

Soluciones basadas en la naturaleza en la cuenca alta del Yaque del Norte

Restauración de ecosistemas
y fortalecimiento de la
seguridad hídrica

Soluciones basadas en la naturaleza en la cuenca alta del Yaque del Norte

Restauración de ecosistemas y fortalecimiento de la seguridad hídrica

Carolina Nogueira Kückelheim
c.nogueira@tnc.org

Débora Miranda
debora.miranda@tnc.org

Juan González
juan.gonzalez@tnc.org

Miguel Cañón Ramos
miguel.canon@tnc.org

Stefanía Almazán Casali
stefania.almazan@tnc.org

Para obtener más información sobre este contenido, el equipo puede ser contactado directamente

Diseño y diagramación

Puntoaparte
Editores
www.puntoaparte.com.co

Fotografía de portada y contraportada

Joel Leger/Shutterstock.com

The Nature Conservancy 

 Nature for Water
Local solutions. Global impact.

 PEGASYS
CHANGING LIVES CHANGING WORLDS

FONDO AGUA
YAQUE DEL NORTE

Contenido

Listado de acrónimos.....7

Resumen ejecutivo
8

Introducción
12

Descripción general de la cuenca del río Yaque del Norte.....15

Valores de conservación de la cuenca alta del río Yaque del Norte.....15

Atributos ecológicos clave.....16

Retos para la protección y recuperación de valores de conservación.....18

Las SbN y su contribución a la seguridad hídrica19

El portafolio SbN y su conexión con los valores de conservación....20

Análisis biofísico – estimación de beneficios
22

Metodología.....22

Descripción de herramientas de modelación.....24

Información de entrada y actores clave.....25

Configuración y calibración del modelo.....27

Simulación de escenarios28

Estimación de beneficios biofísicos.....35

Análisis beneficio- costo de la inversión en portafolios SbN
44

Estimación de costos de las inversiones en SbN.....45

Estimación de beneficios de las inversiones en SbN47

Conclusiones y recomendaciones
52



Listado de acrónimos

AICA	Área de Importancia para la Conservación de Aves
APEDI	Asociación para el Desarrollo, Inc.
BaU	Business as Usual
CEPAL	Comisión Económica para América Latina y el Caribe
CORAASAN	Corporación del Acueducto y Alcantarillado de Santiago
CSC	Costo social del carbono
EGEHID	Empresa de Generación Hidroeléctrica Dominicana
FAYN	Fondo Agua Yaque del Norte
N4W	Nature for Water
NTU	Unidades nefelométricas de turbidez
RBC	Relación beneficio-costos
SbN	Soluciones basadas en la naturaleza
SST	Sólidos suspendidos totales
TNC	The Nature Conservancy
VPN	Valor presente neto

Resumen ejecutivo



El Fondo Agua Yaque del Norte (FAYN), en su primera década de operación, se ha consolidado como un referente regional en la promoción de soluciones basadas en la naturaleza (SbN) para fortalecer la seguridad hídrica, conservar ecosistemas estratégicos y promover el desarrollo sostenible en la cuenca alta del río Yaque del Norte, en la República Dominicana. En este contexto, el equipo de Nature for Water (N4W) realizó un estudio técnico, biofísico y económico, fundamentado en evidencia científica y criterios de priorización territorial, evaluando el impacto potencial de la implementación de un portafolio de SbN a escala de paisaje.

La cuenca alta del río Yaque del Norte, que se extiende sobre 7,053 km², abastece de agua a aproximadamente 1.8 millones de personas y sostiene actividades clave como la agricultura, la ganadería, la generación hidroeléctrica y el ecoturismo. Su importancia estratégica radica en la provisión de servicios ecosistémicos esenciales, entre ellos el

suministro de agua potable y la producción de energía eléctrica; la conservación de la biodiversidad y los ecosistemas; el soporte a necesidades comunitarias como el saneamiento básico y el fomento del turismo y la recreación. Estos elementos, denominados valores de conservación, son fundamentales para el bienestar humano y la sostenibilidad económica y ambiental de la región.

Sin embargo, estos valores enfrentan presiones crecientes derivadas de i) los cambios en las coberturas del suelo —incluyendo deforestación, erosión, pérdida de hábitat y deterioro de la calidad del agua—; ii) la transición socioeconómica, marcada por la expansión agrícola y ganadera; y iii) los impactos del cambio climático que intensifican la variabilidad hidrológica y la frecuencia de eventos extremos. Para hacer frente a estos desafíos se evaluó un portafolio de SbN compuesto por cinco estrategias complementarias: la conservación de ecosistemas nativos, la restauración asistida de bosques, la promoción de buenas prácticas agrícolas, el fomento de sistemas silvopastoriles y la instalación de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales.

La metodología empleada combina modelación hidrosedimentológica (SIGA-CAL), simulación de escenarios de cambio climático y uso del suelo (Dinámica EGO), análisis de calidad de hábitat (INVEST) y evaluación económica de costos y beneficios con un horizonte de 50 años. Se consideran escenarios futuros con y sin intervención integrando datos climáticos, topográficos, hidrológicos, socioeconómicos además de técnicas de priorización espacial y monetización de beneficios para actores clave como Corporación del Acueducto y Alcantarillado de Santiago (CORASAAN) y la Empresa de Generación Hidroeléctrica Dominicana (EGEHID). El estudio propone cinco escenarios de inversión con implementaciones a lo largo de un periodo de 15 años, con montos que van desde 15 hasta 156 millones de dólares. Todos los escenarios presentan una relación beneficio-costos (RBC) superior a uno.

Los resultados muestran que las SbN generan beneficios significativos. En términos de provisión de agua potable, se estima una reducción de entre 0.1% y 16.5% en las unidades nefelométricas de turbidez (NTU), lo que mejora la calidad del agua cruda y reduce los costos de tratamiento. En cuanto a la generación hidroeléctrica, se evitaría la acumulación de entre 0.5 y 3.3 millones de m³ de sedimentos en el embalse Tavera-Bao, lo que podría representar ahorros de hasta 172 millones de dólares en manejo de sedimentos y extender la vida útil del embalse hasta en 9 años. Desde el punto de vista ecológico, se proyecta una mejora en la calidad del hábitat en un área de entre 32,204 y 96,014 hectáreas, así como la adopción de prácticas sostenibles en entre 614 y 27,094 hectáreas. Además, las SbN aumentarían entre un 0.5% y un

7.2% la capacidad de almacenamiento de agua durante eventos de crecida, y reducirían entre 1.2 y 5.1 millones de toneladas las emisiones de CO₂e. En materia de saneamiento, la instalación de humedales artificiales permitiría mejorar el acceso a servicios básicos para entre 4,710 y 18,841 personas, especialmente en comunidades rurales y periurbanas con baja cobertura de infraestructura. Estos beneficios se traducen en mayor resiliencia climática y sanitaria, reducción de riesgos y fortalecimiento de medios de vida sostenibles para las comunidades locales.

El sistema Tavera-Bao, infraestructura crítica para el abastecimiento de agua y la generación hidroeléctrica, desempeña un rol estratégico en la regulación de caudales, la calidad del agua y la gestión de riesgos. Su funcionamiento eficiente permite estabilizar procesos ecológicos y operativos esenciales. Por ello, se recomienda fortalecer el monitoreo continuo y la recolección sistemática de datos para garantizar su operación óptima a largo plazo y asegurar que continúe cumpliendo su función crítica para la seguridad hídrica y energética del país.

En conclusión, el portafolio de SbN propuesto por el equipo de N4W ofrece una hoja de ruta basada en evidencia para consolidar un modelo de gestión hídrica resiliente y sostenible en la cuenca alta del Yaque del Norte. Se recomienda avanzar hacia la implementación progresiva de SbN, integrando estas soluciones en la planificación territorial, fortaleciendo capacidades locales y movilizandomecanismos financieros innovadores.

VALORES DE CONSERVACIÓN



Biodiversidad



Turismo y
recreación



Ecosistemas



Agua potable



Energía
eléctrica



Saneamiento
básico

RETOS DE
SEGURIDAD
HÍDRICA

Cambio en la cobertura de suelo

Cambio climático

Transición socioeconómica
(Expansión agrícola y ganadera)

SOLUCIONES
BASADAS EN LA
NATURALEZA

Protección y conservación
de ecosistemas

Buenas prácticas agrícolas

Restauración asistida

Instalación de humedales artificiales

Sistemas silvopastoriles

BENEFICIOS DEL PORTAFOLIO SbN

4.4 tco₂e

Reducción de
emisiones

13,779 ha

Área con
prácticas
sostenibles

5.6 %

Reducción
promedio de
turbidez en Noriega

2.1 Mm³

Reducción en volumen
de sedimentos en el
embalse Tavera

5.3 %

Aumento en capacidad
de almacenamiento
durante crecientes

14,131

Personas directamente
beneficiadas por los
humedales
(la cuenca provee agua y servicios
ecosistémicos a 1,8 millones)

54,238 ha

Área adicional con
calidad de hábitat
mejorada

Introducción



El Fondo Agua Yaque del Norte (FAYN), establecido en 2015, ha desempeñado un papel fundamental en la promoción de la gestión integral de la cuenca del río Yaque del Norte, consolidándose como un referente regional en la implementación de SbN. A lo largo de su primera década de operación, el FAYN ha impulsado acciones orientadas a la restauración y conservación de ecosistemas estratégicos, la mejora de la calidad del agua y el fortalecimiento de la resiliencia de las comunidades locales frente a los desafíos ambientales y climáticos.

Este informe presenta los resultados de un estudio técnico, biofísico y económico realizado por el equipo de Nature for Water (N4W), con el objetivo de evaluar el impacto potencial de un portafolio de SbN en la cuenca alta del río Yaque del Norte. El análisis se enfoca en la identificación de beneficios ecológicos, sociales y económicos derivados de la implementación de estas soluciones a escala de paisaje, considerando distintos niveles de inversión y escenarios futuros de cambio climático y uso del suelo.

Figura 1. Acercamiento metodológico estudio N4W para el FAYN

1

Valores de conservación

Identificación de valores de conservación (los beneficios ecológicos, sociales y culturales) que dependen del buen funcionamiento de los procesos naturales en la cuenca. Su identificación permite enfocar los esfuerzos de conservación en lo que más contribuye al bienestar humano y ambiental.

2

Retos de seguridad hídrica

La cuenca enfrenta presiones como la pérdida de cobertura boscosa, la expansión agrícola y el cambio climático. Estos factores comprometen directamente los valores de conservación. Identificar estos retos permite orientar soluciones efectivas para asegurar la sostenibilidad hídrica y el bienestar de las comunidades.

3

Caracterización de la cuenca

Análisis del territorio, sus ecosistemas, usos del suelo y dinámicas sociales y productivas. Se describieron las coberturas actuales, los ecosistemas estratégicos y las actividades económicas clave. Permite entender cómo el uso del suelo influye en los procesos ecológicos y en la provisión de los valores de conservación priorizados.

4

Visita de campo

Verificación en terreno de las condiciones ecológicas de la cuenca. Se realizaron recorridos por subcuencas, se identificaron zonas degradadas y se dialogó con actores locales para validar prioridades y percepciones. Asegura que el análisis técnico esté alineado con la realidad local y fortalece la legitimidad de las intervenciones propuestas.

5

Recopilación de información y modelación

Simulación de procesos hidrológicos, de erosión y calidad del agua bajo distintos escenarios. Se aplicaron los modelos SIGA-CAL e INVEST con datos climáticos, topográficos y de uso del suelo para estimar caudales, sedimentos, nutrientes y calidad de hábitat. Permite comprender las dinámicas de la cuenca y tendencias basadas en evidencia científica.

6

Simulación de escenarios

Comparación entre un futuro sin intervención (BaU) y futuros con distintas combinaciones de SbN. Se modelaron cinco niveles de inversión en SbN (15M a 156M USD), evaluando sus efectos sobre el paisaje y los servicios ecosistémicos. Ayuda a visualizar los beneficios potenciales de invertir en SbN, y a priorizar acciones.

7

Evaluación de beneficios biofísicos y económicos

Análisis de los impactos biofísicos sobre el territorio y los beneficios monetarios derivados de implementar SbN. Se calcularon los costos de implementación y se aplicó un análisis de relación beneficio-coste (RBC). El análisis permite demostrar que las SbN no solo mejoran las condiciones ecológicas de la cuenca, sino que también generan beneficios económicos concretos.



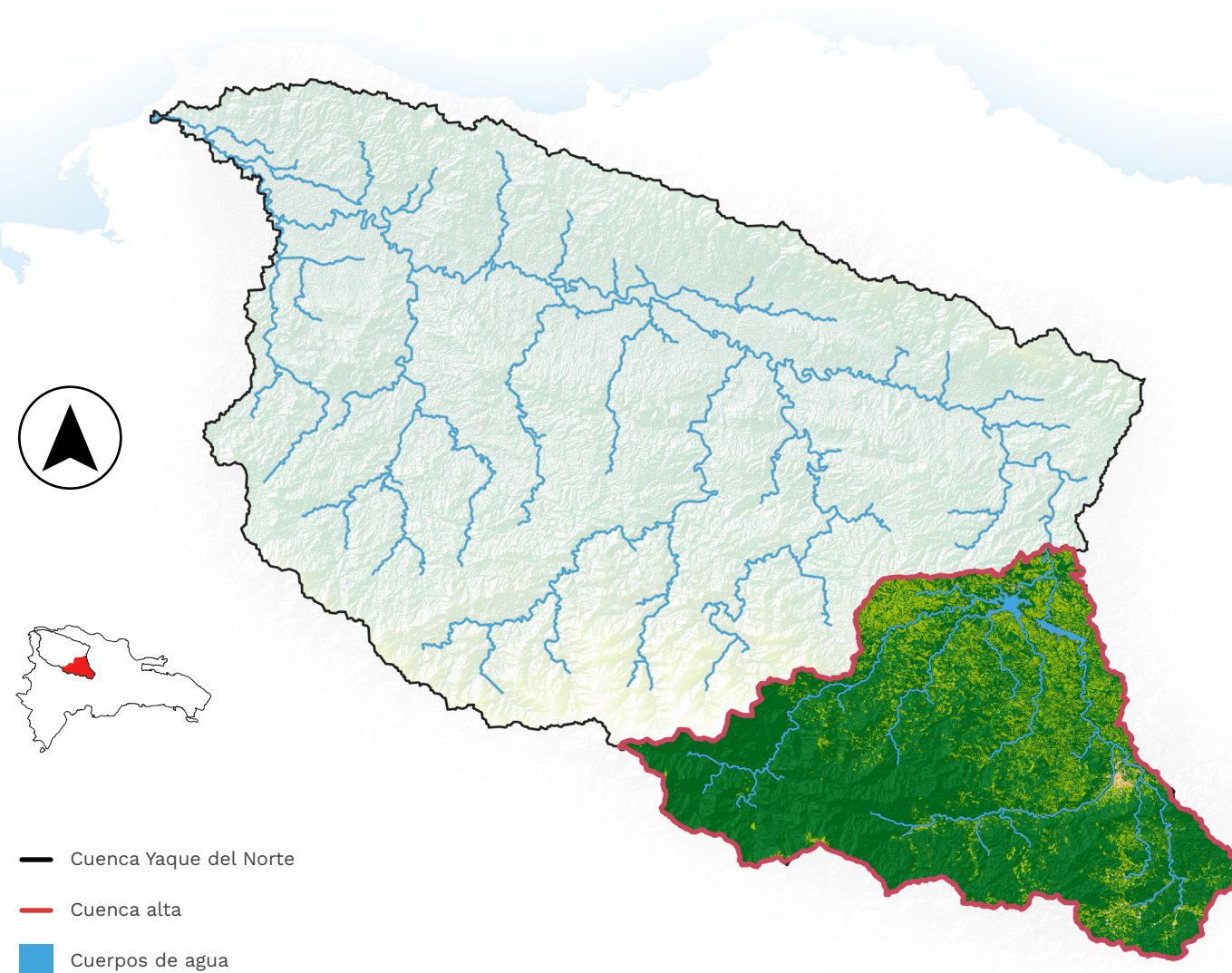
Resultados

1. El estudio muestra que las SbN propuestas reducen la erosión, mejoran la calidad del agua y estabilizan el régimen hidrológico.
2. Se desarrolló un portafolio de proyectos y un caso de negocio con escenarios de inversión.
3. Las herramientas biofísicas y económicas generadas serán propiedad del FAYN y sus actores, permitiendo futuros análisis estratégicos.
4. Estas acciones fortalecen los valores de conservación priorizados —agua, energía, biodiversidad y bienestar comunitario— y trazan una hoja de ruta para enfrentar los retos de seguridad hídrica.

