



WORLD
RESOURCES
INSTITUTE

REPORTE

Integrando Infraestructura Natural al Sistema de Abastecimiento de Agua de Bogotá

Santiago Izquierdo-Tort, Diego Restrepo-Zambrano, Suzanne Ozment, Natalia Acero, Laura Bulbena, Juana Camacho, Laura Villegas Ortiz, Fabio Arjona, Patricia Bejarano, Mario Mora, y Margoth García

Cities **4** Forests

CONSERVACIÓN
INTERNACIONAL
Colombia





SOBRE LOS AUTORES

SANTIAGO IZQUIERDO-TORT

Es Investigador Asociado para el Instituto de Investigaciones Económicas de la Universidad Nacional Autónoma de México.

DIEGO RESTREPO-ZAMBRANO

Es experto en recursos hídricos y adaptación al cambio climático para Conservación Internacional.

SUZANNE OZMENT

Es Investigadora Asociada de la Iniciativa Cities4Forests e Infraestructura Natural del World Resources Institute.

NATALIA ACERO

Es Directora del Programa de Agua y Ciudades para Conservación Internacional Colombia.

LAURA BULBENA

Es Especialista en Soluciones Basadas en la Naturaleza para el World Resources Institute.

JUANA CAMACHO

Es Asesora de la Gerencia Corporativa de Gestión Ambiental de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB).

LAURA VILLEGAS ORTIZ

Es Investigadora Senior para Earth Economics.

FABIO ARJONA

Es Director Ejecutivo para Conservación Internacional Colombia.

PATRICIA BEJARANO

Es Directora de Paisajes Sostenibles de Alta Montaña para Conservación Internacional Colombia.

MARIO MORA

Es experto en restauración para Conservación Internacional Colombia.

MARGOTH GARCÍA

Es experta en producción sostenible para Conservación Internacional Colombia.

AGRADECIMIENTOS

Este informe ha sido elaborado por World Resources Institute y Conservación Internacional Colombia, en colaboración con la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB). Los autores agradecen a Conservación Internacional, a la Fundación Piscis, al Ministerio de Medio Ambiente, Alimentación y Asuntos Rurales del Reino Unido y a la Fundación FEMSA por su contribución a este proyecto.

Agradecemos a las siguientes personas la revisión y el suministro de datos y perspectivas para fortalecer este informe: Aaron Bruner (CI), Andrés Felipe Ladino Ortiz (WRI), Carlos Rincón (EAAB), Charles Iceland (WRI), David Bronzwaig (WRI), Derek Vollmer (CI), Diego Felipe Polanía (CRA), Erin Gray (WRI), Juan Pablo Rodríguez (Universidad de los Andes), Lina Moros (Universidad de los Andes), Lizzie Marsters (WRI), Natasha Collins (WRI), Paula Roberts (CID), Rafael Feltran-Barbieri (WRI), Renata Marson Teixeira de Andrade (WRI), René Zamora-Cristales (WRI), Steven Panfil (CI), Todd Gartner (WRI). Los autores también dan las gracias a IAN Consultores, que desarrollaron el modelo de costos del tratamiento del agua que sirvió de base para este estudio.



Department
for Environment
Food & Rural Affairs



Fundación
FEMSA



Pisces
Foundation

CITACIÓN SUGERIDA

Izquierdo-Tort, S., D. Restrepo-Zambrano, S. Ozment, N. Acero, L. Bulbena, J. Camacho, L. Villegas Ortiz, F. Arjona, P. Bejarano, M. Mora, and M. Garcia. 2023. "Integrando infraestructura natural al sistema de abastecimiento de agua de Bogotá." Washington, DC: World Resources Institute. Disponible online en <https://doi.org/10.46830/wriipt.22.00046sp>.

VERSION 1

Agosto 16, 2023



TABLA DE CONTENIDO

3	Prólogo	39	Siguientes pasos
5	Resumen ejecutivo	42	Apéndices
5	Resumen Ejecutivo	42	Apéndice A. Definición de las normas de aplicación para las actividades de inversión en infraestructuras naturales
6	Aspectos destacados	45	Apéndice B. Métodos e hipótesis para la modelación biofísica
6	Invirtiendo en infraestructuras naturales para la gestión del agua en Bogotá	51	Apéndice C. Métodos de análisis financiero e hipótesis
8	Evaluación del papel de las infraestructuras naturales en el abastecimiento urbano del agua		
8	La infraestructura natural potencia y complementa la infraestructura gris	55	Siglas
13	Introducción	55	Notas finales
14	Retos de la gestión del suelo y el agua en las cuencas hidrográficas de Bogotá	56	Glosario
23	La GGA en el control de sedimentos y nutrientes	56	Bibliografía
24	Paso 1: Definición del objetivo de inversión	59	Acerca del WRI
24	Paso 2: Selección del portafolio de inversión	59	Acerca de CI
28	Paso 3: Estimación de los resultados biofísicos	59	Acerca de EAAB
31	Paso 4: Valoración de costos y beneficios		
35	Paso 5: Comparación de costos y beneficios		
36	Paso 6: Abordando el riesgo y la incertidumbre		



Prólogo

Bogotá, una vibrante metrópolis ubicada en el corazón de Colombia, se enfrenta a una serie de retos complejos en torno al agua. El deterioro de la infraestructura, la contaminación y el cambio climático dificultan cada vez más a la empresa de acueducto de la ciudad el suministro de agua potable para una población en aumento.

Pero la respuesta a la inminente crisis de Bogotá podría estar más cerca de lo imaginado: la ciudad está rodeada de paisajes asombrosos cuyo valor va mucho más allá de su belleza. Sus páramos actúan como esponjas gigantes que absorben y liberan gradualmente el agua. Sus montañas boscosas capturan la niebla y proporcionan agua limpia a los ríos. La naturaleza que rodea la ciudad tiene la capacidad inherente de proporcionar agua a sus millones de habitantes.

Está claro que la infraestructura tradicional por sí sola ya no puede atender las necesidades de abastecimiento de Bogotá. Se necesitan soluciones innovadoras, como la infraestructura natural, para hacer frente a las necesidades urgentes en materia de abastecimiento. Este estudio encontró que la protección y restauración de los ecosistemas nativos, junto con el apoyo a las comunidades para la transición a nuevos modelos de producción agrícola, pueden mejorar de forma costo-efectiva la calidad del agua y fortalecer la resiliencia frente a los impactos del cambio climático. La infraestructura natural puede complementar efectivamente la infraestructura existente y, al mismo tiempo, generar innumerables beneficios tanto para el hombre como para la naturaleza, desde el fomento de la biodiversidad y la vitalidad de los ecosistemas hasta el fortalecimiento de la salud y el bienestar de las comunidades.

Hoy en día, la infraestructura natural sigue estando críticamente subfinanciada y subdesarrollada en Bogotá. Las soluciones basadas en la naturaleza

pueden reportar ventajas económicas a largo plazo a la empresa de acueducto de la ciudad y a las comunidades de la zona. Este estudio concluye que el costo inicial de la restauración de los ecosistemas naturales seleccionados -5,3 millones de dólares- podría generar 44,6 millones de dólares de ahorro en costos de tratamiento de agua sólo para la empresa de acueducto en los próximos 30 años.

Los enormes beneficios sociales, económicos y ecológicos sólo pueden obtenerse si se actúa con rapidez. La colaboración es clave para conseguir financiación e implementar con éxito las soluciones basadas en la naturaleza. Los organismos gubernamentales de Bogotá, las autoridades medioambientales regionales, las empresas locales de agua, las comunidades, los donantes y los inversionistas deben forjar alianzas que impulsen las soluciones basadas en la naturaleza.

El camino está claro para Bogotá, y existen caminos similares para otras ciudades alrededor del mundo. Mientras continuamos afrontando los retos que plantean la rápida urbanización y los impactos climáticos, no podemos dejar de reconocer el tremendo potencial de nuestro entorno natural. Mediante soluciones innovadoras y una colaboración sólida, ciudades como Bogotá pueden hacer frente a las crisis y convertirlas en oportunidades beneficiosas para las personas, la naturaleza y el clima.

Ani Dasgupta, Presidente y CEO,
World Resources Institute.

Rachel Biderman, Vicepresidenta Senior y Jefe
Oficial de Campo para la División de las Américas,
Conservación Internacional.

Noel Valencia López, Gerente General Empresa de
Acueducto y Alcantarillado de Bogotá E.S.P.





Resumen ejecutivo

La infraestructura natural o verde puede complementar de manera costo-efectiva a la infraestructura tradicional para mejorar el desempeño y la resiliencia de los sistemas de abastecimiento de agua; sin embargo, en la Bogotá - Región existe poco desarrollo y financiación de la infraestructura natural.

Este reporte demuestra que inversiones focalizadas en ganadería sostenible y restauración ecológica en la cuenca alta del río Bogotá pueden generar ahorros para la empresa de servicios públicos de agua de Bogotá, a través del control de sedimentos y nutrientes, y demuestra la viabilidad financiera de la infraestructura natural para fomentar la seguridad hídrica. En el reporte se presentan algunas recomendaciones para futuros análisis y pasos de toma de decisiones locales para catalizar acciones y colaboraciones en infraestructura natural.

ASPECTOS DESTACADOS

- La Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá se enfrenta a retos inminentes para garantizar fuentes de agua confiables y limpias para abastecer a una población urbana en crecimiento.
- En la cuenca alta del río Bogotá, invertir en ganadería sostenible y restauración ecológica reduciría significativamente la carga de sedimentos y la contaminación de nitrógeno en la Planta de Tratamiento de Agua Potable Tibitoc.
- A través de la Metodología Verde-Gris del World Resources Institute (WRI) y de los modelos InVEST de sedimentos y nutrientes, este informe encontró que inversiones dirigidas a sistemas silvopastoriles sostenibles y a la restauración de ecosistemas en 2460 hectáreas, que representan el 2% de la cuenca, requerirían \$5,3 millones de dólares y generarían beneficios no descontados de \$44,6 millones de dólares en 30 años. Los beneficios se derivan de evitar costos de tratamiento del agua en energía (electricidad), productos químicos y deterioro de la infraestructura.
- El portafolio de inversión alcanza un valor presente neto de US\$0,6 millones (descontado en 2022), un periodo de recuperación de la inversión de 25 años y una tasa interna de retorno del 13%. El promedio de costos de la actividad por hectárea es de \$2,100 dólares y oscila entre los \$2,000 y \$3,600 dólares.
- La infraestructura natural puede complementar a la infraestructura tradicional para la gestión del agua en Bogotá mientras que ofrece otros beneficios adicionales.
- La financiación y la ejecución del portafolio de inversión requerirá fomentar la colaboración y armonizar los objetivos entre las partes interesadas de la cuenca, como autoridades ambientales regionales y municipales.

