álvarez, C. y Tejerina, B. (2026b, 19–23 de octubre). *Evaluación del impacto hidrológico de soluciones basadas en la naturaleza mediante el modelo IH-SIMC* [Ponencia]. XXXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Valparaíso y Viña del Mar, Chile. Artículo aceptado para su publicación en las memorias del congreso.

[14] Syvitski, J. P. M. y Milliman, J. D. (2007). Geology, geography, and humans battle for dominance over the delivery of fluvial sediment to the coastal ocean. *The Journal of Geology, 115*(1), 1–19.

CONAMA 2026