La Figura 1 ilustra el acercamiento metodológico utilizado. Primero, se identificaron los beneficios de particular interés para los miembros del FAYN (denominados valores de conservación) y su conexión a los aspectos biofísicos de la cuenca (denominados atributos ecológicos clave) que más influyen en la continua provisión de estos beneficios. Una vez identificados estos dos componentes, se definieron las conexiones entre la implementación de SbN y el soporte de los atributos ecológicos clave de interés. Con base en este esquema

de análisis, el equipo de N4W fue capaz de describir el potencial efecto de distintos niveles de inversión en portafolios de SbN sobre los valores de conservación de interés. En la medida en que fue posible, este documento reporta beneficios potenciales en términos monetarios, cuantitativos o simplemente descripciones cualitativas. Cabe resaltar que el nivel de detalle del análisis realizado está relacionado con disponibilidad de información y limitaciones de tiempo y no un reflejo del valor o importancia de los beneficios descritos.

Figura 2. Localización general de la cuenca alta del río Yaque del Norte.
Fuente: N4W.



Descripción general de la cuenca del río Yaque del Norte

El río Yaque del Norte, ubicado en el noroeste de la República Dominicana, recorre 296 km y abastece de agua y servicios ecosistémicos a aproximadamente 1.8 millones de personas en una cuenca de 7,053 km² que incluye provincias como Dajabón, Monte Cristi, Santiago, Santiago Rodríguez y La Vega. Esta cuenca sostiene actividades económicas clave como la generación hidroeléctrica (140–169 GWh), la agricultura en más de 51,000 hectáreas y la conservación de importantes zonas boscosas. El estudio se enfoca en la cuenca alta, que comprende subcuencas como Bao, Jagua y Jimenoa, desde la cordillera Central hasta el embalse Tavera-Bao (Figura 2).

Esta región presenta una cobertura de suelo mixta —bosques de coníferas y latifoliados, pastos, cultivos perennes y hortalizas— cuya distribución responde a factores orográficos e históricos, y cuyos usos impactan directamente los procesos ecológicos y los beneficios que la sociedad obtiene del río.

Valores de conservación de la cuenca alta del río Yaque del Norte

La cuenca alta del río Yaque del Norte alberga una diversidad de valores de conservación que reflejan su importancia ecológica, social y económica. Estos valores, identificados en conjunto con actores locales y socios del FAYN, guían las prioridades de conservación en la región. Entre ellos destacan los servicios ecosistémicos, las necesidades comunitarias, la biodiversidad, los ecosistemas estratégicos y los valores culturales.

Los **servicios ecosistémicos de provisión**, como el suministro de agua potable y la generación de energía hidroeléctrica, son fundamentales. La Corporación de Acueducto y Alcantarillado de Santiago (CORAASAN) y la Empresa de Generación Hidroeléctrica Dominicana (EGEHID) dependen directamente del agua captada en la cuenca alta, lo que subraya la necesidad de mantener un régimen hidrológico estable y de alta calidad. Además, se reconocen otros servicios como la provisión de agua para la agricultura, la regulación de caudales líquidos y sólidos, el secuestro de carbono, la filtración de nutrientes y contaminantes, y el atrapamiento de sedimentos por parte de la vegetación natural.

Las **necesidades comunitarias** incluyen el acceso seguro a agua, el saneamiento básico y el soporte a medios de vida rurales. En zonas donde la infraestructura es limitada, como comunidades rurales, la implementación

de soluciones como humedales artificiales puede mejorar la salud pública y la calidad del agua. Estas acciones también contribuyen a los esfuerzos coordinados entre gobierno y sociedad civil para mejorar el acceso a servicios básicos a lo largo de la cuenca.

La cuenca alta alberga **ecosistemas estratégicos** como bosques de coníferas, latifoliados y secos; humedales; sabanas; matorrales y pastizales que sostienen procesos ecológicos esenciales como el ciclo hidrológico, la conectividad de hábitats y el almacenamiento de carbono. Estos ecosistemas son el soporte de una **biodiversidad** notable, con una alta concentración de especies endémicas y amenazadas, incluyendo 186 especies de plantas vasculares endémicas, 11 especies de anfibios endémicos, 2 mamíferos endémicos (el solenodonte y la jutía), y 14 especies de aves endémicas. El Parque Nacional Armando Bermúdez es un núcleo clave de conservación, reconocido como Área de Importancia para la Conservación de Aves (AICA), y su mantenimiento es vital para la resiliencia del paisaje y para sostener interacciones ecológicas como el desove de peces, la migración de aves y el equilibrio de las redes tróficas.

El **turismo y la recreación** se reconocen como un valor cultural relevante. La calidad ambiental, la biodiversidad y los paisajes naturales de la cuenca alta ofrecen oportunidades para el disfrute, la educación y el desarrollo de actividades recreativas, lo que contribuye al bienestar de las comunidades locales y al fortalecimiento de economías rurales.

Los valores analizados en estudio son: producción de agua potable, generación de energía eléctrica, captura de carbono y emisiones evitadas, saneamiento básico, biodiversidad, ecosistemas, y turismo y recreación. La provisión continua de estos beneficios depende de conservar ciertas condiciones biofísicas del paisaje, como la cobertura vegetal y el uso del suelo, las cuales presentan distintos niveles de sensibilidad frente a cambios en el territorio.

Atributos ecológicos clave

La salud y funcionalidad de los ecosistemas acuáticos en la cuenca alta del río Yaque del Norte dependen de una serie de atributos ecológicos clave. Estos atributos sostienen los valores de conservación priorizados y son fundamentales para la resiliencia y sostenibilidad del territorio (Figura 3). Dado el alcance del estudio y la disponibilidad de información, se priorizó el análisis de tres atributos con mayor influencia sobre los beneficios identificados: el régimen hidrológico, el transporte de sedimentos y la calidad del agua.

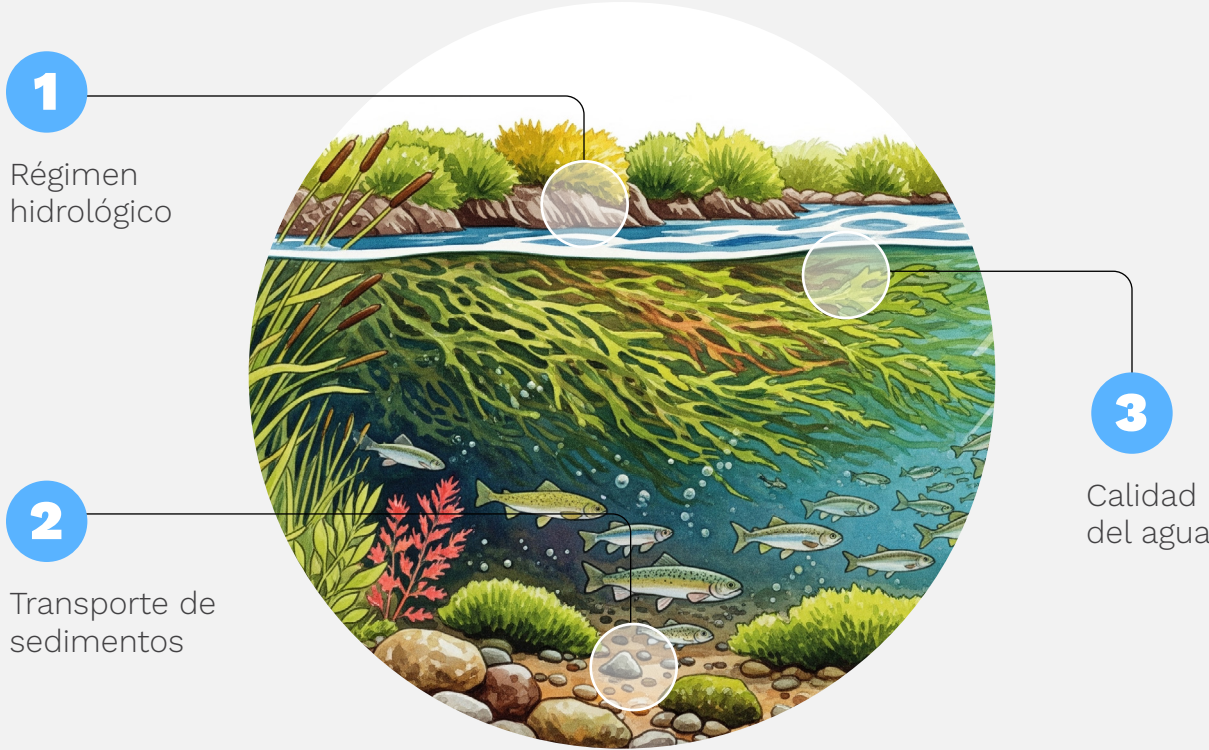
El **régimen hidrológico** se refiere a los patrones de flujo del agua en el tiempo, incluyendo su frecuencia, magnitud y duración. En la cuenca alta, las coberturas naturales juegan un rol esencial al almacenar agua durante eventos de caudal alto y liberar flujos regulados en épocas secas, reduciendo riesgos de inundación y garantizando disponibilidad hídrica.

El **transporte de sedimentos** es otro atributo crítico, ya que mantiene la estructura física de los sistemas fluviales. En esta cuenca, la acumulación de sedimentos en el embalse Tavera-Bao —debido a la falta de manejo y a la erosión en zonas altas— reduce su capacidad de almacenamiento y aumenta la turbidez del agua, elevando los costos de potabilización.

La **calidad del agua**, determinada por variables como nutrientes, temperatura, oxígeno disuelto y turbidez, es esencial tanto para los ecosistemas como para el uso humano. Su deterioro afecta directamente la provisión de servicios ecosistémicos y la salud de las especies acuáticas.

Además de estos tres atributos priorizados, el estudio reconoce la importancia de otros componentes como la conectividad ecológica (movimiento de agua, nutrientes y especies), la estructura física de los hábitats (zonas ribereñas, humedales, pozas) y la composición biótica (diversidad y abundancia de especies). Aunque no fueron cuantificados en detalle, estos atributos complementan la comprensión integral del funcionamiento ecológico de la cuenca.

Figura 3. Atributos ecológicos clave



Fuente: N4W.

Retos para la protección y recuperación de valores de conservación

La cuenca alta del río Yaque del Norte enfrenta múltiples desafíos que amenazan su capacidad para seguir ofreciendo servicios clave como agua potable, energía hidroeléctrica, soporte a la biodiversidad y actividades productivas. Estos retos incluyen cambios en la cobertura del suelo, transformaciones socioeconómicas, impactos del cambio climático y problemáticas adicionales como el manejo de residuos y la contaminación urbana.

Los **cambios en la cobertura vegetal**, especialmente la pérdida de bosque nativo en zonas de alta pendiente, han incrementado la erosión y la exportación de sedimentos hacia el embalse Tavera-Bao, afectando su capacidad de regulación y la calidad del agua. Las actividades agropecuarias y urbanas también contribuyen a la contaminación hídrica, mientras que la falta de tratamiento de aguas residuales domésticas representa un riesgo para la salud pública, la biodiversidad y el uso recreativo de los cuerpos de agua.

La **transición socioeconómica de la cuenca**, marcada por el paso de economías de subsistencia a sistemas comerciales, ha transformado el uso del suelo y la dinámica poblacional. La creación del Parque Nacional Armando Bermúdez en 1956, aunque clave para la conservación, también implicó restric-

ciones al uso de los recursos naturales y desplazamientos de comunidades. Actualmente, fuera del parque, predominan actividades agrícolas y ganaderas, con cultivos como tayota, café, cacao y limón, y zonas de pastoreo.

El **cambio climático** agrava los retos enfrentados al alterar los patrones de precipitación, aumentar la frecuencia de eventos extremos y reducir la previsibilidad del caudal de los ríos. Esto compromete la seguridad hídrica, la productividad agrícola y la integridad de los ecosistemas.

Frente a este panorama, garantizar la seguridad hídrica a largo plazo requiere de acciones coordinadas entre los actores de la cuenca, con un enfoque que combine conservación, adaptación y desarrollo sostenible.

Las SbN representan una herramienta clave para enfrentar estos desafíos, ya que permiten mantener múltiples valores de conservación de forma simultánea, especialmente cuando se implementan a escala de paisaje.

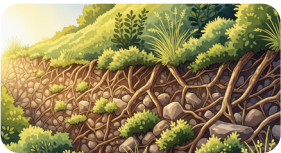
Las SbN y su contribución a la seguridad hídrica

Las SbN son estrategias que aprovechan los procesos ecológicos para proteger y recuperar beneficios ambientales esenciales, como el abastecimiento de agua y la resiliencia frente al cambio climático. A diferencia de la infraestructura gris, las SbN ofrecen múltiples beneficios simultáneos, incluyendo la regulación del régimen hidrológico, la mejora de la calidad del agua, la

conservación de la biodiversidad y la reducción de la erosión.

El portafolio de SbN evaluado en este estudio se enfoca en la protección de la cobertura vegetal y la implementación de buenas prácticas productivas, con el objetivo de reducir la exportación de sedimentos hacia el embalse Tavera-Bao y proteger las zonas de recarga hídrica. Estas prácticas no son nuevas para el FAYN, sino que reflejan años de experiencia acumulada por el Fondo y sus socios en la cuenca alta del Yaque del Norte.

Las SbN consideradas incluyen:



Protección y conservación de ecosistemas nativos: busca evitar la conversión de bosques nativos a otros usos del suelo. Sus beneficios incluyen la regulación hídrica, el control de la erosión, la mejora de la calidad del agua y la conservación de la biodiversidad.



Restauración asistida de bosques nativos: combina reforestación y cambio de uso del suelo en zonas degradadas. Se prioriza el uso de especies nativas y se requiere acompañamiento técnico para asegurar su éxito. Sus beneficios se observan a mediano plazo e incluyen regulación hídrica, secuestro de carbono y recuperación de hábitats.



Fomento de buenas prácticas agrícolas: promueve la transición de cultivos erosivos como la tayota hacia sistemas más sostenibles como café de sombra, cacao y agroforestería. Estas prácticas mejoran la infiltración, reducen la erosión y aumentan la productividad agrícola.



Fomento de sistemas silvopastoriles: transforma pastizales en sistemas ganaderos sostenibles mediante arborización, rotación de potreros y protección de cuerpos de agua. Contribuye al control de la erosión, mejora la calidad del agua y genera beneficios económicos para los productores.



Construcción de humedales artificiales: ofrece una solución efectiva para el tratamiento local de aguas residuales urbanas, mejorando la calidad del agua sin requerir cambios en el uso del suelo. También aporta a la recarga de acuíferos y al secuestro de carbono.

Estas intervenciones están alineadas con el Plan de Conservación del FAYN (2015) y han sido priorizadas en su estrategia institucional. Su implementación a escala de paisaje representa una oportunidad para fortalecer la seguridad hídrica y la sostenibilidad ambiental de la cuenca.

El portafolio SbN y su conexión con los valores de conservación

El portafolio de SbN propuesto para la cuenca alta del río Yaque del Norte contribuye de manera significativa a la protección y recuperación de los valores de conservación priorizados. Estas intervenciones fortalecen procesos ecológicos clave como el régimen hidrológico, la calidad del agua y el transporte de sedimentos, generando beneficios ecológicos, sociales y económicos.