INVIRTIENDO EN INFRAESTRUCTURA NATURAL PARA LA GESTIÓN DEL AGUA EN LA BOGOTÁ-REGIÓN

El agua de Bogotá, una ciudad de más de siete millones de habitantes, procede de tres fuentes principales: El 25% de la cuenca alta del río Bogotá, dentro del Páramo de Guacheneque; el 70% de la cuenca alta del río Guatiquía, situada dentro del Páramo de Chingaza, con una capacidad de 20 metros cúbicos por segundo (m³/s); y el 5% del Complejo del Páramo de Sumapaz, en la zona rural al sur de Bogotá. Aunque se espera que Chingaza siga siendo la principal fuente hídrica de Bogotá, las inversiones estratégicas relacionadas con el agua en la cuenca alta del río Bogotá, pueden proporcionar a la ciudad un portafolio más diversificado de fuentes hídricas, mientras alivian la presión para la ampliación de los embalses en los páramos y ofrecen posibles beneficios adicionales a las comunidades locales de toda la cuenca.

La segunda fuente de agua de la ciudad, la cuenca alta del río Bogotá, es esencial para mantener el acceso al agua en el largo plazo. Esta fuente de agua es tratada por la Planta de Tratamiento de Agua Potable Tibitoc, que tiene una capacidad máxima de 10,5 m³/seg. En un contexto de aumento de la demanda de agua en Bogotá, la reducción en el costo de tratamiento de agua en Tibitoc haría más atractivo financieramente el suministro a partir de esta fuente.

La Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), enfrenta graves problemas de gestión del agua en la planta de Tibitoc. Varios procesos en la cuenca alta del río Bogotá provocan una elevada presencia de sedimentos y contaminantes en el agua, especialmente durante las temporadas secas en los puntos de captación de Tibitoc. Entre ellos se incluyen el crecimiento industrial acelerado y los residuos derivados, junto con la degradación del suelo y el uso excesivo de insumos para la producción agrícola. La presencia de sedimentos y contaminantes en el agua de Tibitoc traducida en elevados costos de tratamiento, ha provocado cierres ocasionales y ha impedido que la EAAB considere seriamente la cuenca alta del río Bogotá como una posibilidad para ampliar sus operaciones. Aunado a un contexto de rápida expansión urbana y condiciones variables relacionadas



con la emergencia climática, garantizar fuentes de agua fiables para Bogotá es una tarea fundamental de gestión del agua para la EAAB.

La EAAB tiene experiencia en la adquisición de terrenos y la ejecución de inversiones en infraestructura natural en el sistema Tibitoc. Según el informe de sostenibilidad de la EAAB de 2021, esta disponía más de 465 hectáreas de tierra en el sistema Aposentos de Tibitoc que contenía zonas de páramo y subpáramo (EAAB, 2022). El informe también destaca una serie de esfuerzos para restaurar y conservar los ecosistemas naturales en los predios de la empresa. Sin embargo, las zonas de la cuenca más críticas desde el punto de vista hídrico para su protección o restauración son áreas complementarias a los predios de la empresa. Por lo tanto, se necesita un enfoque de intervención que abarque toda la cuenca y promueva alianzas para garantizar que estas áreas críticas para el agua se gestionen adecuadamente.

La infraestructura natural podría contribuir a que Tibitoc potabilizara más agua y a garantizar el suministro en caso de fenómenos meteorológicos extremos. Al mejorar la calidad del agua en la captación, las inversiones en infraestructura natural pueden permitir a Tibitoc tratar más agua de la que puede tratar con los niveles actuales de sedimentos y contaminantes, ayudando así a satisfacer la demanda futura. Además, la restauración y conservación de los ecosistemas ayudan a preservar la cantidad y calidad del agua en la cuenca y a protegerla de inundaciones, sequías y otros fenómenos meteorológicos extremos relacionados con el cambio climático. El periodo de inversión de 30 años de la iniciativa se enmarca dentro de los objetivos mundiales de cero emisiones netas para 2050, lo que genera oportunidades para crear sinergias con otras estrategias de adaptación y mitigación del cambio climático (Heubaum et al. 2022; CMNUCC, 2022).

Garantizar una cuenca sana mediante inversiones específicas en infraestructura natural podría ayudar a la EAAB a reducir los costos operativos de Tibitoc.

Actualmente, el tratamiento de agua en Tibitoc es costoso debido a la carga de sedimentos y múltiples contaminantes, incluida la contaminación de nutrientes, así como los residuos urbanos e industriales. Por lo tanto, invertir en infraestructura natural podría ayudar a mantener sano el sistema de abastecimiento de agua de Tibitoc. La infraestructura natural podría incluir soluciones basadas en la naturaleza como sistemas silvopastoriles sostenibles, restauración ecológica y protección de nacimientos, que fomenten la vegetación natural y se complementen con obras biomecánicas para el control de nutrientes y sedimentos.

Conservación Internacional (CI) Colombia, desde el 2007 ha desarrollado una estrategia en conjunto con múltiples partes interesadas para promover la implementación de soluciones basadas en la naturaleza. Esta estrategia diseñada acorde con el Estándar Global para las Soluciones Basadas en la Naturaleza de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN, 2020), busca aumentar la capacidad de resiliencia hídrica en la Bogotá-Región, principalmente en la cuenca alta del río Bogotá (CI Colombia, 2017). En los últimos 15 años, esta estrategia ha producido un portafolio de acciones, diseñadas localmente, que tienen como objetivo priorizar la conservación de la biodiversidad, la salud del ecosistema y el bienestar comunitario. Estas acciones incluyen iniciativas de conservación, restauración y producción sostenible, diseñadas para garantizar el acceso equitativo al agua tanto a nivel local como regional, y al tiempo apoyar la adaptación al cambio climático. En el desarrollo de la estrategia, CI Colombia hace énfasis en la participación de las partes interesadas locales en todas las etapas del proceso, desde el diseño hasta el monitoreo,

seguimiento y la evaluación. Este enfoque garantiza que los proyectos mejoren las condiciones socioeconómicas de las comunidades y fomenten la sostenibilidad a largo plazo, así como la resiliencia hídrica de la región. CI Colombia está trabajando para establecer un nuevo estándar de enfoques eficaces e inclusivos para la gestión y conservación del agua.

Las inversiones en infraestructura natural podrían contribuir en la adaptación al cambio climático y a su mitigación, entre otros beneficios adicionales. Además de reducir los costos operativos en Tibitoc, las inversiones en infraestructura natural podrían generar una amplia gama de beneficios ambientales y socioeconómicos en la cuenca alta del río Bogotá. Los beneficios adicionales previstos para la EAAB y las poblaciones locales de toda la cuenca incluyen la mitigación y la adaptación al cambio climático, la conservación de la biodiversidad y los ecosistemas, los servicios culturales y recreativos, así como la mejora de los medios de vida locales, la reducción del riesgo de inundaciones, la mejora de los sistemas de abastecimiento local y la salud de la población. Desarrollar una mejor comprensión, cuantificación y valoración económica de estos beneficios adicionales podría ayudar a movilizar recursos financieros públicos y privados para apoyar las inversiones en infraestructura natural (Heubaum et al. 2022).

EVALUACIÓN DEL PAPEL DE LA INFRAESTRUCTURA NATURAL EN EL ABASTECIMIENTO URBANO DEL AGUA

Este estudio proporciona los resultados de un análisis financiero de un portafolio de infraestructura natural orientada a la ganadería sostenible y la restauración ecológica en la cuenca alta del río Bogotá basado en la Metodología Verde-Gris (Green-Gray Assessment o GGA por sus siglas en inglés) de WRI. La metodología GGA (Gray et al. 2019) es un método de seis pasos que ayuda a evidenciar los costos y beneficios que supone para una empresa de servicios públicos de agua invertir en infraestructura natural. También ha sido aplicado en Brasil y México (Ozment et al. 2018, Feltran-Barbieri et al. 2021).

Este estudio utiliza datos obtenidos de proyectos de infraestructura natural en la cuenca y datos de costos de tratamiento de la EAAB. El estudio se basa en anteriores aplicaciones de la metodología GGA elaborados por WRI, pero los complementa significativamente, en al menos tres aspectos. En primer lugar, considera la costo-efectividad como un criterio explícito para seleccionar el portafolio de inversión. Para ello fue necesario desarrollar un análisis de los resultados financieros de los posibles portafolios de infraestructura natural, antes de seleccionar el mejor portafolio propuesto en función de la rentabilidad. En segundo lugar, el portafolio propuesto se basa en experiencias de campo previas de CI Colombia trabajando con comunidades en producción sostenible y restauración ecológica en la región de estudio. Se espera que la implementación de este portafolio mejore significativamente las condiciones de la calidad del agua, al tiempo que contribuya a la mitigación y adaptación al cambio climático, entre otros beneficios adicionales. Su potencial para ofrecer una amplia gama de beneficios hace del portafolio una opción de inversión atractiva que puede movilizar el apoyo de diversos tipos de inversionistas, incluidos los del cambio climático, así como catalizar una mayor inversión en infraestructura natural (Heubaum et al. 2022). Por último, las estimaciones de los costos evitados resultantes del portafolio de inversión se desarrollaron a partir de una gran cantidad de datos operativos históricos suministrados por la EAAB y de la retroalimentación del gerente de la planta de Tibitoc. Los resultados de los costos evitados en productos químicos también se basan en un modelo que relaciona los niveles de calidad del agua y los costos de tratamiento del agua, desarrollado por un equipo altamente especializado de IAN Consultores. Esta puesta en común de datos y conocimientos por parte de la EAAB refleja su interés en la colaboración y la participación a lo largo de todo el proceso para la elaboración de este estudio, lo que ha reforzado enormemente el análisis y las perspectivas de aplicación del portafolio.