El análisis integra estimaciones monetizadas (como la reducción de costos de potabilización y manejo de sedimentos), métricas biofísicas (como la disminución de sólidos suspendidos y mejora en la calidad del agua) y descripciones cualitativas (como la mejora del hábitat y la resiliencia climática). Esta visión integral permite evidenciar cómo las SbN no solo abordan desafíos ambientales, sino que también fortalecen la salud pública, la economía local y la gobernanza comunitaria.

A continuación, se resumen los principales aportes del portafolio SbN a cada valor de conservación priorizado:

- **Producción de agua potable:** La conservación y restauración de coberturas vegetales en zonas de alta pendiente reduce la erosión y la carga de sedimentos hacia el embalse Tavera-Bao, mejorando la calidad del agua cruda y disminuyendo la turbidez. Esto se traduce en menores costos de tratamiento en la planta Noriega (beneficio monetizado). Además, estas intervenciones estabilizan los caudales, aumentan la infiltración y fortalecen la resiliencia del sistema de abastecimiento frente al cambio climático, generando empleo local y fortaleciendo la gobernanza comunitaria.
- **Producción de energía eléctrica:** Las SbN disminuyen la erosión y la sedimentación en el embalse, preservando su capacidad de generación hidroeléctrica y retrasando la necesidad de limpiezas costosas (beneficio monetizado). También estabilizan los caudales, mejoran la eficiencia energética y mitigan riesgos de inundaciones y deslizamientos. Estas acciones protegen la infraestructura, reducen costos por eventos extremos y promueven un modelo de desarrollo sostenible.
- **Saneamiento básico:** La instalación de humedales artificiales reduce significativamente las cargas de nutrientes y patógenos en cuerpos de agua, mejorando la calidad del agua y reduciendo riesgos sanitarios. Esta solución natural contribuye al bienestar comunitario, al secuestro de carbono y a la recarga de acuíferos. Además, genera empleo, oportunidades educativas y fortalece la gobernanza local.

- **Captura de carbono y emisiones evitadas:** La conservación de bosques y la implementación de buenas prácticas agrícolas aumentan el almacenamiento de carbono en biomasa y suelos, reduciendo emisiones frente al escenario tendencial. Estas acciones contribuyen a la mitigación del cambio climático y disminuyen la vulnerabilidad de las comunidades locales.
- **Biodiversidad:** Las SbN protegen hábitats críticos para especies endémicas y amenazadas, mantienen la conectividad ecológica y favorecen la regeneración natural. La implementación de sistemas silvopastoriles y prácticas agrícolas sostenibles reduce la fragmentación del paisaje y fomenta la coexistencia entre producción y conservación. También se generan beneficios económicos sostenibles y se fortalece la identidad cultural.
- **Ecosistemas:** Las intervenciones restauran procesos ecológicos esenciales como el ciclo del agua y

la conectividad de hábitats. Ecosistemas saludables mejoran la calidad del agua, actúan como barreras naturales contra enfermedades y ofrecen espacios para el bienestar humano. Además, aumentan la capacidad de adaptación frente a perturbaciones climáticas y promueven el uso sostenible del territorio.

- **Turismo ecológico:** La restauración de bosques y la instalación de humedales artificiales mejoran la calidad del agua y el paisaje, fortaleciendo el ecoturismo en la cuenca. Estas intervenciones aumentan el atractivo escénico, promueven la educación ambiental y fomentan el turismo responsable. También reducen riesgos sanitarios, preservan valores culturales y espirituales, y diversifican los medios de vida rurales, fortaleciendo la economía local y la participación comunitaria en la gestión ambiental.

► Foto: FAYN



Análisis biofísico – estimación de beneficios



Metodología

Con el objetivo de estimar los beneficios en términos económicos y biofísicos en la cuenca alta del río Yaque del norte, se planteó una metodología que permitiera la evaluación de diferentes escenarios futuros influenciados por cambios en coberturas y proyecciones climáticas futuras. La Figura 4 presenta el esquema metodológico desarrollado en la estimación de beneficios en la cuenca alta del río Yaque Norte.



Figura 4. Esquema metodológico



Descripción de herramientas de modelación

Para simular los efectos de las SbN en la cuenca alta del río Yaque del Norte, se utilizaron modelos matemáticos que permiten representar con precisión los procesos hidrológicos, sedimentológicos, de calidad del agua y de hábitat. La herramienta principal fue el modelo SIGA-CAL v1.0, desarrollado por The Nature Conservancy y Gotta Ingeniería, que integra múltiples módulos interconectados

Modelo hidro-sedimentológico SIGA-CAL

SIGA-CAL permite simular dinámicamente la respuesta de la cuenca ante distintos escenarios de intervención, considerando cambios en el uso del suelo, prácticas de conservación y condiciones de escorrentía. El modelo incluye módulos para:

- **Fenología:** simula la transformación temporal de coberturas vegetales, evaluando transiciones hacia estados de conservación, restauración o manejo sostenible.
- **Hidrología:** representa el ciclo hidrológico terrestre considerando trayectorias preferenciales de flujo y variaciones en la precipitación.
- **Sedimentos:** analiza procesos de erosión y transporte en laderas y cauces, así como la contribución de movimientos en masa, diferenciando entre fracciones de sedimentos (arcillas, limos, arenas).

- **Calidad del agua:** simula la dinámica de nutrientes, bacterias y otros contaminantes (como nitrógeno, fósforo, *E. coli*, DBO, oxígeno disuelto), considerando fuentes difusas y puntuales.

El modelo fue calibrado y validado con datos locales (clima, suelos, cobertura) y técnicas estadísticas avanzadas utilizando indicadores como el coeficiente de Nash-Sutcliffe y el RMSE para asegurar su confiabilidad.

El enfoque dinámico del modelo permite evaluar día a día los efectos acumulativos de las SbN, considerando cambios en el uso del suelo, desviaciones de caudal, vertimientos y expansión ganadera. Esta capacidad es clave para representar con mayor precisión los impactos de las intervenciones en escenarios cambiantes.

Modelo de calidad del hábitat

Se utilizó el modelo INVEST para evaluar la calidad del hábitat en la cuenca, combinando información sobre cobertura y uso del suelo con amenazas a la biodiversidad. El modelo asigna valores de hábitat según el grado de intervención: 0 para usos productivos y 1 para áreas naturales.

Aunque INVEST no se enfoca en especies específicas, permite estimar la calidad general del hábitat y visualizar espacialmente los impactos de las SbN sobre la biodiversidad.

Información de entrada y actores clave

La caracterización de la cuenca y la configuración del modelo se basaron en información aportada por actores clave con roles estratégicos en la gestión del territorio:

- **CORAASAN:** Entidad operadora del sistema de acueducto de Santiago, directamente interesada en mejorar la calidad del agua y reducir la turbidez para garantizar el abastecimiento urbano.
- **EGEHID:** Responsable de la operación de los embalses Tavera-Bao y de la generación hidroeléctrica; su gestión depende del control de sedimentos y del régimen hidrológico.
- **Instituto Geográfico Nacional:** Apoya la planificación territorial mediante cartografía base y administrativa esencial para los análisis espaciales.
- **Ministerio de Medio Ambiente:** Autoridad ambiental nacional, clave en el ordenamiento del territorio y en la definición de políticas de conservación.
- **ONAMET:** Proveedor oficial de información climática, fundamental para la modelación hidroclimática y la proyección de escenarios futuros.
- **Plan Sierra:** Socio técnico con experiencia en restauración y manejo sostenible del paisaje; implementa SbN en campo y aporta conocimiento local.

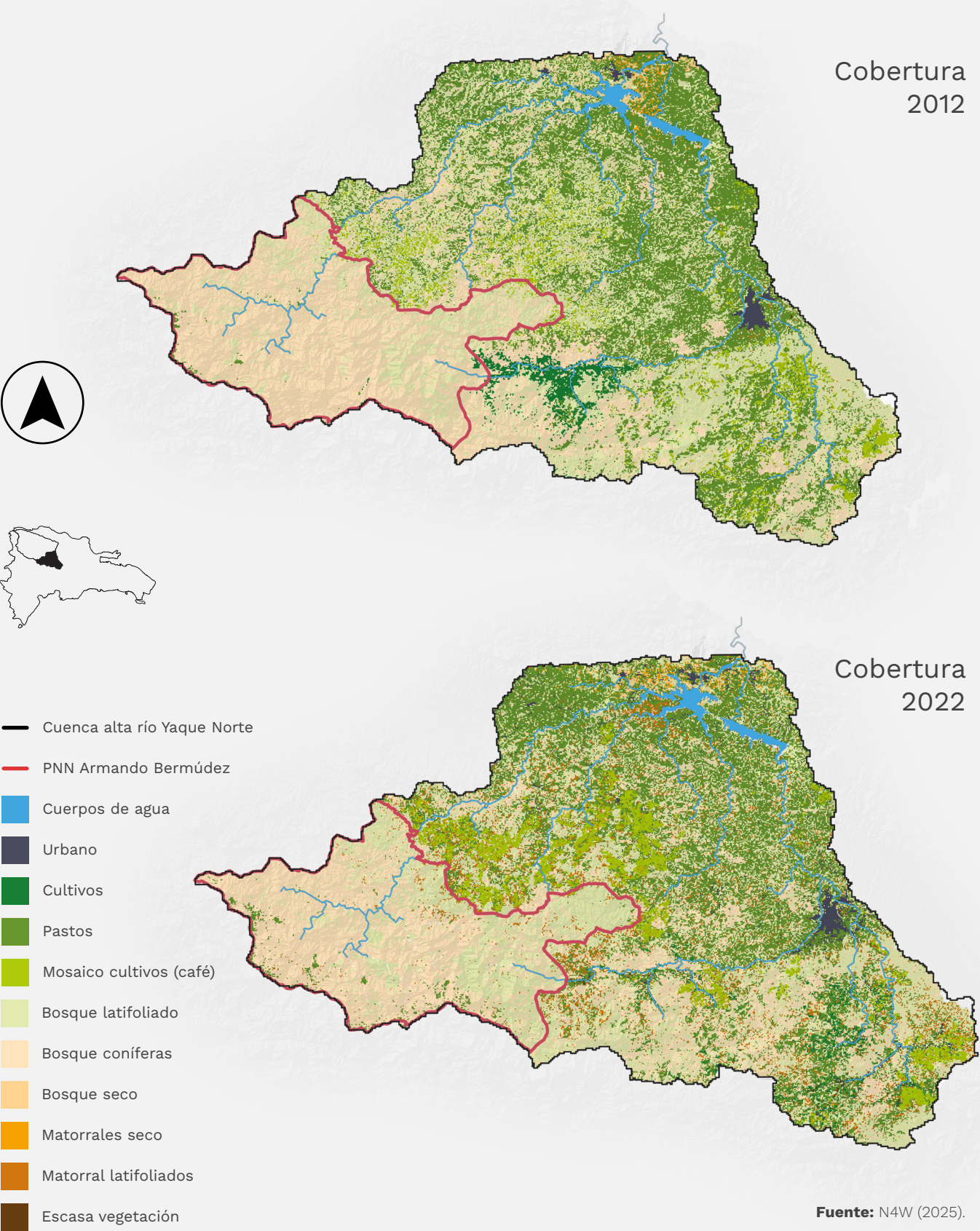
- **Plan Yaque:** ONG con fuerte presencia en la cuenca alta; promueve gobernanza ambiental, educación y monitoreo participativo.
- **INDRHI:** Autoridad nacional en hidrología; lidera la gestión de recursos hídricos y aporta insumos técnicos sobre suelos, geología e hidrogeología.

La información fue validada con metodologías estadísticas para asegurar su calidad y consistencia, reduciendo la incertidumbre en la modelación. Esto permitió una caracterización robusta del territorio, incluyendo clima, uso del suelo y condiciones biofísicas actuales.

Coberturas y usos de la tierra

El análisis de coberturas del suelo entre 1996, 2012 y 2022 muestra transformaciones significativas en la cuenca alta del Yaque del Norte. Se observó una reducción de bosques latifoliados y de coníferas, junto con una fuerte expansión urbana y de matorrales latifoliados. También aumentó el área destinada al cultivo de café, mientras que los cultivos tradicionales disminuyeron. La Figura 5 presenta los cambios observados en las coberturas del suelo entre 2012 y 2022.

Figura 5. Coberturas históricas Yaque del Norte



Un cambio clave en la dinámica territorial es la expansión del cultivo de tayota, especialmente en zonas montañosas como Jarabacoa y Manabao. Aunque su alta productividad ha impulsado su crecimiento, este cultivo genera presiones ambientales importantes: deforestación, erosión en pendientes, uso intensivo de agua y agroquímicos, y riesgo de contaminación de cuerpos de agua. Estas problemáticas resaltan la necesidad de prácticas agrícolas sostenibles para mitigar sus impactos.

Análisis climático histórico

El análisis del clima histórico en la cuenca alta del Yaque del Norte es clave para comprender la dinámica hidrológica y orientar una gestión informada de los recursos naturales. Se utilizaron datos de 42 estaciones climáticas y series globales para caracterizar el comportamiento climático de la región. Se aplicó el concepto de variabilidad climática, diferenciando entre patrones principales —como la estacionalidad, la tendencia, la inercia y los ciclos seculares— y las desviaciones provocadas por fenómenos externos.

En conjunto, se identificó un patrón climático principal fuertemente influenciado por forzantes tropicales y sensible a la variabilidad interanual y multidecenal. Sin embargo, este patrón no es completamente estable: fenómenos oceánico-atmosféricos transitorios, como El Niño o la variabilidad térmica del Atlántico, pueden alterar significativamente las condiciones hidrológicas, introduciendo incertidumbre. Comprender tanto el patrón como sus desviaciones es esencial para una planificación adaptativa frente al cambio climático.

Configuración y calibración del modelo

La implementación del modelo SI-GA-CAL v1.0 en la cuenca alta del río Yaque del Norte requirió una configuración detallada basada en insumos espaciales, hidrometeorológicos y biofísicos. Se integraron capas clave como uso del suelo, red de drenaje, suelos, coberturas vegetales y datos de infraestructura hidráulica. Esta base permitió simular con precisión procesos como escorrentía, infiltración, erosión y calidad del agua.

Se ajustaron cuatro módulos del modelo para representar adecuadamente la dinámica ambiental de la cuenca. El módulo de fenología se calibró para reflejar la evolución estacional de la cobertura vegetal, utilizando datos satelitales (NDVI) y ajustando parámetros como el índice de área foliar y la sensibilidad climática. El módulo de hidrología se ajustó con datos de caudal del embalse Tavera para representar correctamente la escorrentía y el flujo base. En el módulo de sedimentos, se usaron estimaciones regionales y batimetrías para simular la producción y acumulación de sedimentos ante la falta de datos continuos. Finalmente, el módulo de calidad del agua se calibró con base en rangos de referencia de campañas de muestreo, enfocándose en variables clave como nutrientes, oxígeno y turbidez. Cada ajuste respondió a la necesidad de asegurar que el modelo pueda evaluar con confianza los efectos de intervenciones basadas en la naturaleza.

Simulación de escenarios

Para evaluar los beneficios de las SbN, se simularon escenarios futuros que integran cambios en el uso del suelo y proyecciones de cambio climático. Se comparó un escenario tendencial o BaU, que refleja la continuidad de las dinámicas actuales sin intervención, con escenarios de intervención basados en SbN. Adicionalmente, se incorporó un análisis de cambio climático, permitiendo evaluar el comportamiento del sistema bajo condiciones futuras, tanto en términos de modificaciones en el uso del suelo como de variaciones en la dinámica climática esperada. Este enfoque integrado proporciona una visión más robusta para la planificación y toma de decisiones a largo plazo en la cuenca alta del río Yaque del Norte.

Escenario BaU y cambio climático

El escenario BaU proyecta una continuidad en la pérdida de coberturas naturales y expansión de usos agropecuarios y urbanos. Este escenario fue modelado para el periodo 2022–2075, integrando proyecciones climáticas del IPCC (SSP245) y simulaciones de cambio de uso del suelo.

El análisis climático muestra una tendencia clara de aumento sostenido de la temperatura media en todos los escenarios, con impactos esperados sobre la disponibilidad hídrica, la agricultura y los ecosistemas. En contraste, la precipitación no presenta una tendencia definida, pero sí una mayor variabilidad estacional e interanual, lo que representa un desafío adicional para la gestión del agua.

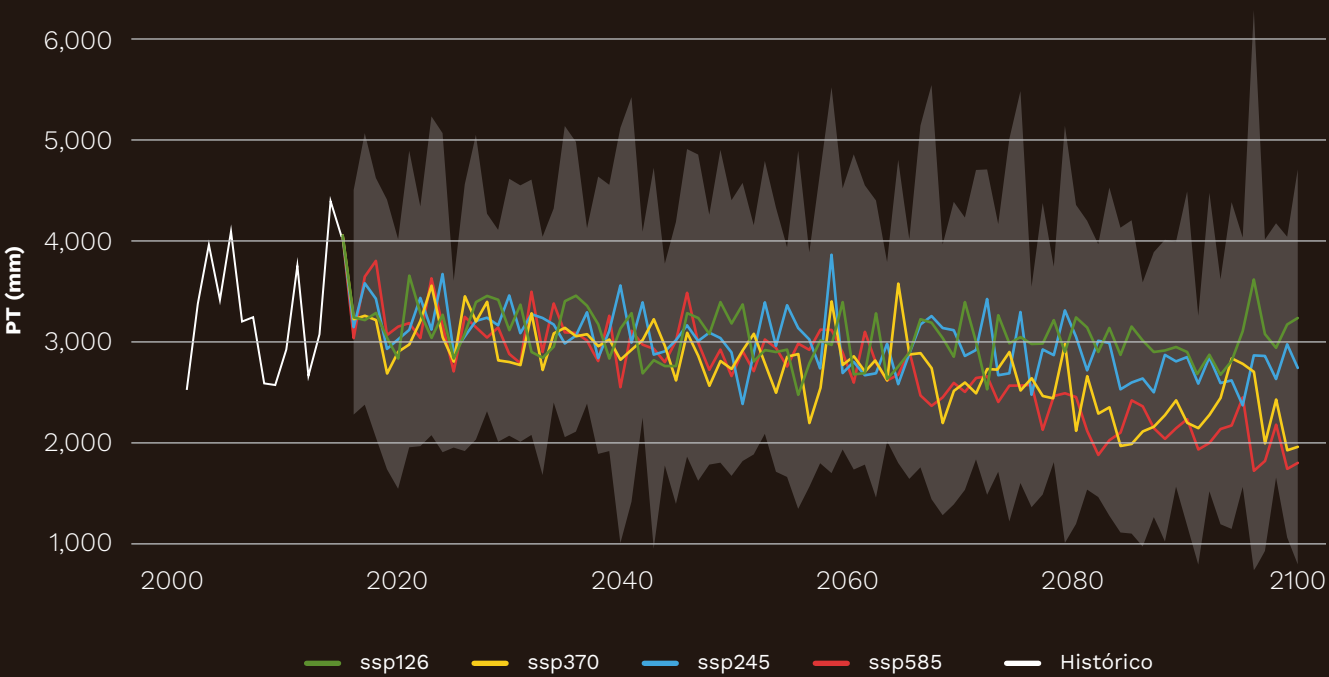
La herramienta Dinámica EGO permitió modelar la evolución del paisaje hasta 2075, revelando una transformación significativa del territorio. Se proyecta una expansión acelerada de cultivos (más del 620%) y áreas urbanas (más del 100%), impulsada por la presión agropecuaria y el crecimiento poblacional. En paralelo, se anticipa una reducción considerable de coberturas naturales, como bosques secos, de coníferas y latifoliados, lo que podría comprometer servicios ecosistémicos clave como la regulación hídrica y la conservación de la biodiversidad.

El modelo también proyecta un aumento de matorrales y vegetación escasa, asociado a procesos de degradación, abandono de tierras o regeneración secundaria. Aunque se observa un crecimiento moderado del café, este se da en un contexto de transformación del paisaje original. La validación del modelo mostró altos niveles de precisión espacial, lo que respalda su confiabilidad para anticipar tendencias territoriales.

En conjunto, el escenario tendencial evidencia un retroceso de coberturas naturales y la consolidación de usos intensivos del suelo, reproduciendo las dinámicas observadas históricamente. Este patrón plantea importantes desafíos para la sostenibilidad ecológica, la seguridad hídrica y la planificación territorial, reforzando la necesidad de implementar SbN a escala de paisaje como estrategia para mitigar impactos y fortalecer la resiliencia de la cuenca.

Figura 6. Precipitación anual y temperatura anual - Escenarios de cambio climático

GCM - Variable: Precipitación total



GCM - Variable: Temperatura media

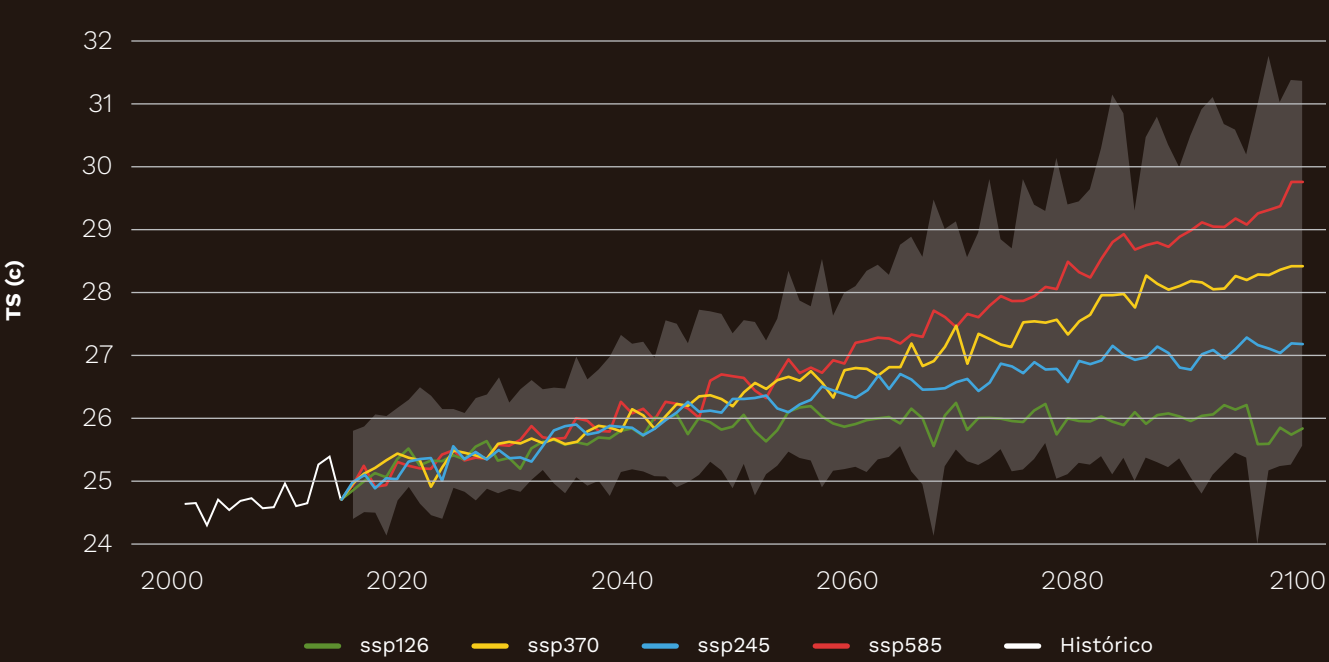
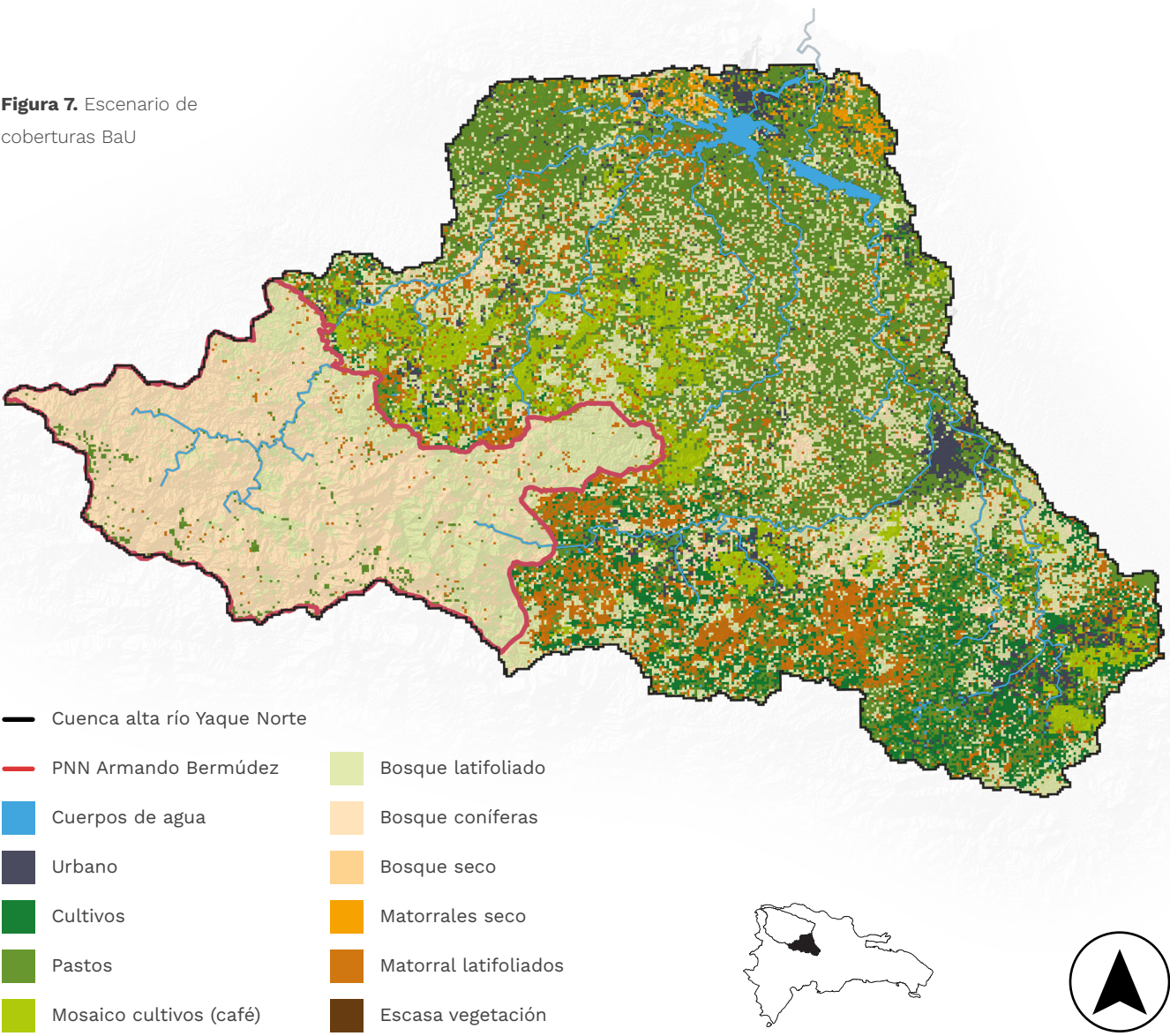


Figura 7. Escenario de coberturas BaU



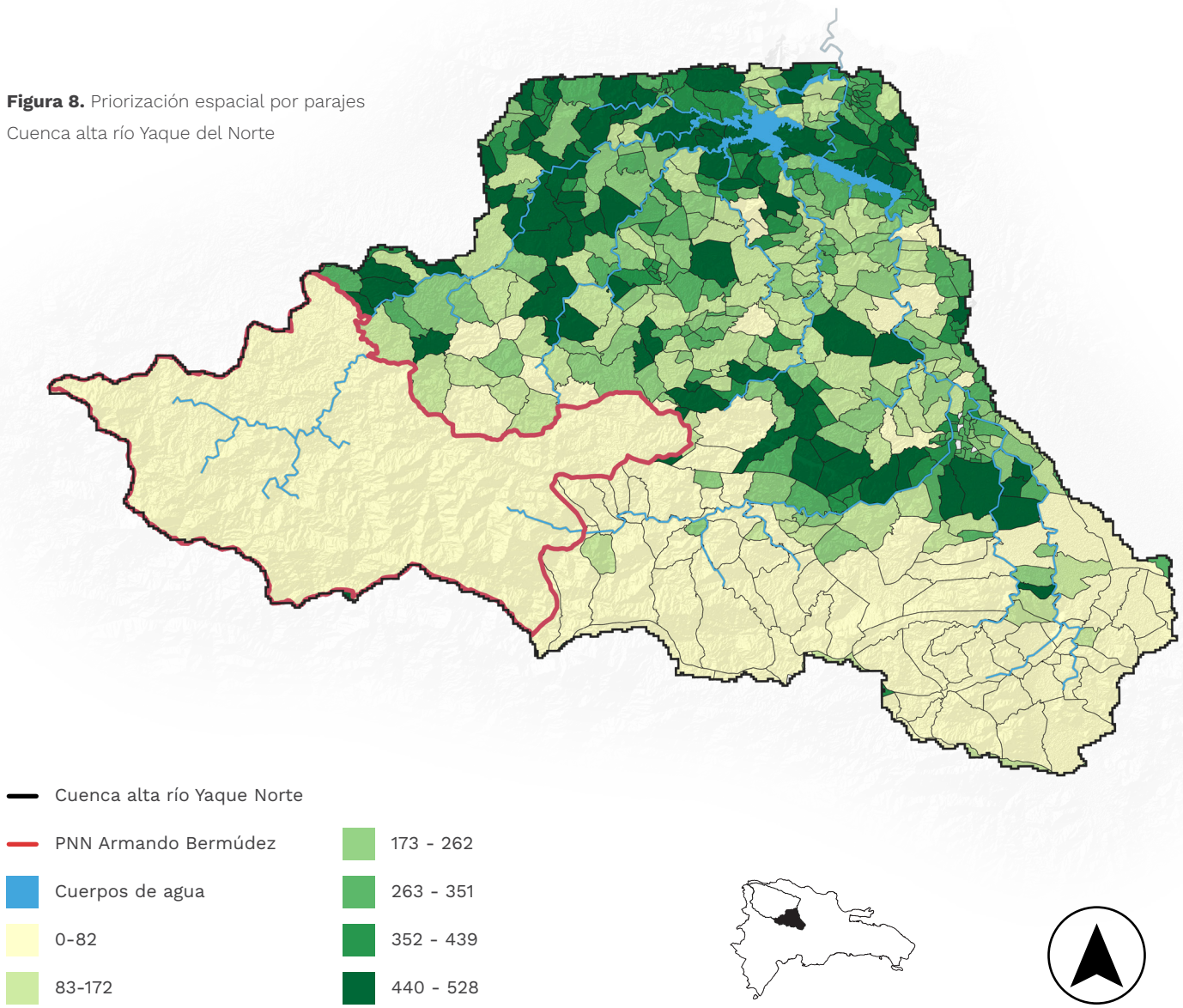
Escenario SbN

Para la definición de los escenarios de intervención se aplicó una metodología integral para diseñar y evaluar escenarios de inversión en SbN en la cuenca alta del río Yaque del Norte, en República Dominicana. El enfoque combina análisis biofísico, priorización espacial y planificación financiera, con el objetivo de orientar intervenciones estratégicas que mejoren los servicios ecosistémicos y reduzcan riesgos hidrológicos.

La construcción de los escenarios se desarrolló en tres etapas principales:

- **Definición del portafolio SbN:** Se identificaron intervenciones como conservación, reforestación, sistemas silvopastoriles y buenas prácticas agrícolas, priorizando aquellas con mayor impacto en la calidad del agua y control de la erosión.