LA INFRAESTRUCTURA NATURAL FORTALECE Y COMPLEMENTA LA INFRAESTRUCTURA GRIS

Se identificó un portafolio de infraestructura natural costo efectivo que abarca 2460 hectáreas, de aquí en adelante denominado NBS2460, para ser implementado

en la cuenca alta del río Bogotá. NBS2460 es un portafolio de inversión orientado a la ganadería sostenible y la restauración ecológica que incluye tres actividades de inversión: sistemas silvopastoriles sostenibles (89% del total de tierras del portafolio), núcleos de restauración en ecosistemas estratégicos (9%) y protección de nacimientos en ecosistemas estratégicos (2%). Este portafolio de inversión se seleccionó, tal y como se detalla en el paso 2, en función del impacto previsto en el control de sedimentos modelado mediante InVEST. En específico, NBS2460 corresponde al 2% (2460 hectáreas) de las tierras con mayor impacto en toda la cuenca para el control de sedimentos en Tibitoc.

También se proporcionan cálculos financieros para un portafolio secundario costo efectivo que corresponde al 1% (1230 hectáreas) de las tierras con mayor impacto, denominado NBS1230. El análisis muestra que la rentabilidad para Tibitoc disminuye con el número de hectáreas, de tal manera que portafolios de inversión iguales o superiores al 3% de las tierras de la cuenca no son financieramente rentables. Sin embargo, inversiones en un mayor número de hectáreas podrían conducir potencialmente a beneficios adicionales más amplios de las inversiones en infraestructura natural a lo largo de la cuenca. Aunque está centrado exclusivamente en los indicadores de rentabilidad en Tibitoc, el desarrollo de evaluaciones económicas de estos beneficios adicionales podría arrojar mayor claridad sobre la rentabilidad financiera para las intervenciones de infraestructura natural a gran escala.

En el desarrollo de las estimaciones del impacto esperado del portafolio de inversión, se espera que el uso y la cobertura de la tierra, el suministro y la calidad del agua, así como los factores climáticos, permanezcan constantes en su estado actual a excepción de las hectáreas de tierra seleccionadas por el portafolio. Se reconoce que esta suposición es prudente si se tienen en cuenta las altas tasas históricas de cambio del uso y la cobertura del suelo en la cuenca. Por ejemplo, entre 1977 y 2015 los bosques nativos disminuyeron a una tasa anual de 1,54% mientras que las tierras agrícolas aumentaron un 0,83% anual en la cuenca alta del río Bogotá (Cortés Sánchez, 2018). Sin embargo, existe una importante incertidumbre sobre la evolución futura de estos procesos en los próximos años. Por un lado, es probable que la continua actividad humana y los impactos del cambio

climático sobre los ecosistemas desencadenen una mayor conversión de tierras y degradación. Sin embargo, una regulación ambiental más rigurosa y el crecimiento de los bosques secundarios (ver, por ejemplo, Calbi et al. 2020, Cortés Sánchez, 2018) pueden compensar algunos de los patrones de degradación. Se considera que adoptar una línea base fija se justifica para evitar la introducción de supuestos adicionales en un contexto de incertidumbre.

El portafolio de inversión propuesto puede mejorar el rendimiento de la infraestructura gris para el control de sedimentos y nutrientes. El NBS2460 podría ayudar a evitar que los sedimentos y la contaminación de nutrientes lleguen a la fuente de abastecimiento desde el principio, aliviando así la presión en la planta de tratamiento de agua y reduciendo sus costos operativos. Mediante el uso de los modelos InVEST de sedimentos y nutrientes se demuestra que la inversión reduciría los sedimentos y el nitrógeno en la captación de Tibitoc hasta en un 20% y un 3% respectivamente para el año 30 de la inversión. El portafolio de infraestructura natural que se propone complementa las inversiones planeadas en infraestructura gris en Tibitoc, al adoptar un enfoque diferente de la gestión del agua, basado en evitar que los sedimentos y contaminantes del agua lleguen a los puntos de captación. Hasta la fecha, las inversiones en infraestructura previstas en Tibitoc incluyen la renovación de las piscinas de sedimentación, la gestión de los lodos en los lagos de sedimentación y la modernización de las centrales energéticas. Las inversiones en infraestructura natural pueden ayudar a reducir las necesidades o los costos de este tipo de inversiones en infraestructura gris.

La implementación de un portafolio de infraestructura natural podría representar un ahorro de costos significativo para Tibitoc. El portafolio propuesto NBS2460 requeriría una inversión de \$5,3 millones de dólares y generaría un total de costos evitados de unos \$44,6 millones de dólares en 30 años. Esta inversión es financieramente rentable, alcanzando un valor presente neto (VPN) de \$0,6 millones de dólares, un retorno de la inversión (ROI) del 12%, una tasa interna de retorno (TIR) del 13% y un periodo de recuperación de la inversión de 25 años a partir de 2022 (Tabla 1). Se proporcionó un análisis de sensibilidad de los resultados a las modificaciones de las variables clave, incluida la aplicación de tasas de descuento más bajas al portafolio y el análisis de los resultados con niveles deteriorados de calidad en la captación de agua de Tibitoc.

TABLA 1 | Resultados financieros del portafolio de inversión en 2460 hectáreas (NBS2460) para controlar los sedimentos y la contaminación de nutrientes

INFORMACIÓN FINANCIERA DE NBS2460		MILLONES DE DÓLARES, \$US
Costos evitados por el control de sedimentos	Energía (electricidad)	41,8
	Depreciación	0,01
	Total de beneficios por control de sedimentos	41,8
Costos evitados por el control de nutrientes	Productos químicos	1,3
	Energía	1,4
	Depreciación	0,0001
	Total de beneficios por control de nutrientes	2,8
Total de costos evitados		44,6
Costos del portafolio	Inversiones	3,4
	Costos de transacción	0,3
	Mantenimiento	1,1
	Costos de oportunidad	0,5
	Costo total	5,3
Beneficios netos	Beneficios netos (no descontados)	39,3
	Índice de análisis de costo beneficio (costos evitados/costos del portafolio)	8,5
	Margen neto (beneficios netos/costos evitados)	0,9
Resultados financieros	Valor presente neto (tasa de descuento del 12,28%)	0,6

Nota: Los costos evitados y de portafolio pertenecen a valores del 2022. Los costos, beneficios e índices financieros se describen con más detalle en la segunda sección de este informe. Como se indicó anteriormente, con una tasa de descuento del 12,28%, la inversión alcanzaría un ROI del 12%, una TIR del 13% y un periodo de recuperación de la inversión de 25 años.

Fuente: Autores.



Los ahorros de costos asociados al portafolio de inversión provienen del control de los sedimentos y del nitrógeno, y están asociados a la reducción de los costos de energía, productos químicos y depreciación. Se ha estimado en \$41,8 millones de dólares el ahorro de costos derivado del control de sedimentos, que procede sobre todo del ahorro energético derivado del bombeo y distribución de agua en las instalaciones de la planta, la aplicación de productos químicos y el bombeo de agua a los puntos de vertido, pero se complementa con el ahorro en depreciación (\$0,01 millones de dólares). El ahorro de costos derivado del control del nitrógeno procede del ahorro de energía (\$1,4 millones de dólares), seguido del ahorro en productos químicos (\$1,3 millones de dólares). El ahorro derivado de la depreciación es insignificante. En general, nuestros resultados sugieren ahorros de costos significativos en energía como resultado del control de sedimentos, lo que resulta coherente con el enfoque del nexo agua-energía-alimentos que destaca las interdependencias entre el uso y la gestión del agua, los procesos y actividades de uso/coertura del suelo y el consumo de energía (Cremades et al. 2019).

Los resultados indican alto potencial para el desarrollo de un proyecto piloto en el cual la EAAB, junto con aliados estratégicos, pueda explorar cómo gestionar los recursos hídricos en colaboración con las comunidades. El desarrollo de un proyecto piloto puede ayudar a la EAAB junto con aliados estratégicos a comprender cómo involucrar a las comunidades de la mejor forma posible, garantizando la aceptación local, creando asociaciones institucionales, así como desarrollando proyectos y procedimientos asociados a la gestión del agua.

Los próximos pasos identificados incluyen el desarrollo de evaluaciones de viabilidad local, institucional y financiera del portafolio. Es necesario evaluar la viabilidad de aplicación del portafolio, haciendo un acercamiento con las comunidades para garantizar el nivel de interés y su participación activa en la implementación del portafolio. También es necesario trabajar con las partes interesadas en la comprensión y el desarrollo de acuerdos institucionales adecuados, a través de un mecanismo de financiación que permita que los recursos financieros de la empresa de servicio público sean invertidos en portafolios de infraestructura natural, en áreas gestionadas por comunidades a cambio de servicios ecosistémicos, con el apoyo y la cofinanciación de otras partes relevantes interesadas y la alineación con los organismos reguladores.





CAPÍTULO 1

Introducción

La cuenca alta del río Bogotá es una fuente de agua clave para la ciudad de Bogotá. Sin embargo, asegurar y tratar el agua de esta fuente es costoso debido a la contaminación por nutrientes y las altas cargas de sedimentos causadas por la degradación de la tierra y la expansión agrícola, urbana e industrial.

Este capítulo propone invertir en infraestructura natural en la cuenca alta del río Bogotá como una solución alternativa, estratégica y costo-efectiva para la gestión del agua a través de mejoras en la calidad del agua.