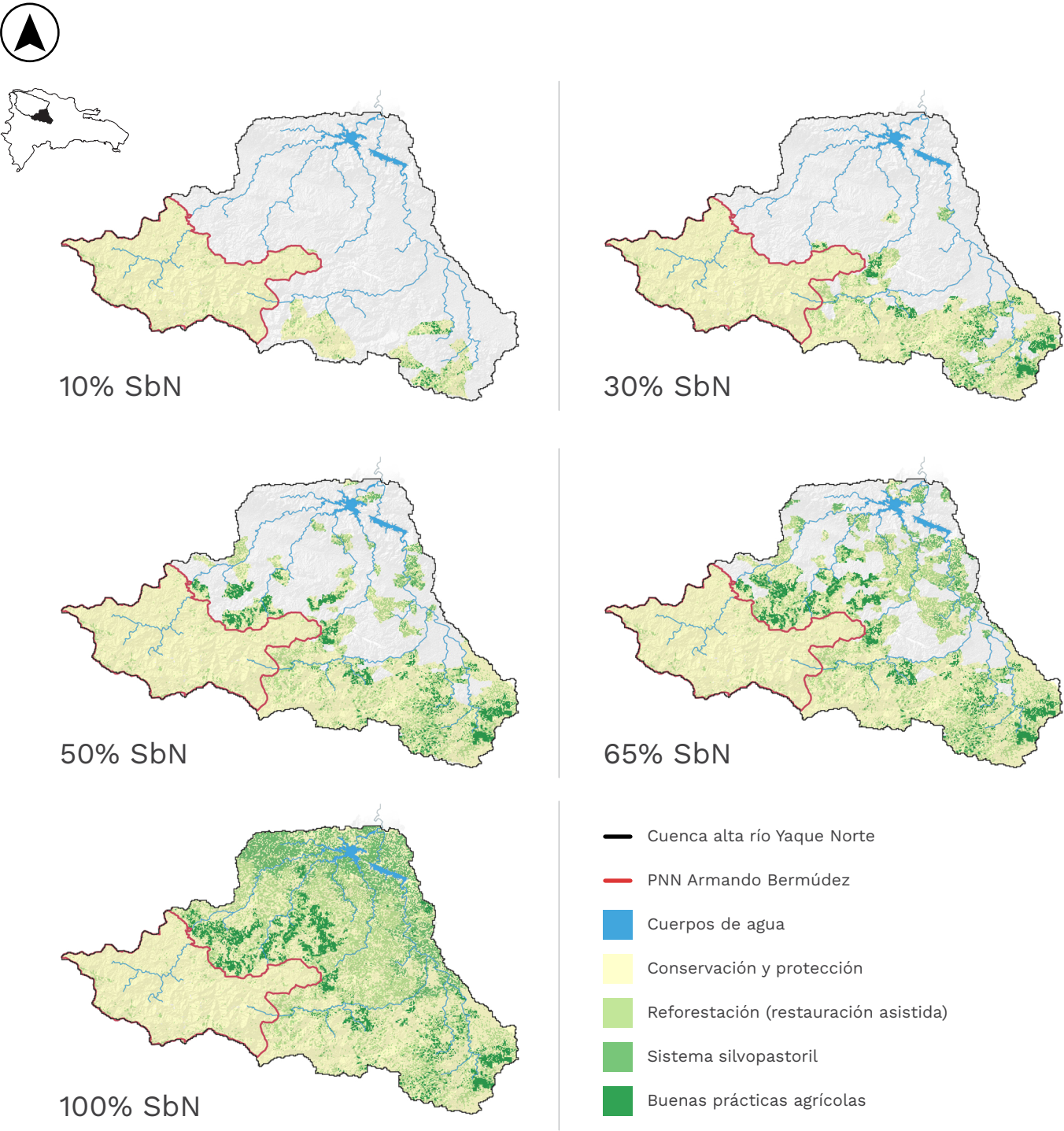
Figura 8. Priorización espacial por parajes Cuenca alta río Yaque del Norte



- **Priorización espacial:** A través de simulaciones hidrológicas, se identificaron las zonas con mayor beneficio ambiental por dólar invertido, generando un índice compuesto de eficiencia ecológica que orienta la selección de áreas de intervención. En la Figura 8 se representan

los polígonos clasificados según su nivel de beneficio ambiental acumulado. Como se observa en la figura, los colores más cercanos al amarillo indican áreas con alta prioridad, mientras que los tonos verdes oscuros corresponden a zonas de menor prioridad relativa.

Figura 9. Escenarios de inversión en SbN



Los resultados muestran que el escenario completo, con una inversión de 155 millones de dólares, cubre más de 131,000 hectáreas, combinando acciones de conservación, restauración y producción sostenible. La conservación y protección representa la mayor proporción del área intervenida (51%) y es la medida más costo-eficiente. En contraste, las buenas prácticas agrícolas, aunque cubren una menor superficie, tienen un alto costo unitario, lo que refleja su complejidad técnica y su enfoque intensivo en áreas productivas. A medida que aumenta el presupuesto, las intervenciones se diversifican y expanden territorialmente, manteniendo un enfoque estratégico que maximiza el impacto ambiental.

Además, se consideró la implementación de humedales artificiales para el trata-

miento de aguas residuales domésticas en los municipios de Jánico y Jarabacoa. Aunque no se definieron ubicaciones específicas por falta de datos espaciales, se modelaron vertimientos teóricos y se estimaron beneficios significativos en la mejora de la calidad del agua. Se asumieron condiciones óptimas de operación, con eficiencias de remoción elevadas, lo que permitió evaluar su impacto positivo en puntos críticos de la cuenca. Estos valores fueron integrados al análisis financiero, considerando costos operativos, mantenimiento, monitoreo y estructura fiduciaria, lo que permitió calcular el valor presente neto (VPN) de la inversión total.

Complementando la información espacial, la Tabla 1 presenta el área correspondiente para cada escenario y cada una de las SbN seleccionadas.

Tabla 1. Área por escenario de intervención SbN

SbN	Area (Ha)				
	100% SbN	65% SbN	50% SbN	30% SbN	10% SbN
Conservación y protección	66,712.50	47,517.75	37,775.25	27,702.00	8,525.25
Reforestación (restauración asistida)	37,793.25	25,101.00	18,609.75	12,881.25	4,761.00
Sistema silvopastoril	15,968.25	4,857.75	1,791.00	162.00	
Buenas prácticas agrícolas	11,126.25	8,921.25	6,900.75	3,944.25	614.25
Total área en hectáreas	131,600.25	86,397.75	65,076.75	44,689.50	13,900.50

En conjunto, esta propuesta ofrece una base técnica sólida para la toma de decisiones en restauración ecológica, integrando criterios de eficiencia ambiental, viabilidad financiera y planificación territorial. La metodología es replicable y adaptable a otros con-

textos, y sienta las bases para futuras evaluaciones beneficio-costo más detalladas, una vez se disponga de información espacial más precisa sobre los vertimientos actuales y su potencial de tratamiento mediante humedales.

► Foto: FAYN



Estimación de beneficios biofísicos

Con base en los escenarios desarrollados para la cuenca alta del río Yaque del Norte —que incluyen un conjunto de intervenciones mediante SbN bajo distintos niveles de inversión, así como un escenario tendencial (BaU) proyectado a un horizonte de 50 años, se llevaron a cabo simulaciones detalladas empleando el modelo SIGA-CAL. Este enfoque permite evaluar de forma cuantitativa los beneficios ambientales que podrían derivarse de las SbN, considerando su implementación en zonas priorizadas del territorio. El análisis se centró en variables clave como caudal, sedimentos, calidad del agua (turbidez y nitratos) y calidad del hábitat, utilizando modelos como SIGA-CAL e InVEST.

Caudales

Las SbN permiten una regulación más estable del caudal, reduciendo entre 7% y 13% los promedios anuales respecto al BaU. Esta disminución no implica escasez, sino una mayor infiltración y menor escorrentía superficial, lo que mitiga eventos extremos y mejora la resiliencia hídrica. Los puntos de Taveras, Jarabacoa y Arroyo Grande mostraron respuestas positivas sostenidas.

Sedimentos

Las intervenciones SbN demostraron una alta eficacia en la reducción de sedimentos. En puntos críticos como el río Bao y Arroyo Grande, las reducciones alcanzaron entre 25% y 85%, dependiendo del nivel de inversión. En

términos absolutos, se evitarían más de 1.6 millones de toneladas anuales en el río Bao y cerca de 930 mil toneladas en el embalse Tavera bajo el escenario de intervención total. Esto prolonga la vida útil de los embalses y reduce costos de dragado.

Acumulación de sedimentos en embalses

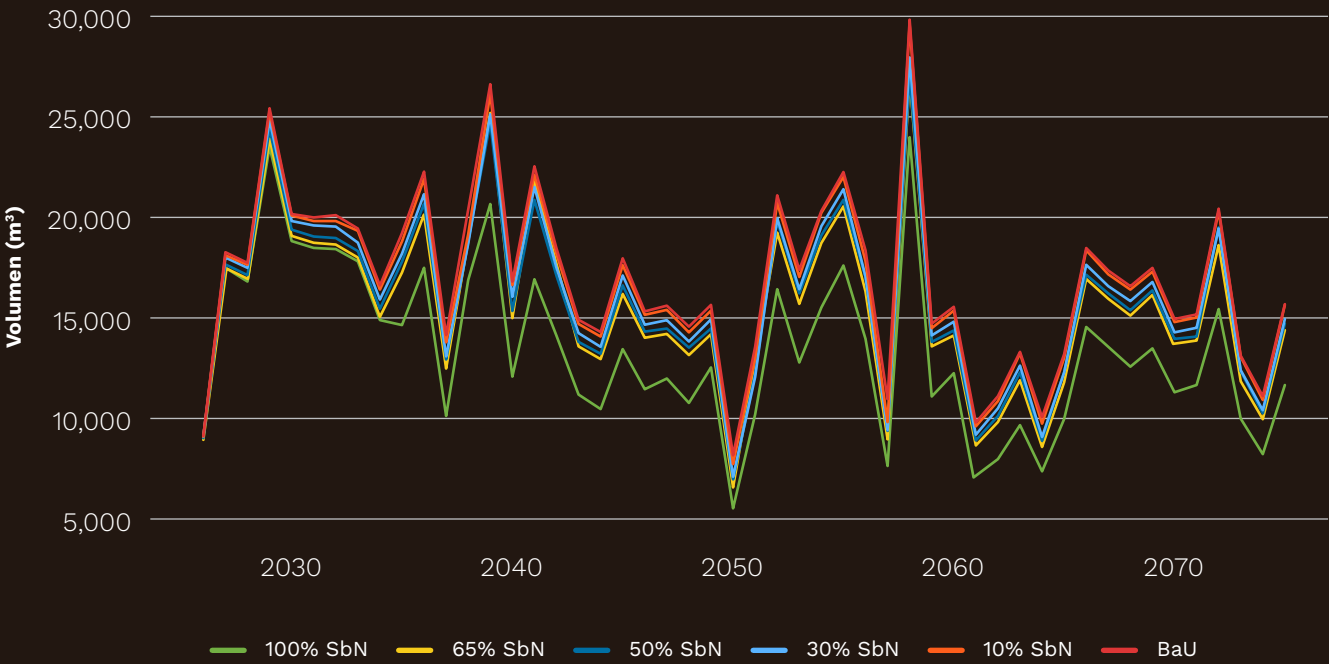
En los embalses Taveras y Bao, el escenario BaU proyecta acumulaciones de 13 y 6.6 millones de m³ respectivamente al año 2075. Con SbN, estas cifras se reducen a 9.8 y 5.3 millones de m³, lo que representa una disminución de hasta 25% y 20%. Incluso con inversiones intermedias (100M USD), se logran mejoras significativas.

Calidad de agua - Turbidez

La turbidez mostró reducciones significativas en todos los puntos monitoreados. En Arroyo Grande, las mejoras superaron el 75%, incluso con inversiones bajas. En Jarabacoa, las reducciones alcanzaron el 50%, reflejando la eficacia de los humedales artificiales. En el embalse Tavera y río Bao, las mejoras fueron más moderadas pero consistentes, con reducciones de hasta 22% y 10% respectivamente. Estas mejoras tienen implicaciones directas en la reducción de costos de tratamiento de agua potable.

Figura 10. Volúmenes anuales de sedimentos suspendidos acumulados

Embalse Tavera

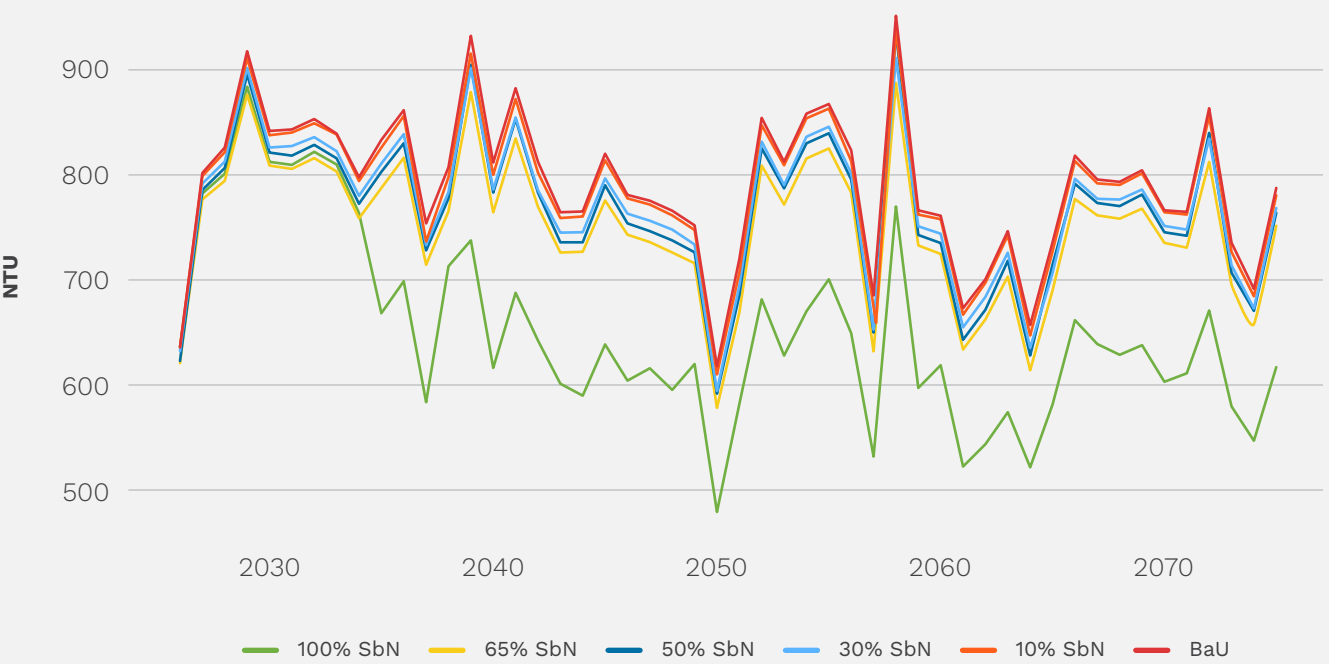


Río Bao

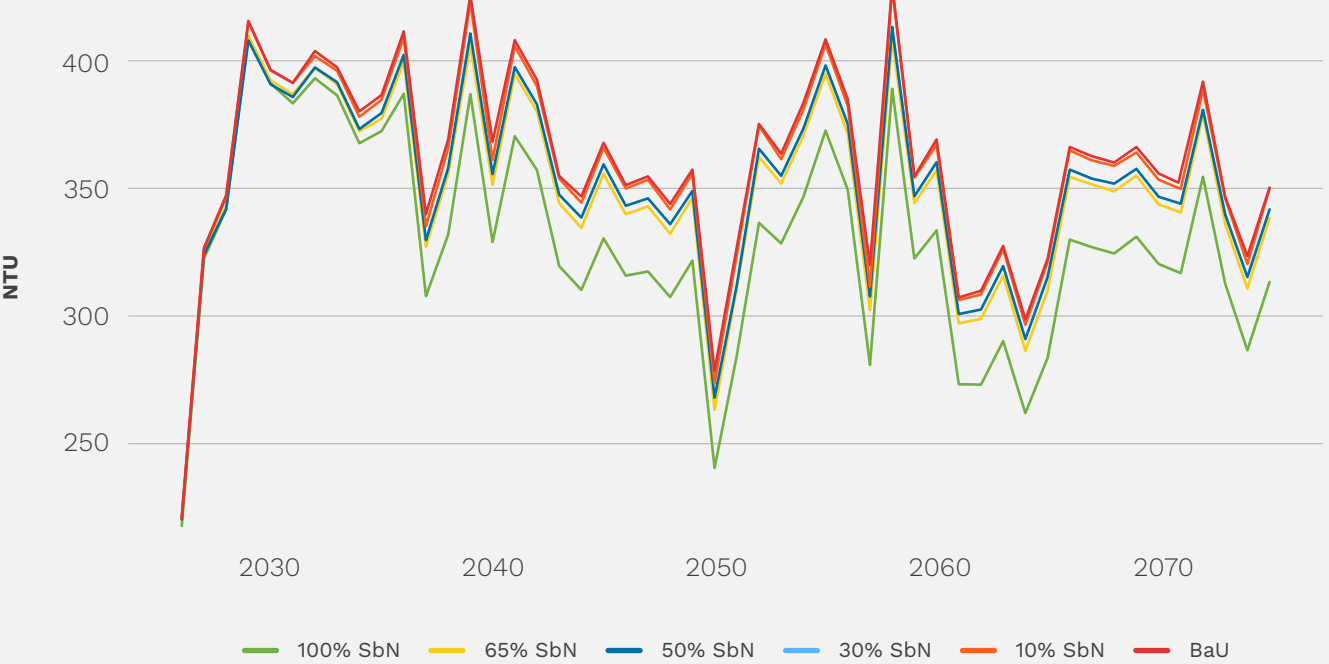


Figura 11. Series anuales de turbidez

Embalse Tavera



Río Bao



Calidad de agua – NO₃ Nitratos

Los nitratos, como indicador de contaminación difusa agrícola y urbana, también mostraron reducciones importantes. En todos los puntos evaluados, los escenarios SbN lograron disminuir las concentraciones de NO₃, siendo más pronunciadas con mayores niveles de inversión. Arroyo Grande destacó con reducciones superiores al 80%, incluso con inversiones mínimas. Jarabacoa y Taveras también mostraron mejoras significativas (hasta 53%), mientras que en el río Bao las reducciones fueron más discretas y dependientes del nivel de intervención.

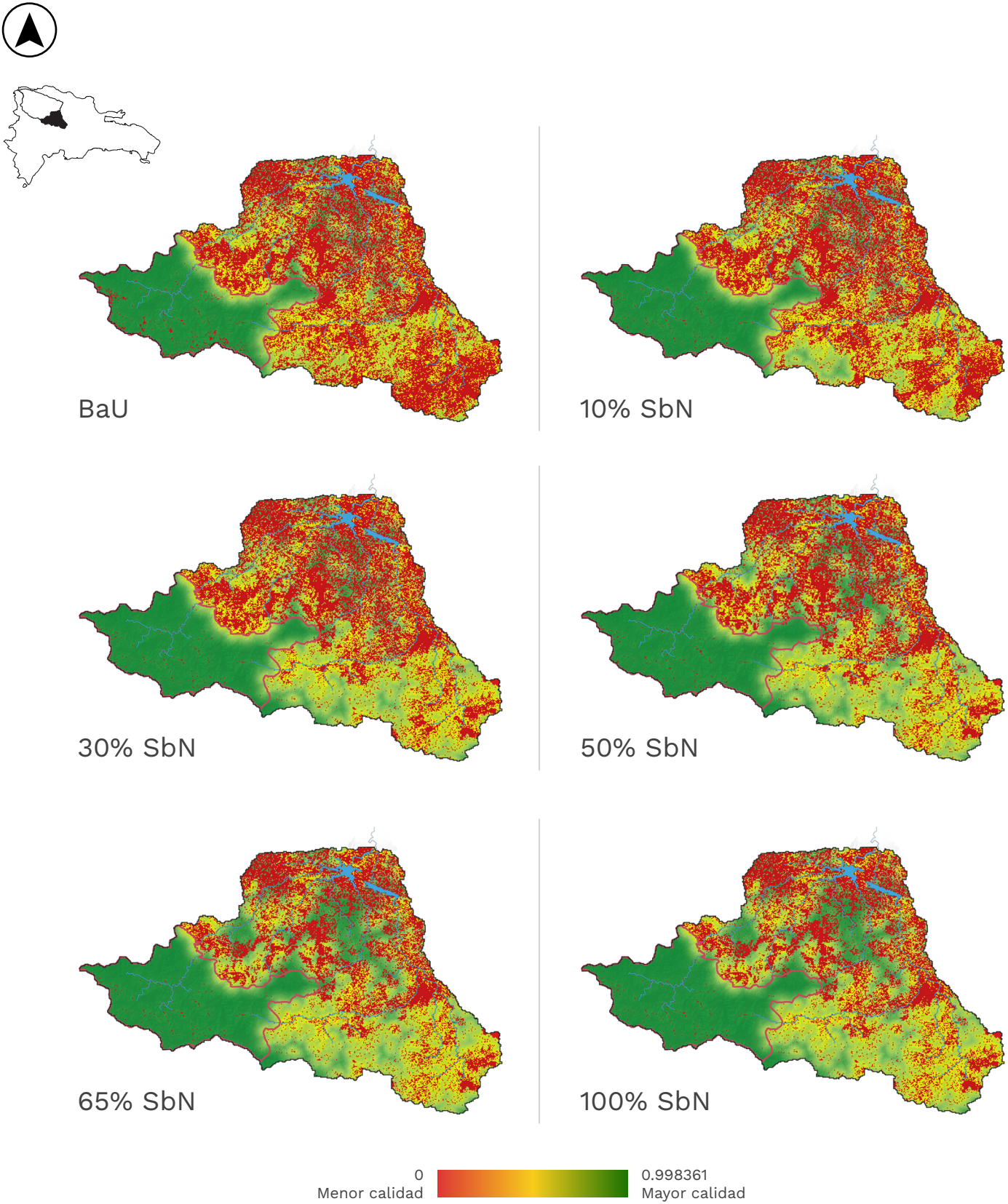
Foto: FAYN



Calidad de hábitat

El modelo InVEST evidenció mejoras progresivas en la calidad del hábitat a medida que aumentan las inversiones en SbN. El escenario BaU mostró una expansión de áreas degradadas, mientras que los escenarios de 100M y 155M USD consolidaron un paisaje más resiliente, con mayor cobertura verde y conectividad ecológica. Las SbN demostraron ser efectivas para mitigar amenazas antrópicas y restaurar hábitats, reforzando su rol en la conservación de la biodiversidad y la sostenibilidad ecológica.

Figura 12. Resultados modelos de calidad de hábitat



En conjunto, se destaca el papel transformador de las inversiones en soluciones basadas en la naturaleza, tanto en la mitigación de amenazas como en la restauración efectiva de hábitats. Este análisis respalda la relevancia de políticas de restauración ambiental como una vía efectiva para conservar la biodiversidad y mejorar la sostenibilidad ecológica en regiones altamente intervenidas como la cuenca del río Yaque del Norte.

Estimación de métricas para los valores de conservación prioritizados

A continuación se presenta una descripción del procedimiento seguido y los resultados obtenidos de la estimación de métricas biofísicas para cuantificar los beneficios relacionados con cada uno de los valores de conservación prioritizados para la cuenca alta. Estas métricas fueron usadas como insumos para la monetización de beneficios, tal como se describe en el capítulo 3 del documento.

Producción de agua potable

Se estimaron los niveles de turbidez en la planta de tratamiento Noriega (CORAASAN) a partir de simulaciones de sólidos suspendidos totales (SST) en los afluentes del embalse Bao. Mediante un modelo de regresión simbólica, se identificó al río Guanajuma como el principal predictor de turbidez. Los resultados muestran que los escenarios con SbN reducen significativamente la turbidez en la planta, lo que implica menores costos de potabilización y una mejora en la calidad del agua captada.

Generación de energía hidroeléctrica

Se evaluó la acumulación de sedimentos en los embalses de Tavera y Bao bajo distintos escenarios. En el embalse Tavera, el escenario BaU proyecta 13.2 millones de m³ de sedimentos acumulados al 2075, mientras que el escenario SbN completo reduce esta cifra a 9.9 millones (-25%). En Bao, la reducción es del 21% (de 6.3 a 5.0 millones de m³). Los escenarios intermedios también muestran beneficios relevantes, especialmente a partir de inversiones de 75 millones de USD en adelante. Estas reducciones prolongan la vida útil de los embalses y disminuyen la necesidad de dragado.

Captura de carbono y emisiones evitadas

Se estimarán las emisiones evitadas de CO₂ mediante la conservación de bosques. En el escenario de mayor inversión, se evitarían aproximadamente 5.06 millones de toneladas de CO₂ por deforestación evitada. Incluso en escenarios intermedios (100M y 75M), las reducciones superan los 4 millones de toneladas, lo que evidencia el potencial de las SbN para contribuir a la mitigación del cambio climático.

Figura 13. Turbidez estimada en la entrada a la planta Noriega para diferentes escenarios.

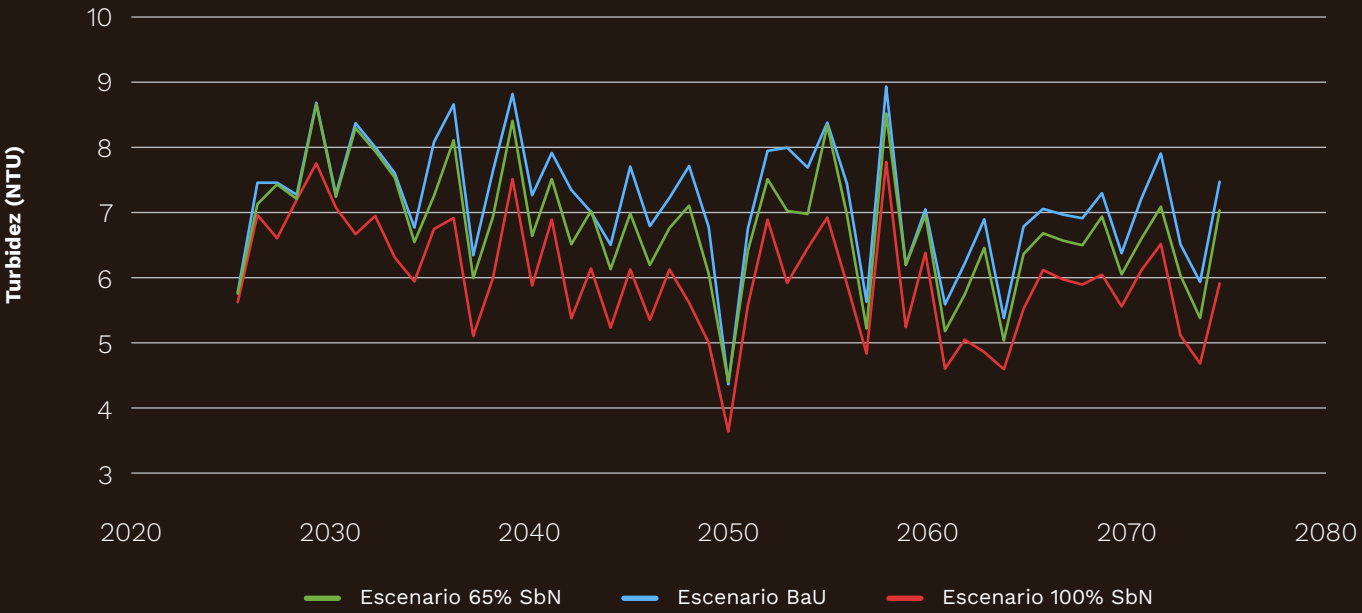
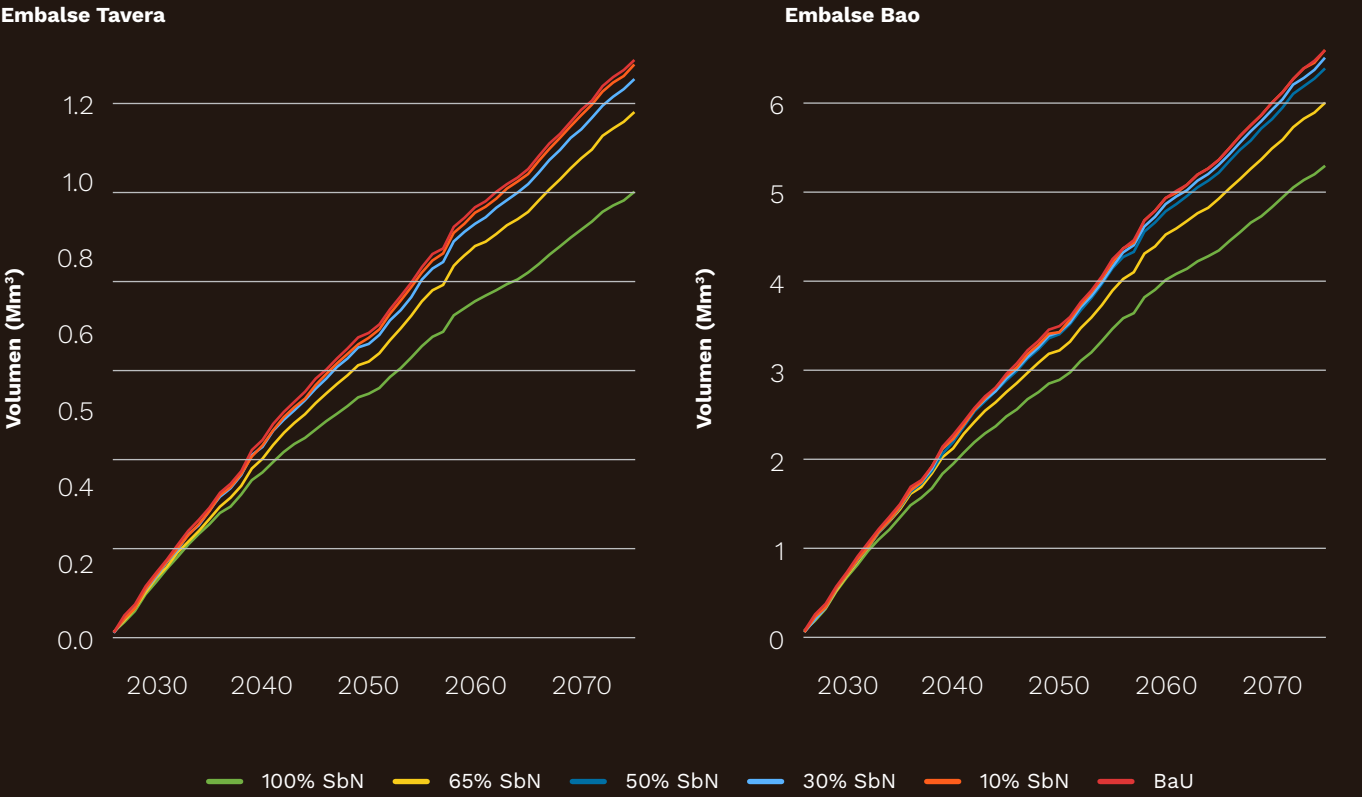


Figura 14. Series acumulación de sedimentos totales



Acceso mejorado al saneamiento mediante humedales artificiales

Como parte del portafolio de SbN, se propone la instalación de humedales artificiales para el tratamiento descentralizado de aguas residuales en comunidades rurales y periurbanas de la cuenca alta del río Yaque del Norte. Estos sistemas naturales permiten eliminar nutrientes, patógenos y materia orgánica, mejorando la calidad del agua y reduciendo la exposición a contaminantes. Con base en la experiencia del FAYN, se estima que esta intervención puede mejorar el acceso al saneamiento básico para entre 4,710 y 18,841 personas, contribuyendo a la prevención de enfermedades de origen hídrico, la protección de ecosistemas acuáticos y el fortalecimiento de la resiliencia sanitaria y ambiental en la región.