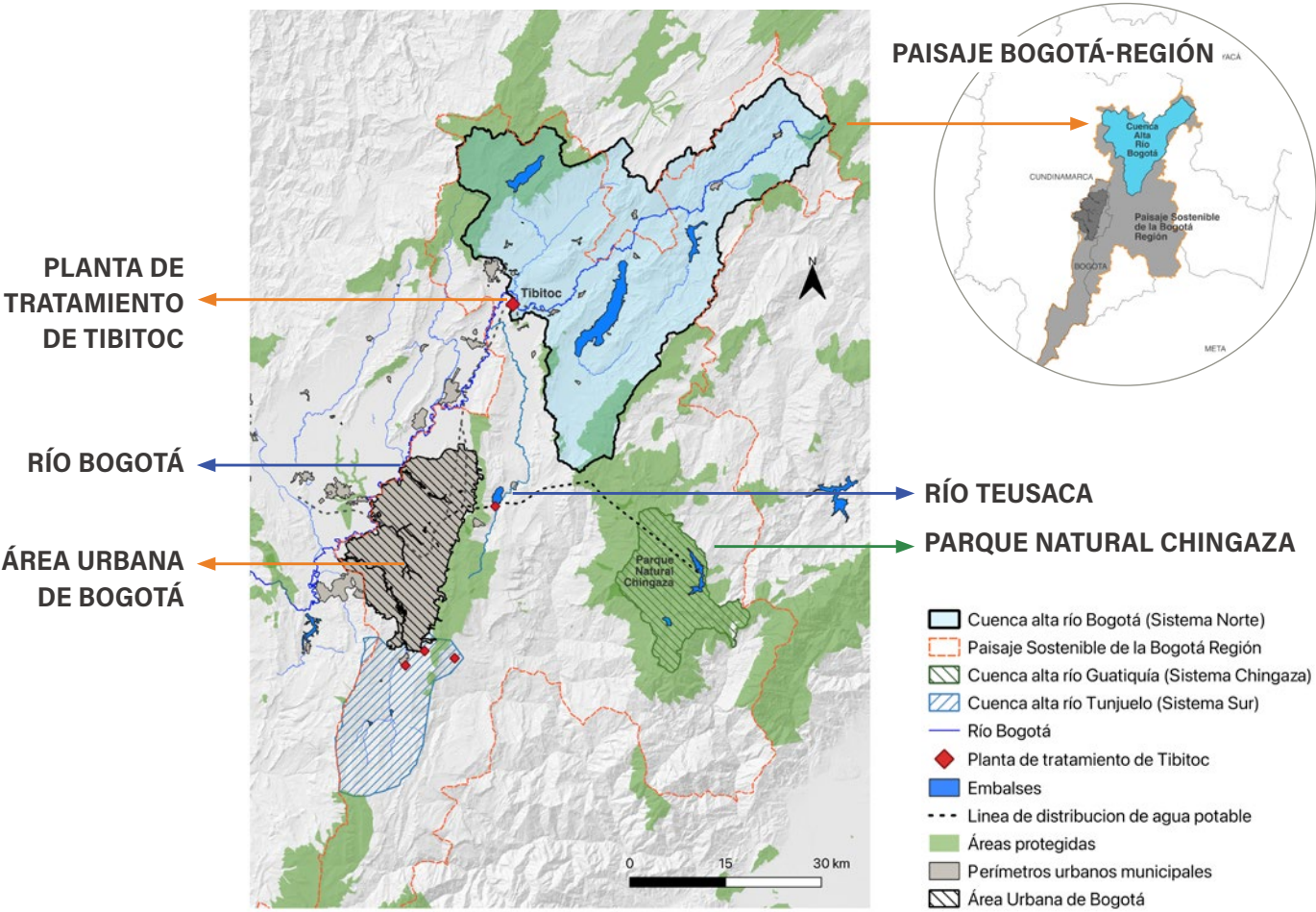
RETOS DE LA GESTIÓN DEL SUELO Y EL AGUA EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO BOGOTÁ

Bogotá es la capital y la ciudad más poblada de Colombia con más de siete millones de habitantes. Al igual que en otras grandes ciudades de América Latina y otros lugares, garantizar fuentes de agua adecuadas para las crecientes poblaciones urbanas, en un contexto de emergencia climática rápidamente cambiante, representa un enorme reto en la gestión del agua para la EAAB. La empresa de servicio público también vende lo que ellos llaman

“agua en bloque” a otros 11 municipios de los alrededores de Bogotá, lo que significa que más de 10 millones de personas dependen del sistema de abastecimiento de agua de la EAAB.

Actualmente, los recursos hídricos de la ciudad de Bogotá provienen de tres sistemas principales: 25% de la cuenca alta del río Bogotá, que es tratada por la Planta de Tratamiento de Agua Potable Tibitoc (administrada por la EAAB) con una capacidad máxima de 10,5 m3/s; el 70% de la cuenca alta del río Guatiquía, ubicada dentro del páramo de Chingaza, con una capacidad de 20 m3/s (también administrada por la EAAB); y el 5% del Complejo del Páramo de Sumapaz, en una zona rural al sur de Bogotá (Figura 1).

FIGURA 1 | Mapa del sistema de agua de Bogotá



Fuente: Autores.

Dada su cercanía a Bogotá y a la dinámica hidrológica de los ecosistemas de páramo¹, se espera que el Páramo de Chingaza siga siendo la principal fuente de agua de Bogotá en el futuro. Sin embargo, una dependencia excesiva del sistema Chingaza plantea riesgos de seguridad hídrica para la población urbana de Bogotá y también pone en peligro la integridad de los escasos ecosistemas de páramo.

En 1997, debido a su ubicación en una falla geológica, uno de los túneles principales que suministra agua de Chingaza a Bogotá se derrumbó y quedó inhabilitado durante nueve meses, lo que puso al sistema bajo una enorme presión (Reinoso Rodríguez, 2020). Además, debido a que el agua en Chingaza se capta a través de embalses artificiales, como el embalse de Chuza, la pérdida de fuentes alternativas de agua puede requerir una mayor inundación de los ecosistemas naturales de páramo, aumentando así la vulnerabilidad de estos ecosistemas estratégicos e intensificando la dependencia en una sola fuente de abastecimiento.

Existe, por lo tanto, la oportunidad de invertir en alternativas a Chingaza para diversificar las fuentes de agua de Bogotá y, al mismo tiempo, aliviar las presiones para la expansión de los embalses en los páramos (Peña-Guzmán et al. 2016).

¿Por qué invertir en la cuenca alta del río Bogotá?

Al ser la segunda fuente de agua más importante para Bogotá en la actualidad, la cuenca alta del río Bogotá (cuya superficie es de aproximadamente 150.000 hectáreas) es un lugar estratégico para invertir en la gestión del agua (Figura 2) por las siguientes razones:

- **Mandato jurídico para el río Bogotá:** En 2014, el Consejo de Estado dictaminó que todas las instituciones de la región de Bogotá son responsables de la descontaminación del río y de evitar una mayor contaminación asociada al “vertimiento de aguas residuales domésticas e industriales, malas prácticas agrícolas y manejo inadecuado de residuos, por parte

de los habitantes e industrias aledañas” (OCGA 2022). Esta sentencia incluye plazos y mandatos específicos que deben cumplirse.

- **Futuras oportunidades de gestión del agua para la EAAB:** la cuenca alta del río Bogotá puede ser una fuente de seguridad hídrica al facilitar el acceso al agua potable a las crecientes poblaciones de estos municipios. Además, la recaudación de recursos para inversiones en infraestructura natural se ha convertido recientemente en una opción legal a través del cobro de tasas de inversión ambiental para la protección de cuencas hidrográficas². Las inversiones en infraestructura natural podrían complementarse con otras medidas para gestionar la demanda de agua potable en Bogotá y en las zonas urbanas en general, como la promoción de la sustitución del consumo de agua potable mediante el uso de aguas pluviales, aguas grises y escorrentía.
- **Potencial de beneficios adicionales locales:** las inversiones relacionadas con los recursos hídricos en la cuenca alta del río Bogotá tienen la ventaja añadida de ofrecer beneficios socioeconómicos adicionales para las comunidades agrícolas locales que habitan la región. Los beneficios adicionales potenciales incluyen oportunidades para la creación de empleo y el desarrollo de capacidades, mejoras en las prácticas agrícolas y la productividad, y mejoras en la salud pública (Ozment et al. 2021; Seymour et al. 2022). Estos beneficios adicionales ofrecen mejores oportunidades de participación comunitaria (Recuadro 1).
- **Mitigación y adaptación al cambio climático:** fenómenos extremos como sequías e inundaciones pueden volverse más probables en un contexto climático global cambiante (IPCC, 2021). La inversión en infraestructura natural en la cuenca alta del río Bogotá ofrece un enorme potencial para la adaptación al cambio climático y la mitigación de sus efectos y por lo tanto puede ayudar a atraer una importante inversión climática. Por otro lado, los costos de la inacción pueden ser significativos en condiciones climáticas cada vez peores.

RECUADRO 1 | Estrategia de Paisaje Sostenible de la Bogotá - Región

CI en alianza con organismos regionales y locales, han diseñado la estrategia del Paisaje Sostenible de la Bogotá-Región, la cual se basa en lecciones aprendidas de diversos proyectos ambientales y comunitarios desarrollados en los últimos 10 años. La estrategia se centra en tres líneas de trabajo: conservación de áreas estratégicas, restauración de ecosistemas y desarrollo de sistemas productivos sostenibles. CI ha adoptado un enfoque altamente participativo que incluye procesos y mecanismos de engranaje significativo con las comunidades en todas las fases de desarrollo del proyecto, desde el diseño y la conceptualización, hasta la ejecución de las actividades, y el monitoreo y la evaluación de los resultados. La estrategia se implementa por medio de proyectos, los cuales tienen una duración de entre tres y cinco años.

El primer paso de los proyectos de implementación de soluciones basadas en la naturaleza de CI consiste en delimitar y priorizar las zonas elegibles para la ejecución del proyecto en función de criterios medioambientales, sociales, políticos, financieros e hidrológicos. Una vez identificadas las potenciales áreas de intervención, se hace un acercamiento con las autoridades ambientales, las alcaldías municipales, las comunidades y otros actores locales relevantes e interesados, para presentar una visión general del proyecto y plantear cómo los municipios y las comunidades podrían beneficiarse directamente de las soluciones basadas en la naturaleza. Si las comunidades manifiestan su interés, CI inicia un proceso de diseño compartido del proyecto, definiendo el portafolio de actividades específicos basados en los

intereses y las necesidades de la comunidad; a continuación, estos portafolios se presentan a los potenciales donantes para su financiación. En lugar de ejecutar directamente las actividades del proyecto, CI fortalece a las comunidades a crear capacidades de ejecución basadas en sus intereses, y a menudo contrata a personas u organizaciones locales para facilitar o implementar las actividades del proyecto.

El objetivo global de CI consiste en adaptar al cambio climático y garantizar la seguridad hídrica de Bogotá y los municipios aledaños y generar beneficios locales para las comunidades rurales. El éxito de cada proyecto se evalúa utilizando varios indicadores, incluidos indicadores de impacto, como la calidad y la cantidad de agua, así como de indicadores de proceso, como el número de hectáreas intervenidas. La elección concreta de los indicadores varía en función de las características de cada proyecto.

El enfoque participativo de CI ha tenido éxito a la hora de: superar los obstáculos sobre la participación de las comunidades en las primeras fases de los proyectos, como la falta de confianza y la desinformación (por ejemplo, el temor a que la participación en el proyecto pueda significar la pérdida de la propiedad de sus tierras); garantizar y mantener la participación de las comunidades durante la ejecución de los proyectos; crear beneficios locales pertinentes para cada contexto; y aumentar la probabilidad de que las actividades y los beneficios se mantengan a lo largo del tiempo una vez finalicen los proyectos.