Foto: FAYN



Tabla 2. Beneficio de los humedales artificiales

	Personas directamente beneficiadas	Cantidad de humedales
100% SbN	18,841	120
65% SbN	14,131	90
50% SbN	9,421	60
30% SbN	7,065	45
10% SbN	4,710	30

Resumen de los principales beneficios del portafolio

Como resumen de los resultados descritos en las secciones anteriores, la Tabla 3 presenta las principales métricas estimadas para representar los cambios en los atributos ecoló-

gicos clave priorizados, como consecuencia de la implementación de diferentes escenarios de intervención en SbN en la cuenca alta del río Yaque del Norte.

Tabla 3. Resumen de los principales beneficios biofísicos estimados

Beneficios	Escenario 100% SbN	Escenario 65% SbN	Escenario 50% SbN	Escenario 30% SbN	Escenario 10% SbN
Reducción promedio de turbidez en Noriega (%)	16.5%	5.6%	0.5%	0.4%	0.1%
Reducción en volumen de sedimentos en el embalse Tavera (Mm³)	3.3	2.1	1.6	1.2	0.5
Reducción de emisiones (tCO ₂ e)	5.1	4.4	4.0	3.3	1.2
Área adicional con calidad de hábitat mejorada (ha)	96,014	80,309	59,967	54,239	32,204
Área con prácticas sostenibles (ha)	27,094	13,779	8,691	4,106	614
Aumento en capacidad de almacenamiento durante crecientes (%)	7.2%	5.3%	4.4%	3.1%	0.5 %
Personas directamente beneficiadas por los humedales	18,841	14,131	9,421	7,065	4,710

Análisis beneficio-costo de la inversión en portafolios SbN



El análisis beneficio-costo del portafolio de SbN en la cuenca alta del río Yaque del Norte permite evaluar la eficiencia económica de distintas escalas de intervención. A través de la comparación entre los beneficios esperados y los costos de implementación, expresados en VPN, se identifican los escenarios más viables desde una perspectiva económica.

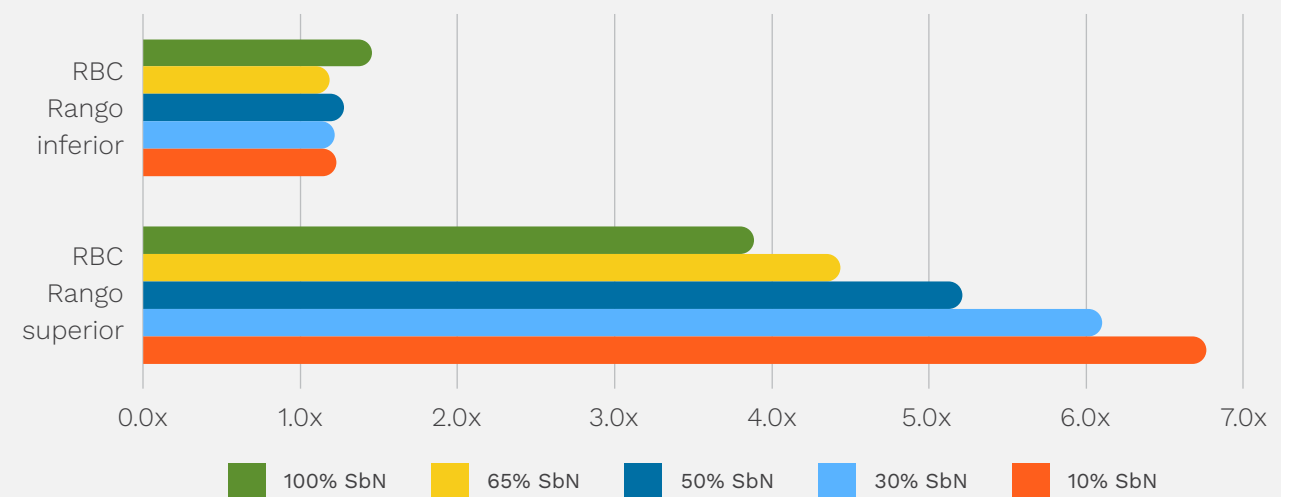
El estudio considera un horizonte de 50 años, con una fase de implementación de 15 años, y aplica una tasa de descuento del 4,25 %. Los beneficios se estiman en relación con el escenario tendencial BaU, que representa la evolución de la cuenca sin intervenciones. Se incluyen mejoras en servicios ecosistémicos como calidad del agua, reducción de sedimentos y emisiones de carbono evitadas.

Se evaluaron los cinco escenarios de inversión: 10%, 30%, 50%, 65%, y 100% SbN. Para cada uno, se calculó la RBC, que compara el valor monetario de los beneficios frente a los costos. Además, se realizó un análisis de sensibilidad para capturar la variabilidad de los resultados bajo diferentes supuestos, considerando rangos superiores e inferiores para los beneficios del agua potable y del carbono.

Este enfoque estructurado permite tomar decisiones informadas sobre la priorización de intervenciones, considerando tanto la rentabilidad económica como la incertidumbre inherente a los sistemas naturales. Los resultados del RBC para los rangos superior e inferior se presentan en la Ilustración 1.

Las siguientes subsecciones amplían el proceso para derivar los beneficios y costos asociados con la implementación de las SbN, los cuales se han utilizado para calcular la RBC.

Figura 15. Relación beneficio-costo



Estimación de costos de las inversiones en SbN

La estimación de costos de implementación del portafolio de SbN en la cuenca alta del río Yaque del Norte se realizó a partir de de cada tipo de implementación SbN actualizados al año 2025, ajustados por inflación y expresados en dólares estadounidenses. Las intervenciones consideradas incluyen reforestación, buenas prácticas agrícolas, sistemas silvopastoriles, protección de bosques y humedales artificiales, con costos que oscilan entre 900 y 1,900 USD por hectárea, y 34,167 USD por unidad en el caso de humedales.

A partir de estos valores y del número de hectáreas o unidades proyectadas por escenario (10%, 30%, 50%, 65%, y 100% SbN), se calcularon los costos iniciales de implementación. Sin embargo, para reflejar el costo real de las inversiones, se incorporaron también

los siguientes componentes, que son esenciales para una implementación exitosa y sostenible a largo plazo:

- **Mantenimiento y monitoreo (10%):** Incluye actividades técnicas para asegurar la efectividad de las intervenciones a lo largo del tiempo, así como mecanismos de seguimiento y evaluación de resultados.
- **Gastos administrativos del fondo (17%):** Cubren remuneraciones de personal, fortalecimiento institucional, participación de actores clave, comunicaciones y servicios técnicos, jurídicos y contables.
- **Inversiones del fideicomiso (22%):** Representan la cantidad de dinero invertida en el fideicomiso y sus gastos asociados. Aunque implican una carga significativa, el fideicomiso genera ingresos y sostenibilidad a largo plazo, con un rendimiento proyectado que supera el valor de inversión en un 16%, del FAYN de 2025.

La inversión total se distribuye a lo largo de 15 años, siguiendo un crecimiento anual del 5%, y se calcula su VPN aplicando una tasa de descuento del 4.25%. Esta estructura permite reflejar el costo real de las intervenciones en el tiempo y facilita su comparación con los beneficios estimados en el análisis

económico. En conjunto, esta estimación integral de costos proporciona una base sólida para evaluar la viabilidad financiera del portafolio SbN, considerando no solo los costos directos de implementación, sino también los requerimientos operativos y de sostenibilidad institucional a largo plazo.

Tabla 4. Valor presente neto de los costos estimados para cada escenario de implementación de SbN

VPN (USD)	100% SbN	65% SbN	50% SbN	30% SbN	10% SbN
Costo inicial de inversiones SbN	116,821,006	75,410,648	55,936,310	37,559,328	11,591,729
Costo mantenimiento y monitoreo	11,682,101	7,541,065	5,593,631	3,755,933	1,159,173
Costo administrativo	19,408,195	12,528,437	9,293,045	6,239,963	1,925,805
Inversiones del fideicomiso	25,869,654	16,699,457	12,386,925	8,317,398	2,566,953
VPN	173,780,955	12,179,606	83,209,910	55,872,623	17,243,660

Foto: FAYN



Estimación de beneficios de las inversiones en SbN

Este análisis cuantifica los beneficios económicos derivados de la implementación de SbN en la cuenca alta del río Yaque del Norte, con foco en tres dimensiones clave: reducción de sedimentos, mejora de la calidad del agua y mitigación del cambio climático. Los beneficiarios institucionales principales son EGEHID (generación hidroeléctrica) y CORAASAN (abastecimiento de agua potable), quienes se ven directamente favorecidos por los servicios ecosistémicos mejorados. Para la **sociedad en su conjunto**, al contribuir a la **mitigación del cambio climático** mediante la reducción de emisiones de carbono.

Beneficios para EGEHID – Reducción de sedimentos

Las inversiones en SbN ofrecen beneficios clave para la EGEHID, principalmente al reducir la sedimentación en

el embalse de Tavera. Esto prolonga la vida útil de la infraestructura hidroeléctrica y pospone intervenciones de manejo y prolongar. Se estimó un umbral técnico de 7,3 Mm³ de sedimentos acumulados como punto crítico para iniciar operaciones de gestión.

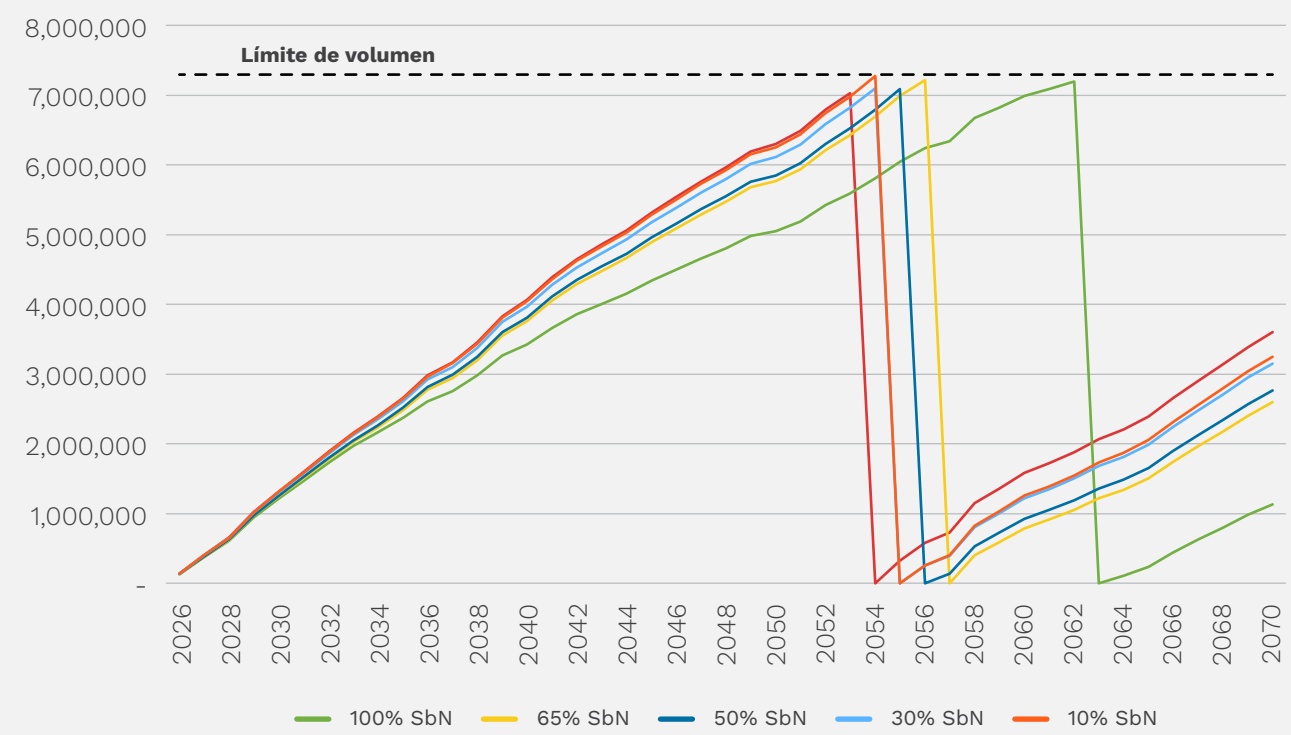
Los resultados muestran que, en los escenarios con mayor implementación de SbN, la acumulación de sedimentos ocurre a un ritmo más lento, lo que **retrasa la llegada al umbral crítico**. En comparación con el escenario tendencial (BaU), las intervenciones de manejo pueden **posponerse entre 1 y 9 años**, dependiendo del nivel de inversión. Este aplazamiento se traduce en beneficios económicos importantes. En el escenario de mayor inversión (156 millones USD), se estima un **ahorro de hasta 172,7 millones USD** en costos de manejo de sedimentos.

El resumen de las prestaciones se presenta en la Tabla 5 a continuación.

Tabla 5. Beneficios a EGEHID

Beneficios a EGEHID	BaU	100% SbN	65% SbN	50% SbN	30% SbN	10% SbN
Año de intervencion	2054	2063	2057	2056	2055	2055
Años adicionales (vs. BaU)	0	9	3	2	1	1
VPN costos manejo sedimentos evitados (USD)	-	172,715,973	63,326,955	43,949,117	16,135,784	2,947,375

Figura 16. Análisis de necesidades de manejo de sedimentos embalse Tavera



Beneficios para CORAASAN – Mejora de la calidad del agua

Otra ventaja importante de la implementación de SbN es la mejora de la calidad del agua destinada al abastecimiento de agua potable. Acciones como el aumento de la cobertura vegetal y la restauración de paisajes aguas arriba reducen la escorrentía de sedimentos y contaminantes, fortaleciendo la capacidad de autodepuración de la cuenca y disminuyendo la carga sobre las plantas de tratamiento.

Uno de los principales beneficios identificados para CORAASAN es la reducción de la turbidez del agua que llega al embalse de Bao, lo que permite disminuir el uso de sulfato de

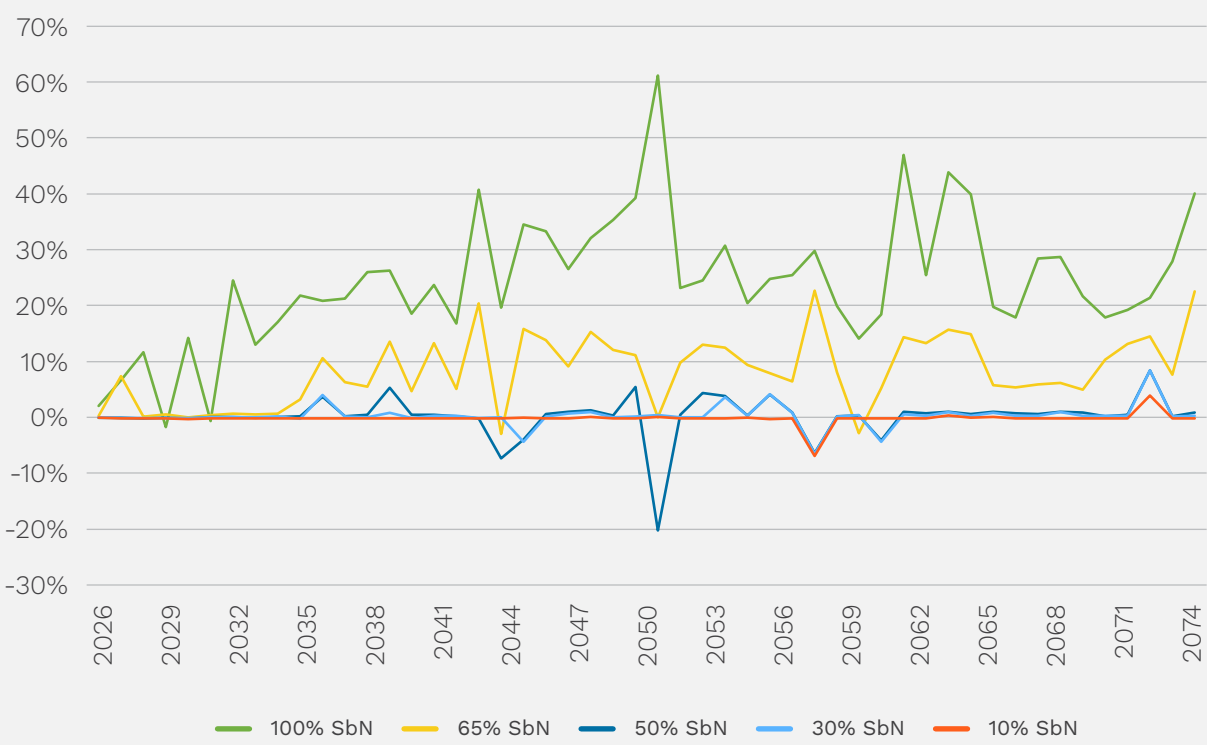
aluminio en la planta de tratamiento Noriega. Esta relación fue cuantificada mediante un modelo de regresión lineal desarrollado a partir de datos operativos entre 2021 y 2024, que estimó un coeficiente de 2638 USD por unidad de turbidez (NTU).

El análisis mostró que, en escenarios con mayor inversión en SbN, la turbidez disminuye de forma significativa, lo que se traduce en reducciones de hasta un 60 % en los costos de sulfato de aluminio en algunos años. Aunque el modelo se centró en este insumo, se reconoce que las SbN también podrían reducir el uso de otros productos químicos como el cloro, que representa entre el 57 % y el 90 % del gasto en insumos de tratamiento.

En conjunto, los resultados confirman que las SbN no solo mejoran la calidad del agua, sino que también generan ahorros operativos direc-

tos para los sistemas de tratamiento, reforzando su valor como estrategia integral de gestión hídrica y sostenibilidad financiera.

Figura 17. Reducción de costos de sulfato de aluminio (%)



El resumen de las prestaciones se presenta en la Tabla 6.

Tabla 6. Beneficios a CORASAAN

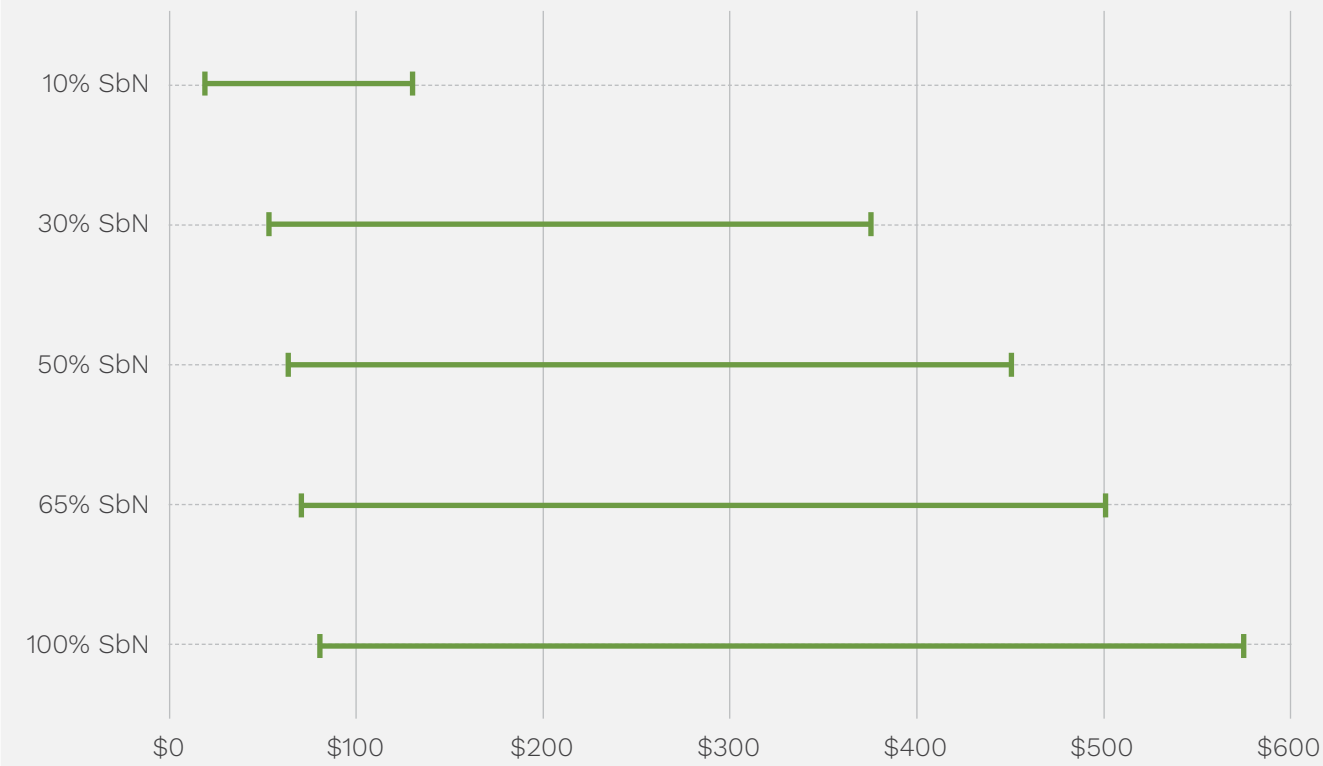
VPN de costos evitados CORASAAN	100% SbN	65% SbN	50% SbN	30% SbN	10% SbN
Rango superior (USD)	5,978,884	1,939,064	188,572	130,216	6,996
Rango inferior (USD)	968,579	314,128	30,549	21,095	1,133

Estimación de beneficios de las inversiones en SbN - Costo social de carbono

El costo social del carbono (CSC) es una herramienta ampliamente utilizada para incorporar los impactos del cambio climático en la toma de decisiones económicas. Representa el valor monetario de los daños ocasionados por la emisión de una tonelada adicional de CO₂ a la atmósfera, considerando efectos como la disminución de la productividad agrícola, afectaciones a la salud humana, pérdidas de infraestructura por eventos climáticos extremos, y la degradación de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos. En este análisis, el CSC se emplea para estimar los beneficios económicos derivados de la reducción de emisiones de carbono mediante la implementación de SbN, como la conservación de bosques y la adopción de prácticas agrícolas sostenibles, en particular los sistemas agroforestales con café.

Dado que la literatura especializada presenta una amplia variabilidad en los valores estimados del CSC, se tomaron como referencia los resultados de un estudio reciente elaborado por la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) (Pica et al., 2024). Este análisis consideró distintos enfoques para la tasa social de descuento, lo que resultó en un rango de valores del CSC entre 32 y 196 USD por tonelada de CO₂, ajustados a precios de 2025. Estos dos valores se utilizaron para estimar un rango de beneficios monetarios derivados de la reducción de emisiones. La elección del valor del CSC tiene un efecto significativo en los resultados del análisis de relación costo-beneficio, ya que un valor más alto incrementa sustancialmente la estimación de los beneficios climáticos asociados a las SbN.

Figura 18. Rango de CSC evitado (mUSD)



Conclusiones y recomendaciones



El presente estudio confirma que las SbN representan una estrategia integral y efectiva para abordar los desafíos de seguridad hídrica, conservación ecológica y adaptación climática en la cuenca alta del río Yaque del Norte. A través de un análisis técnico, biofísico y económico, se demuestra que la implementación escalonada de un portafolio de SbN puede generar beneficios tangibles que fortalecen tanto los ecosistemas como el bienestar humano.

En términos de provisión de agua potable, las SbN permiten reducir la erosión del suelo y la carga de sedimentos que llega al embalse Tavera-Bao, lo que mejora la calidad del agua cruda y reduce los costos de potabilización. Se estima que estas intervenciones pueden disminuir la turbidez del agua en un rango de entre 0.1% y 16.5%, dependiendo del escenario de inversión,

generando ahorros operativos directos para CORAASAN. Además, se estabilizan los caudales y se incrementa la infiltración, garantizando una provisión más constante y confiable de agua para más de 1.8 millones de personas.

En cuanto a la generación hidroeléctrica, las intervenciones propuestas reducen la carga de sedimentos al embalse, lo que preserva su capacidad operativa y retrasa la necesidad de limpiezas costosas. En función del nivel de intervención, se estima que las SbN podrían evitar entre 0.5 y 3.3 millones de metros cúbicos de sedimentos. En el escenario de inversión total (100% SbN), se estima que las SbN podrían evitar hasta 172 millones de dólares en costos de manejo de sedimentos, extendiendo la vida útil del embalse en hasta 9 años y asegurando una generación de energía más constante y eficiente.

El sistema Tavera-Bao, pieza clave en la infraestructura hídrica de la región, desempeña un papel fundamental no solo en el almacenamiento y distribución de agua, sino también en la regulación de la calidad del recurso hídrico. Su funcionamiento eficiente permite estabilizar múltiples procesos ecológicos y operativos, y es esencial para mitigar riesgos asociados a inundaciones. Por ello, resulta prioritario garantizar un monitoreo continuo y una recolección sistemática de datos que permitan evaluar su desempeño y asegurar que el sistema continúe cumpliendo su rol estratégico en la seguridad hídrica y energética del país.

Desde la perspectiva ecológica, las SbN contribuyen significativamente a la conservación de hábitats críticos para especies endémicas y amenazadas, como el solenodonte y la jutía, al tiempo que fortalecen la conectividad ecológica y promueven la regeneración natural de la flora y la fauna. Se estima que estas intervenciones mejorarían la calidad del hábitat en un área considerable, que varía entre 32,204 y 96,014 hectáreas, lo que representa un avance sustancial en la protección de la biodiversidad en la cuenca. Paralelamente, se impulsa la adopción de prácticas productivas sostenibles en superficies que oscilan entre 614 y 27,094 hectáreas, lo cual no solo incrementa la productividad agrícola y ganadera, sino que también reduce la presión sobre los ecosistemas y fortalece la gobernanza comunitaria. Este enfoque integrado de conservación y producción refuerza la resiliencia de las comunidades locales y su capacidad para sostener medios de vida dignos y estables en el largo plazo.

En términos de resiliencia climática, las SbN fortalecen la capacidad de la cuenca para enfrentar eventos extremos, al mejorar la regulación del régimen hidrológico, reducir la escorrentía superficial y aumentar la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo. Estas acciones permiten mitigar riesgos de inundaciones y sequías, protegiendo tanto a las comunidades como a la infraestructura crítica. Se estima que estas intervenciones incrementan en un rango de entre 0.5% y 7.2% la capacidad de almacenamiento durante eventos de crecientes.

Además, se evitaría la emisión de entre 1.2 y 5.1 millones de toneladas de CO₂e, dependiendo del alcance de la intervención, contribuyendo de manera significativa a los esfuerzos de mitigación del cambio climático.

► Foto: FAYN



En el ámbito del saneamiento básico, la instalación de humedales artificiales representa una solución efectiva y de bajo impacto para el tratamiento descentralizado de aguas residuales. Estas intervenciones permiten mejorar el acceso a servicios de saneamiento para entre 4,710 y 18,841 personas, especialmente en comunidades rurales y periurbanas con baja cobertura de infraestructura. Al eliminar nutrientes, patógenos y materia orgánica, los humedales reducen la exposición a aguas contaminadas, previenen enfermedades de origen hídrico y mejoran la calidad del agua en cuerpos receptores, fortaleciendo así la salud pública y la resiliencia ambiental de la región.

En este contexto, se recomienda avanzar en la implementación progresiva del portafolio de SbN, ampliando las intervenciones a medida que se fortalezcan las capacidades técnicas, financieras e institucionales. Los resultados de este estudio también pueden orientar el desarrollo de futuros estudios e investigaciones, no solo para la FAYN, sino para todos los actores de la cuenca (universidades, ministerios, empresas, sectores agrícolas etc.).

Es fundamental para este esfuerzo el establecimiento de un sistema de información sólido y transparente para el seguimiento, la evaluación y la presentación de informes, en particular para el sistema Tavera-Bao, a fin de garantizar su funcionamiento óptimo y reforzar su papel estratégico en la regulación hidrológica y la resiliencia climática. La ampliación de estos sistemas tiene dos objetivos fundamentales en el contexto de las SbN: (1) Seguimiento de los datos hidrosedimentológicos y de la implementación: un monitoreo sólido y coherente será esencial para tomar

decisiones informadas sobre la implementación, lo que permitirá ajustes puntuales, la optimización de los recursos y una mejor orientación de las intervenciones; (2) Medición del impacto: es necesario un enfoque sistemático de la evaluación del impacto para cumplir con los requisitos de los financiadores y de presentación de informes, lo que permitirá comunicar claramente tanto los avances en la implementación SbN como los resultados obtenidos. Al integrar indicadores hidrológicos, ecológicos y socioeconómicos, este sistema podría proporcionar la base empírica necesaria para la gestión adaptativa, la priorización de recursos y la comunicación transparente de los resultados, reforzando tanto la eficiencia operativa como la credibilidad ante los socios. Del mismo modo, es necesario ampliar la educación ambiental y la participación de la comunidad, y actualizar periódicamente los modelos y escenarios de intervención para responder a la dinámica territorial y climática cambiante.

Igualmente importante es seguir garantizando una participación sólida y multi-sectorial. Es esencial que las empresas de servicios públicos de agua y electricidad, como principales beneficiarias de la regulación del sistema hidrosedimentológico, sigan participando activamente en el programa, aportando recursos, conocimientos especializados y apoyo en materia de gobernanza. Además, aunque las SbN son de interés directo para las autoridades medioambientales, también hay margen para la participación de otras ramas públicas, que también se beneficiarían de los valores de conservación. Por ejemplo, los humedales mejoran la calidad del agua al reducir los niveles de patógenos, lo que disminuye el riesgo de enfermedades. Esto crea una clara

oportunidad para que las autoridades sanitarias y los ministerios se involucren, apoyando la implementación de SbN como estrategia preventiva de salud pública. La participación del sector de la salud también puede catalizar una colaboración intergubernamental más amplia, fomentando que ministerios como el de medio ambiente y otros organismos pertinentes profundicen su compromiso con el programa.

Al combinar un sistema de datos completo con el compromiso de los servicios públicos, las comunidades, empresas y las instituciones públicas, lo portafolio de SbN puede posicionarse como un modelo emblemático para la gestión integrada del agua, los ecosistemas y la salud pública, que ofrece resultados medibles, impulsa la toma de decisiones informadas y atrae inversiones sostenidas. Dado que es necesaria una acción colectiva para ampliar la implementación y aumentar los beneficios, el FAYN puede jugar un papel fundamental como articulador de las instituciones mencionadas, coordinando las acciones de implementación y monitoreo de forma que las intervenciones realizadas se reflejen en mejoras tangibles en los atributos ecológicos clave y, por tanto, en los valores de conservación priorizados para la cuenca. Adicionalmente, en su papel de articulador el FAYN puede promover el uso de las herramientas desarrolladas para priorizar intervenciones y motivar la participación de nuevos actores. En conjunto, estas acciones permitirán consolidar un modelo de gestión hídrica resiliente, inclusivo y basado en la naturaleza, que garantice la provisión de servicios ecosistémicos esenciales para las generaciones presentes y futuras en la cuenca del río Yaque del Norte.

La metodología aplicada para el análisis, incluyendo la identificación de valores de conservación, la priorización de los atributos ecológicos clave de los que dependen dichos valores, y el vínculo entre la implementación de SbN y el mantenimiento/mejora de los atributos priorizados, permitió identificar el tipo de intervenciones que aportarán directamente a la seguridad hídrica y, en general, a todos los aspectos de importancia ecológica, social y ambiental de la cuenca. En conjunto, estas acciones permitirán consolidar un modelo de gestión hídrica resiliente, inclusivo y basado en la naturaleza, que garantice la provisión de servicios ecosistémicos esenciales para las generaciones presentes y futuras en la cuenca del río Yaque del Norte.

Finalmente, las SbN promueven modos de vida sostenibles al generar empleo local en actividades de restauración, manejo forestal y agricultura, y fomentan la transición hacia sistemas agroforestales y silvopastoriles. Estas dinámicas productivas, alineadas con la conservación, refuerzan la sostenibilidad económica y ambiental del territorio.