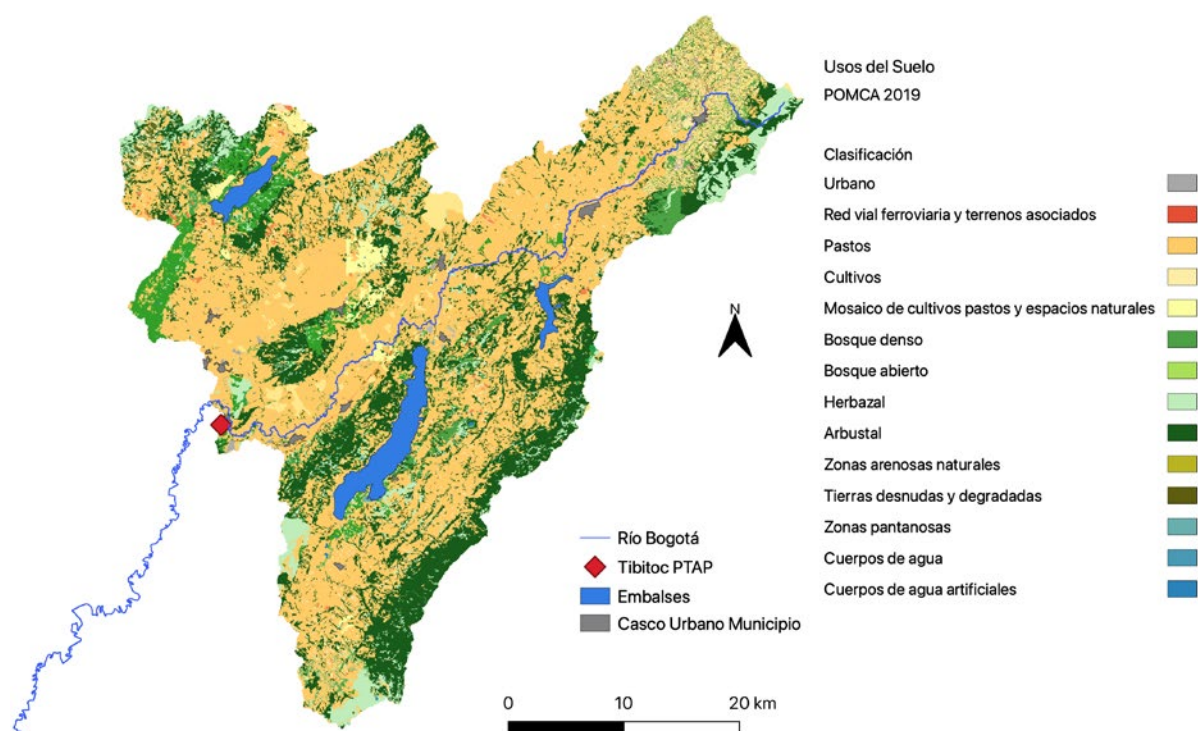
Fuente: Autores.

El agua captada en Titiboc es costosa de tratar debido a una alta carga de sedimentos (sólidos en suspensión) y la existencia de múltiples contaminantes, incluida la contaminación de nutrientes, como nitratos, amonio, materia orgánica y manganeso. Estos sedimentos y contaminantes están provocados en cierta medida por al menos tres procesos:

- prácticas insostenibles de gestión del uso de la tierra en las zonas altas, vinculadas a un crecimiento industrial acelerado y a sus residuos derivados en el Corredor Industrial de la Sabana;

- la expansión urbana al norte de Bogotá, principalmente en los municipios de Cajicá, Chía, Tocancipá y Gachancipá; y
- la degradación de la cobertura del suelo y el uso excesivo de insumos agrícolas como fertilizantes y pesticidas (ver, por ejemplo, Rodríguez-Jeangros et al. 2018; Santos Santos y Camacho, 2022).

FIGURA 2 | Mapa de la cuenca alta del río Bogotá



Fuente: Autores.

Estudios previos han propuesto diferentes soluciones para mejorar la calidad del agua en el río Bogotá, que está altamente afectado, contaminado e institucionalmente en una situación compleja. Dichas soluciones incluyen fomentar la coordinación entre los diversos actores encargados de la gestión del agua (Santos Santos y Camacho, 2022) y complementar la aplicación de controles regionales cuenca abajo, con controles en la fuente y en el sitio para cumplir con la normatividad vigente (Rodríguez-Jeangros et al. 2018).

Se propone una solución alternativa para mejorar la calidad del agua en Tibitoc a partir de inversiones en infraestructura natural. La EAAB ya tiene experiencia en la compra de predios estratégicos, e implementando inversiones en infraestructura natural en predios propios en el área de Tibitoc (EAAB, 2022). Se propone el desarrollo de inversiones específicas, en predios complementarios a los predios de la EAAB, para incluir las áreas más críticas para la protección o restauración de los ecosistemas de la cuenca. Asimismo, se destaca la necesidad de adoptar un enfoque integral de cuenca y de establecer alianzas para garantizar una gestión adecuada de estas zonas críticas para el manejo del agua.

Nuestros resultados muestran que tales inversiones podrían reducir el costo de las operaciones, de modo que podría tratarse más agua en la planta Tibitoc, por ejemplo, permitiendo que la planta funcione a plena capacidad, ayudando a satisfacer la demanda futura y asegurando el suministro en caso de crisis. Tibitoc tiene una capacidad nominal de 10,5 m³/s y un uso habitual de 6,2 m³/s (media mensual para 2021).

En un contexto, de alta pérdida y degradación de los ecosistemas naturales, es posible que éstos no puedan regular los flujos de agua ni retener suficientes sedimentos y nutrientes (Bezerra et al. 2022). Además, se espera que las malas condiciones de calidad del agua supongan una carga para la infraestructura gris existente (Ozment et al. 2018). Específicamente, en Tibitoc, la presencia de materia orgánica y otros contaminantes del agua en la planta de tratamiento requiere altas dosis de productos químicos y en el pasado ha provocado cierres ocasionales.



¿Qué es la infraestructura natural y por qué es importante?

Mediante intervenciones específicas de ganadería sostenible y restauración ecológica, la infraestructura natural podría mejorar la calidad del agua en el punto de captación de Tibitoc de manera costo efectiva.

La infraestructura natural puede entenderse como “la protección, restauración o gestión estratégicas de sistemas naturales como bosques y humedales que contribuyen a servicios básicos de infraestructura como el suministro de agua” (Feltran-Barbieri et al. 2021. *Traducción de los autores*). Por ejemplo, la restauración del paisaje contribuye a la estabilidad climática desde la escala local a la global a través del almacenamiento de carbono en el suelo, entre otros procesos biofísicos que afectan a las transferencias de energía y humedad en la atmósfera (Seymour et al. 2022).

En los últimos años se han producido importantes avances en las inversiones sobre infraestructura natural en América Latina y el Caribe: en 2020, más de 156 proyectos

destinados a la seguridad hídrica o para la gestión del riesgo de desastres disponían de fondos suficientes para empezar a ejecutarse más allá de la fase piloto en toda la región (Ozment et al. 2021). Por ejemplo, en el año 2000, la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento (EPMAPS) de Quito creó el Fondo para la Protección del Agua (FONAG), un fondo fiduciario dotado para apoyar de manera constante el trabajo en cuencas hidrográficas (Marsters et al. 2021). A la fecha, el FONAG cuenta con una dotación de \$21,5 millones de dólares para financiar operaciones e investigaciones. Aunque se ha demostrado que países como México tienen un enorme potencial para que la infraestructura natural gestione los riesgos climáticos, como las sequías y las inundaciones, no se dispone de información precisa sobre la financiación de la infraestructura natural (López Portillo et al. 2022). A pesar de los claros logros alcanzados en la región, la infraestructura natural en Bogotá sigue estando subfinanciada y subdesarrollada (OCDE, 2022).

Es posible vincular los proyectos de infraestructura natural para la gestión del agua con otros marcos de política pública, como la adaptación al cambio climático

y su mitigación, la conservación de la biodiversidad y los hábitats, así como la captura de carbono. Una base creciente de iniciativas en todo el mundo demuestra que los proyectos de infraestructura natural pueden ayudar a mantener los sistemas de abastecimiento de agua mediante el control de la carga de sedimentos y la contaminación de nutrientes, contribuir a la adaptación al cambio climático y a su mitigación, generar una amplia gama de beneficios adicionales ecológicos y socioeconómicos, como una mayor biodiversidad y la generación de empleo (Ozment et al. 2021; PNUD, 2022). Un estudio previo realizado en Chingaza muestra además que los proyectos de restauración y conservación se asociaron a una serie de beneficios culturales, como la mejora de la belleza paisajística, la ratificación de los valores indígenas asociados al agua y a su suministro, el fortalecimiento de las comunidades y la creación de vínculos de cooperación entre comunidades (Richerzhagen et al. 2019).

Apoyar las inversiones para lograr resultados de este tipo relacionados con el agua y otros beneficios adicionales a escala, implica desarrollar análisis y metodologías para comprender qué oportunidades existen para invertir en infraestructura natural en toda la cuenca e identificar sus impactos esperados.

Los proyectos de infraestructura natural para la gestión del agua en la cuenca alta del río Bogotá también pueden recibir el apoyo de las crecientes fuentes de financiación para la adaptación y mitigación del cambio climático en todo el mundo, que persiguen objetivos similares. Existe una clara oportunidad de crear sinergias y colaboraciones entre inversores naturales para la gestión del agua con fondos internacionales de cooperación y multilaterales destinados a soluciones basadas en la naturaleza para la adaptación al cambio climático en los países en desarrollo. Un ejemplo destacado es el Fondo de Adaptación (FA), un organismo creado en 2001 para financiar proyectos de adaptación al cambio climático en los países en desarrollo. En 2020, el FA contaba con “un portafolio de 105 proyectos y programas concretos aprobados para una financiación total de \$730 millones de dólares en diversos sectores como la agricultura, la gestión de las zonas costeras, la reducción del riesgo de desastres, la adaptación basada en los ecosistemas, la seguridad alimentaria, los

bosques, los proyectos multisectoriales, el desarrollo rural, el desarrollo urbano y la gestión del agua” (CMNUCC 2022; FAO, 2022).

En su calidad de empresa de servicios públicos responsable del suministro de agua a una población de más de siete millones de personas en la ciudad de Bogotá y sus alrededores, la EAAB podría beneficiarse financiera y operativamente de la inversión en infraestructura natural en la cuenca alta del río Bogotá.

Las inversiones en infraestructura natural en esta región ofrecen una alternativa estratégica esencial para diversificar las fuentes de agua de la empresa de servicios públicos. Sin embargo, para determinar si la inversión en infraestructura natural es financieramente responsable, la EAAB necesita identificar un portafolio de inversión específico, calcular sus indicadores de rentabilidad financiera, así como supervisar y evaluar las intervenciones a lo largo del plazo de inversión. Este informe pretende cumplir las dos primeras tareas.

Acerca de este informe

Este estudio proporciona los resultados de un análisis financiero basado en la metodología GGA, un método de seis pasos que ayuda a comprender los costos y beneficios que conlleva para una empresa de servicios públicos de abastecimiento de agua invertir en infraestructura natural, previamente aplicado en Brasil y México (Recuadro 2). En concreto, el objetivo de inversión del portafolio es reducir los costos de gestión de sedimentos y nutrientes en la planta de tratamiento de agua de Tibitoc, cumpliendo al mismo tiempo las normas de calidad del agua en su capacidad máxima de tratamiento de 10,5 m³/s. La siguiente sección de este estudio presenta los resultados del análisis de la metodología GGA para un portafolio de soluciones basadas en la naturaleza orientado hacia la ganadería sostenible y la restauración ecológica (Tabla 1). Al finalizar, el informe presenta las principales conclusiones y destaca los posibles pasos a seguir.

TABLA 1 | Resultados financieros del portafolio de inversión en 2460 hectáreas (NBS2460) para controlar los sedimentos y la contaminación de nutrientes

INFORMACIÓN FINANCIERA DE NBS2460		MILLONES DE DÓLARES, \$US
Costos evitados por el control de sedimentos	Energía (electricidad)	41,8
	Depreciación	0,01
	Total de beneficios por control de sedimentos	41,8
Costos evitados por el control de nutrientes	Productos químicos	1,3
	Energía	1,4
	Depreciación	0,0001
	Total de beneficios por control de nutrientes	2,8
Costos totales evitados		44,6
Costos del portafolio	Inversiones	3,4
	Costos de transacción	0,3
	Mantenimiento	1,1
	Costos de oportunidad	0,5
	Costo total	5,3
Beneficios netos	Beneficios netos (no descontados)	39,3
	Índice de análisis de costo beneficio (costos evitados/costos del portafolio)	8,5
	Margen neto (beneficios netos/costos evitados)	0,9
Resultados financieros	Valor presente neto (tasa de descuento del 12,28%)	0,6

Nota: Los costos evitados y de portafolio pertenecen a valores del 2022. Los costos, beneficios e índices financieros se describen con más detalle en la segunda sección de este informe. Como se indicó anteriormente, con una tasa de descuento del 12,28%, la inversión alcanzaría un ROI del 12%, una TIR del 13% y un periodo de recuperación de la inversión de 25 años.

Fuente: Autores.

Este estudio se desarrolló utilizando datos observados de proyectos de infraestructura natural en la cuenca y datos propios de costos de tratamiento de la EAAB. La información detallada suministrada por la EAAB y las recomendaciones principales de los gerentes de la planta de agua de Tibitoc, se utilizaron como insumos para elaborar estimaciones de los costos de inversión del portafolio y los costos evitados esperados en productos químicos,

energía y depreciación. Asimismo, se utilizó la experiencia e información de las estrategias de campo de CI Colombia en su trabajo con las comunidades, para la implementación del portafolio de ganadería sostenible y la restauración ecológica en la región estudiada. Cabe destacar que este estudio también considera la costo-efectividad como un criterio explícito para seleccionar el portafolio de inversión.

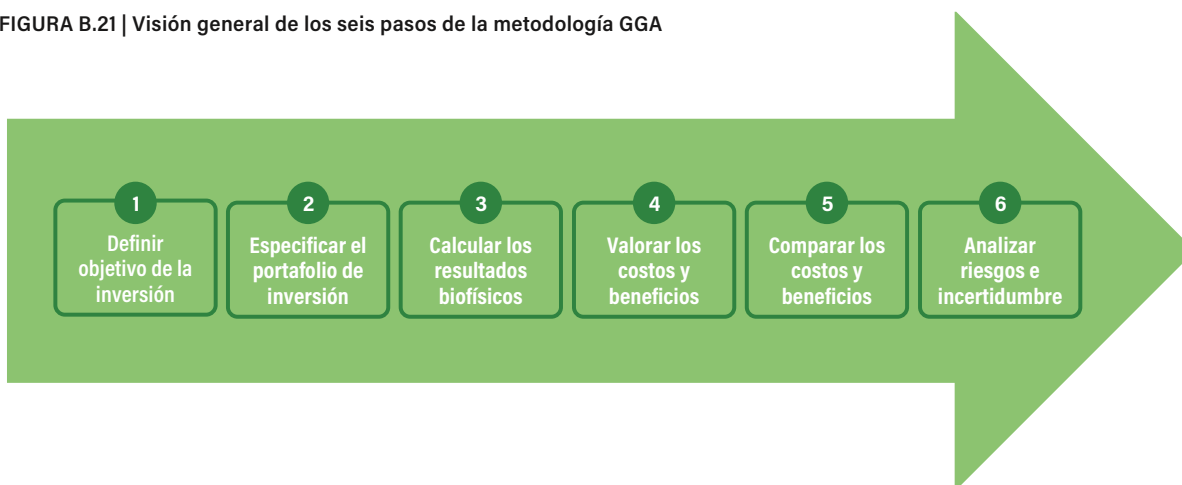
RECUADRO 2 | Visión general de la metodología GGA

Para evaluar el rendimiento financiero de las distintas alternativas de inversión en infraestructura, incluidas las alternativas de infraestructura natural, se aplicó la metodología GGA desarrollada por WRI. Se trata de un método conceptual diseñado para analizar cómo la infraestructura natural (verde) puede complementar y apoyar a la infraestructura construida (gris) en la producción de bienes y servicios para las comunidades (Gray et al. 2019).

Cada paso de la metodología GGA se resume a continuación (Figura 2) y se discute con más detalle a lo largo de la siguiente sección:

1. **Definir el objetivo de la inversión:** este análisis definió el objetivo como la reducción de los costos de manejo de sedimentos y nutrientes en la Planta de Tratamiento de Agua Potable Tibitoc, al tiempo que cumple con los estándares de calidad del agua en su capacidad máxima de tratamiento de 10,5 m³/s.
2. **Especificar el portafolio de inversión:** se identificó un portafolio de inversión orientado a la ganadería sostenible y la restauración ecológica, utilizando los modelos InVEST con el fin de identificar las áreas con el mayor impacto esperado para el control de sedimentos. A continuación, se estimó el impacto esperado del portafolio tanto en el control de sedimentos como de nutrientes, de modo que, aunque la orientación espacial se centró exclusivamente en el control de sedimentos, también se incluyeron estimaciones sobre el impacto del portafolio en el control de nutrientes (Sharp et al. 2016).
3. **Calcular los resultados biofísicos:** se utilizó el Modelo de Regulación de Sedimentos y el Modelo de Regulación de Nutrientes de InVEST para calcular las tasas de rendimiento de sedimentos y nitrógeno del paisaje en cada portafolio. A continuación, se convirtieron estas tasas de sedimentos y nutrientes en medidas de calidad del agua y volúmenes de sedimentos y nitrógeno capturados en los embalses.
4. **Valor de costos y beneficios:** se calcularon los costos totales de cada portafolio de inversión, teniendo en cuenta las inversiones, los costos de transacción, el mantenimiento y los costos de oportunidad. También se calcularon los potenciales costos evitados de cada portafolio (es decir, los beneficios) en términos de energía, productos químicos y depreciación.
5. **Comparación de costos y beneficios entre portafolios:** mediante la aplicación de una tasa de descuento del 12,28% que refleja el costo medio ponderado de capital (weighted average cost of capital o WACC por sus siglas en inglés) para la EAAB, se examinaron y compararon los resultados de cada portafolio de inversión en términos de VPN, ROI, periodo de recuperación de la inversión y TIR.
6. **Análisis del riesgo y la incertidumbre:** se evaluó la susceptibilidad de los resultados a algunas variables clave, como la tasa de descuento y los niveles de calidad del agua.

FIGURA B.21 | Visión general de los seis pasos de la metodología GGA



Fuente: Autores, adaptado de Feltran-Barbieri et al. (2021, 2023).





CAPÍTULO 2

La metodología GGA para el control de sedimentos y nutrientes

Este capítulo proporciona un resumen del portafolio de inversión en infraestructura natural propuesto, cuyo objetivo es reducir los costos de manejo de sedimentos y nutrientes a la vez cumplir con los estándares de calidad del agua en la planta Tibitoc. Se resumen las principales características del portafolio, los resultados biofísicos y el desempeño financiero en términos de costos de inversión y costos evitados por productos químicos, energía y depreciación. También se proporciona un análisis de sensibilidad de las variables clave que pueden afectar el desempeño financiero de las inversiones en infraestructura natural.



Esta sección presenta los resultados detallados del análisis de la metodología GGA. Se alinea a los seis pasos presentados anteriormente, por lo que incluye:

- Una descripción del objetivo de inversión.
- Un resumen de las principales características del portafolio de inversión, incluidas las actividades, la cobertura espacial y los criterios de selección.
- Resultados biofísicos esperados sobre el control de sedimentos y nutrientes.
- Valoración de los costos y beneficios del portafolio.
- Resultados financieros del portafolio sobre los costos de tratamiento del agua en Tibitoc.
- Análisis de sensibilidad de los resultados basados en la modificación y/o inclusión de factores clave.

PASO 1: DEFINICIÓN DEL OBJETIVO DE INVERSIÓN

El objetivo de inversión del portafolio consiste en reducir los costos de manejo de sedimentos y nutrientes en la Planta de Tratamiento de Agua Potable Tibitoc, cumpliendo al mismo tiempo con las normas de calidad del agua en su capacidad máxima de tratamiento de 10,5 m³/s. Este objetivo surgió colectivamente de una serie de discusiones mantenidas en el marco de la alianza entre el WRI, CI Colombia y la EAAB para explorar

oportunidades de inversión en infraestructura natural en Tibitoc. La inversión cubre un horizonte de 30 años, que se alinea con el horizonte temporal habitual utilizado para las inversiones en infraestructura gris para la gestión del agua dentro de la empresa de servicio público. Este horizonte temporal también coincide con el periodo de inversión para evaluaciones anteriores de la metodología GGA en Brasil (Feltran-Barbieri et al. 2018; Ozment et al. 2018). Ese horizonte temporal se considera adecuado para la inversión, teniendo en cuenta el tiempo que requiere el crecimiento de la cobertura vegetal natural y la consolidación de las prácticas agrícolas mejoradas.

PASO 2: SELECCIÓN DEL PORTAFOLIO DE INVERSIÓN

Se seleccionó un portafolio de inversión que incluye tres actividades orientadas a la producción sostenible y la restauración que abarca un área de 2460 ha (en adelante NBS2460) (Tabla 2). Estas actividades fueron seleccionadas de un listado de medidas de adaptación al cambio climático que CI Colombia está implementando actualmente en toda la cuenca por tres razones principales: alto potencial para el control de sedimentos y nutrientes; alta factibilidad de implementación y conocimiento local; y costo financiero competitivo.

TABLA 2 | Actividades del portafolio de inversión propuesto NBS2460

ACTIVIDAD	DESCRIPCIÓN	NÚMERO DE HECTÁREAS (% DEL PORTAFOLIO)
Sistemas silvopastoriles sostenibles	<i>Integración de actividades de restauración ecológica y silvopastoriles en fincas destinadas actualmente a la ganadería (especialmente vacuno de leche).</i> El componente de restauración ecológica incluye la plantación de una gama de arbustos y árboles nativos, además de especies forrajeras y plantas de sombra para la protección contra las corrientes de viento. La plantación se centrará en las afueras de la propiedad, con franjas en los lados más anchos situadas contra la pendiente para la retención de sedimentos. Las actividades silvopastoriles incluyen: ▪ Renovación y mejora forrajera, que comprende manejo de aperos agrícolas de laboreo vertical, producción e incorporación de abonos orgánicos, y mezcla de especies forrajeras en combinación con los pastos naturales propios de las unidades productivas. ▪ Creación de un banco forrajero que combine maíz forrajero para ensilado y saúcos.	2182 (89%)
Núcleos de restauración en ecosistemas estratégicos	<i>Instalación de núcleos de restauración en tierras degradadas ubicadas en el interior de ecosistemas estratégicos (páramos, subpáramos y bosques altoandinos).</i> Los núcleos de restauración consisten en plantaciones densas y distanciadas entre sí, dispersas por un paisaje degradado. Estos núcleos de restauración pretenden integrar paisajes fragmentados y aumentar la conectividad ecológica entre los remanentes naturales existentes, mejorando así los flujos ecológicos (como el movimiento de organismos, materia y energía), preservando la biodiversidad y mejorando la retención de sedimentos. Al restaurar núcleos en lugar de toda la superficie, los costos y la mano de obra se reducen considerablemente. Cada núcleo tiene un tamaño de una hectárea y contiene varios anillos concéntricos que incluyen una combinación de especies arbustivas y arbóreas nativas de crecimiento rápido y lento.	237 (9%)
Protección de nacimientos en ecosistemas estratégicos	<i>Protección de nacimientos en ecosistemas estratégicos (páramos, subpáramos y bosques altoandinos) que han sido degradados por tala selectiva, incendios, agricultura y otras alteraciones.</i> Esta actividad consiste en la introducción de especies arbóreas y arbustivas nativas de crecimiento rápido y lento distribuidas en las zonas externas de un área de intervención de media hectárea alrededor de los nacimientos, acompañadas hacia el interior del nacimiento con especies mejor adaptadas a altos contenidos de humedad. El enriquecimiento y la ampliación de la cobertura vegetal en torno a los nacimientos actúa como un eficaz filtro biológico de sedimentos y productos químicos procedentes de zonas adyacentes, incluidos pesticidas, herbicidas y fertilizantes. Por tanto, la protección de nacimientos reduce la concentración de sedimentos y nutrientes en el agua, mejora la calidad del agua, evita la pérdida de suelo y mejora las funciones del ecosistema, especialmente en la regulación del agua.	41 (2%)
Total		2,460 (100%)

Fuente: Autores, a partir de datos de perfiles de actividad productiva de CI Colombia.

Se seleccionó un conjunto de criterios de inclusión y exclusión para definir las áreas potenciales de intervención para cada tipo de actividad en función de los patrones actuales de uso/cobertura del suelo, el estatus legal de protección, la elevación y la pendiente, entre otros factores (ver Apéndice A para más detalles). Los criterios clave para cada actividad incluyen:

■ **Sistemas silvopastoriles sostenibles**

- Excluir áreas bajo protección ambiental legal y catalogadas como páramos por el Instituto Humboldt.

- Si la pendiente es inferior a 18 grados, convertir a sistemas silvopastoriles.
- Núcleos de restauración y protección de nacimientos en ecosistemas estratégicos.
 - Incluir áreas bajo protección ambiental legal y clasificadas como páramos por el Instituto Humboldt.
 - Incluir áreas ubicadas por debajo de 500 metros (m) de páramos que no estén bajo protección ambiental.
 - Incluir áreas superiores a 2200 m sobre el nivel del mar que no estén bajo uso agrícola.

Estas líneas base de clasificación de usos y coberturas del suelo se basan en el Plan de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCA) de 2019. El POMCA es un instrumento público de planificación territorial que incluye una clasificación detallada del uso/cobertura del suelo para cada píxel de la cuenca. Se asume que el suministro de agua y los factores climáticos permanecen constantes en su estado actual. Asimismo, se supone que el uso y la cobertura del suelo se mantienen constantes en toda la cuenca, salvo en las hectáreas de terreno incluidas en el portafolio.

Identificación y selección del portafolio de inversión propuesto

Para identificar y seleccionar el portafolio de inversión propuesto se siguió un método de tres fases.

2.1. Identificación de las áreas de intervención prioritarias en función del control de sedimentos previsto.

Para priorizar las zonas potenciales de implementación de un portafolio de inversión en toda la cuenca, se utilizaron los modelos InVEST para identificar las áreas donde se esperaría el mayor impacto en el control de sedimentos para Tibitoc. Se generaron tres áreas prioritarias de intervención que corresponden al 1% (o el 99 percentil equivalente a 1234 ha), 2% (2460 ha) y 3% (3687 ha) de las áreas de mayor impacto a través de la cuenca para el control de sedimentos en Tibitoc (Tabla 3). Para cada una de estas áreas prioritarias de intervención, se calculó el porcentaje esperado de reducción de sedimentos y nutrientes en comparación con el escenario base. En otros términos, al usar los modelos InVEST, se calcularon las diferencias esperadas en el rendimiento de sedimentos y nutrientes al convertir el uso/cobertura de la tierra de la línea base al uso/cobertura de la tierra de la alternativa asociada con cada actividad en el portafolio de inversión (ver Apéndice A para más detalles). Aunque la priorización de tierras estaba basada exclusivamente en el control esperado de sedimentos, también se modeló el impacto esperado de las inversiones en estas áreas sobre el control de nitrógeno en Tibitoc. El Modelo de Regulación de Sedimentos de InVEST, que se utilizó para estimar el control de sedimentos se centra en la erosión asociada con las partículas del suelo desprendidas y transportadas

por la lluvia y los flujos terrestres (Sharp et al. 2016). El Modelo de Regulación de Nutrientes de InVEST que se utilizó para estimar el control de nutrientes está diseñado específicamente para la regulación de nitrógeno y fósforo. Ambos modelos se desarrollaron utilizando una gran cantidad de información espacial en la cuenca alta del río Bogotá (Apéndice B). Para los sedimentos, se aplicaron las reducciones de rendimiento estimadas para la turbiedad y el total de sólidos en suspensión en la captación de Tibitoc. Para los nutrientes, se aplicaron las reducciones de rendimiento de los nitratos estimadas en la captación de Tibitoc. El modelo de nutrientes se calibró con información oficial de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR, 2019). El modelo de sedimentos también se comparó con información oficial de la CAR (2006) con resultados similares. No se modelaron otros tipos de sedimentos ni compuestos nitrogenados, como amonio o materia orgánica. Es importante destacar que las tierras seleccionadas para la inversión no son propiedad ni están gestionadas por la EAAB.

Para cada una de estas tres áreas prioritarias, se asignó un portafolio de actividades de inversión basado en el conjunto de actividades predefinidas, así como en los criterios de inclusión y exclusión descritos anteriormente:

- NBS1230 considera un portafolio de actividades de inversión en 1234 ha, que corresponden al 1% de tierras con mayor impacto (99 percentil) a lo largo de la cuenca para el control de sedimentos en Tibitoc.
- NBS2460 considera un portafolio de actividades de inversión en 2460 ha, que corresponden al 2% de las tierras de mayor impacto en toda la cuenca para el control de sedimentos en Tibitoc.
- NBS3690 considera un portafolio de actividades de inversión en 3687 ha, que corresponden al 3% de las tierras de mayor impacto en toda la cuenca para el control de sedimentos en Tibitoc.

El control esperado de sedimentos y de contaminación asociado a estas tres áreas potenciales de inversión oscila entre 14% y 26% de reducción de sedimentos y entre 2% y 4% de reducción de nitrógeno. Respecto a las actividades, los sistemas silvopastoriles sostenibles son el principal componente de cada portafolio, seguidos de los núcleos de restauración en ecosistemas estratégicos.

TABLA 3 | Resultados y actividades de control de sedimentos y contaminación en áreas prioritarias para tres posibles portafolios

		PORTAFOLIO DE INVERSIÓN (PERCENTIL DE IMPACTO PARA EL CONTROL DE SEDIMENTOS EN LA CUENCA)		
		NBS1230 (1% superior)	NBS2460 (2% superior)	NBS3690 (3% superior)
Impacto previsto en el control de sedimentos y contaminación en Tibitoc después de 50 años	Reducción de los sedimentos (%)	14%	21%	26%
	Reducción de nutrientes (%)	2%	3%	4%
Actividad de portafolio	Sistemas silvopastoriles sostenibles (ha)	1073	2182	3317
	Núcleos de restauración en ecosistemas estratégicos (ha)	136	237	317
	Protección de nacimientos en ecosistemas estratégicos (ha)	25	41	54
	Total (ha)	1234	2460	3687

Fuente: Autores.

2.2. Estimación de rentabilidad financiera de cada portafolio.

Una vez identificadas las tres áreas prioritarias posibles y los portafolios de actividades correspondientes, se estimó la rentabilidad financiera de cada uno siguiendo los procedimientos que se detallan posteriormente en los pasos 4 y 5. Es decir, se aplicó la metodología GGA completa para cada uno de los tres posibles portafolios. Este análisis reveló importantes variaciones en términos de rentabilidad entre los tres potenciales portafolios, según las proyecciones de ROI, VPN y TIR (Tabla 4).

TABLA 4 | Rendimiento financiero de los posibles portafolios prioritarios a lo largo de 30 años

INDICADOR DE RENTABILIDAD	NBS1230	NBS2460	NBS3690
ROI (%)	46%	12%	-7%
VPN (millones de dólares)	\$1.2	\$0.6	-\$0.5
TIR (%)	16%	13%	12%

Fuente: Autores.

2.3. Selección de portafolio tomando en cuenta costo efectividad.

De estos tres portafolios prioritarios, se seleccionó el NBS2460 como la propuesta de inversión en Tibitoc dado su desempeño financiero positivo. NBS2460 corresponde al 2% de las tierras con mayor impacto (o 98 percentil) en la cuenca en términos de potencial para el control de sedimentos en Tibitoc. Aunque los indicadores de rentabilidad fueron más altos para NBS1230 que para NBS2460, lo que sugiere una disminución de los rendimientos por área de intervención, se considera que esta última es una mejor oportunidad de inversión porque contempla actividades en una mayor superficie total de tierra y tiene mayores niveles de reducción de sedimentos y nutrientes. Esta mayor cantidad de área ofrece una mejor oportunidad para implementar una estrategia de infraestructura natural más integral en la cuenca alta del río Bogotá, que se espera genere mayores beneficios adicionales sociales y ambientales. Además, esto podría generar nuevas colaboraciones e inversiones entre las distintas partes interesadas de los sectores público, privado y social.

Se descubrió que las inversiones en las áreas con mayor impacto, del 3% en adelante, dejaban de ser costo efectivas. Esto se debe a que los costos del portafolio aumentan linealmente con el número de hectáreas, mientras que las reducciones esperadas de sedimentos y nutrientes disminuyen marginalmente con el número de hectáreas

a partir de cierto umbral (Tabla 3). Por lo tanto, no se incluyeron las valoraciones financieras de las inversiones superiores al 3%.

PASO 3: ESTIMACIÓN DE LOS RESULTADOS BIOFÍSICOS

Tibitoc se beneficiaría significativamente de las inversiones en infraestructura natural.

Se identificó el portafolio NBS2460, que cubre 2460 ha de áreas prioritarias, para implementar un portafolio de inversión orientado hacia la ganadería sostenible y la restauración ecológica (Figura 3; ver también Tabla 2). Como se indica en el paso 2, la selección de este portafolio se basó en la modelación del potencial de reducción de sedimentos y el rendimiento financiero asociado. A

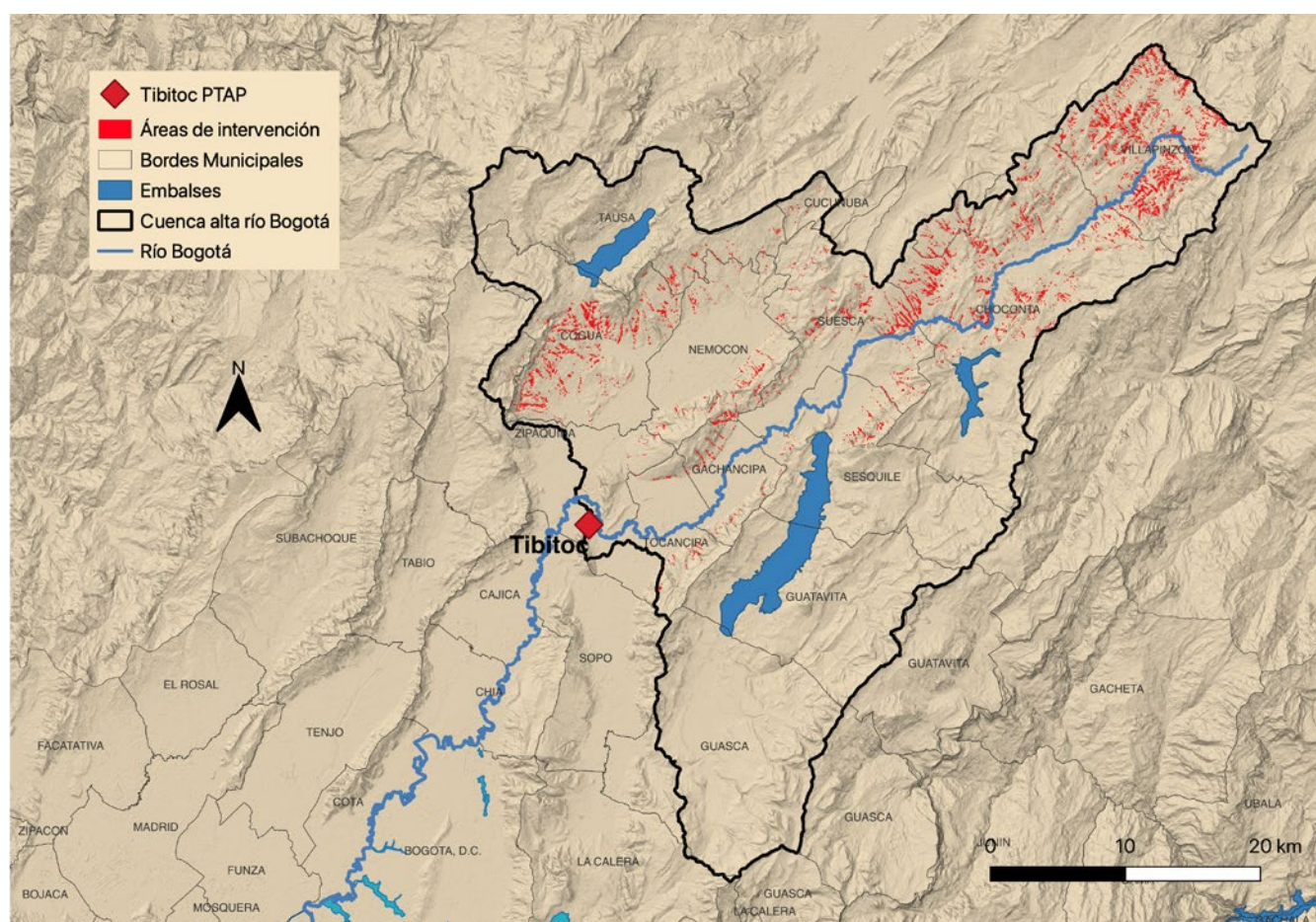
continuación, se presentan estimaciones de las reducciones anuales de sedimentos y de exportación de nitrógeno en la captación de Tibitoc.

Las inversiones en infraestructura natural reducirían la exportación de sedimentos en Tibitoc en un 20% para el año 30.

La erosión y la retención de sedimentos son procesos naturales que influyen en la concentración de sedimentos en los arroyos. La dinámica de erosión y retención de sedimentos está determinada por una serie de factores biofísicos (como las propiedades del suelo, la vegetación y la topografía) y antropogénicos (como las actividades agrícolas y la conversión de tierras) (Sharp et al. 2016).

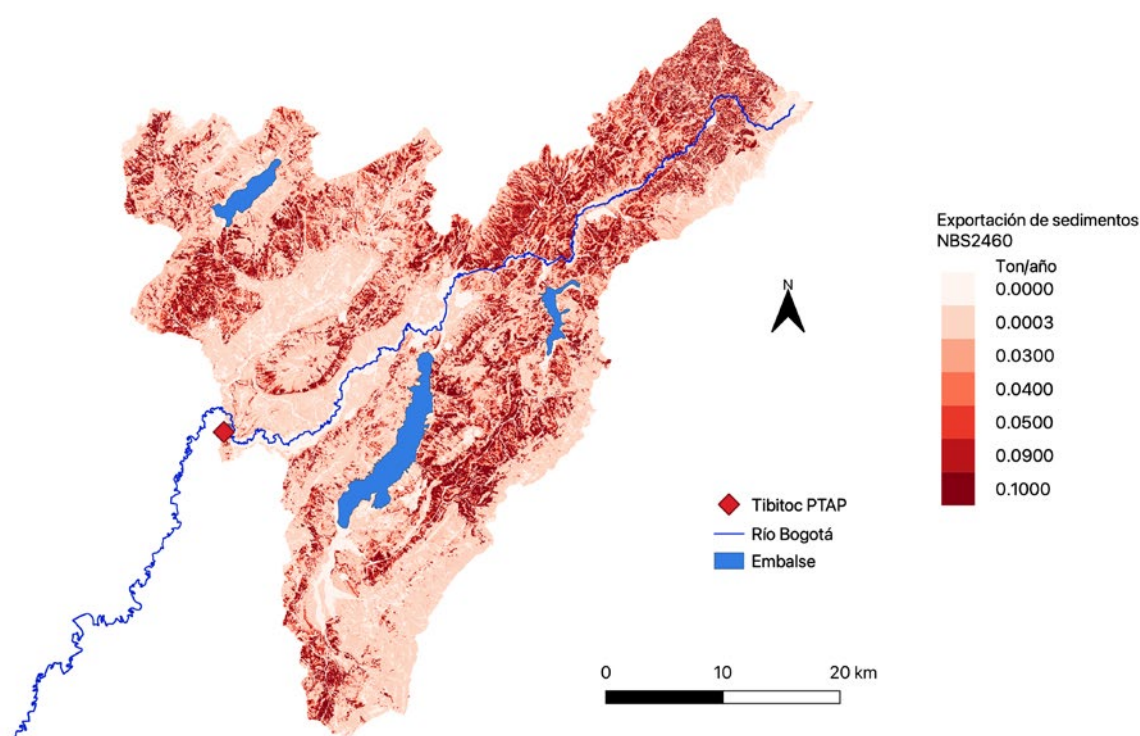
En la cuenca alta del río Bogotá, la protección y restauración de su entorno natural reduciría la erosión del suelo debido a que la vegetación retiene los sedimentos erosionados. Obras biomecánicas específicas, también

FIGURA 3 | Mapa de la zona de intervención del portafolio de inversión



Fuente: Autores, a partir de las cifras administrativas obtenidas de <https://datosabiertos.esri.co/>.

FIGURA 4 | Resultados del modelo de exportación de sedimentos para NBS2460



Fuente: Autores.

permitirían la retención de sedimentos. La reducción de la erosión de sedimentos disminuiría a su vez la carga de sedimentos en los arroyos y, por tanto, los niveles de turbiedad en el punto de captación de agua de Tibitoc. El análisis se centra en el control de la turbiedad y los sedimentos en Tibitoc.

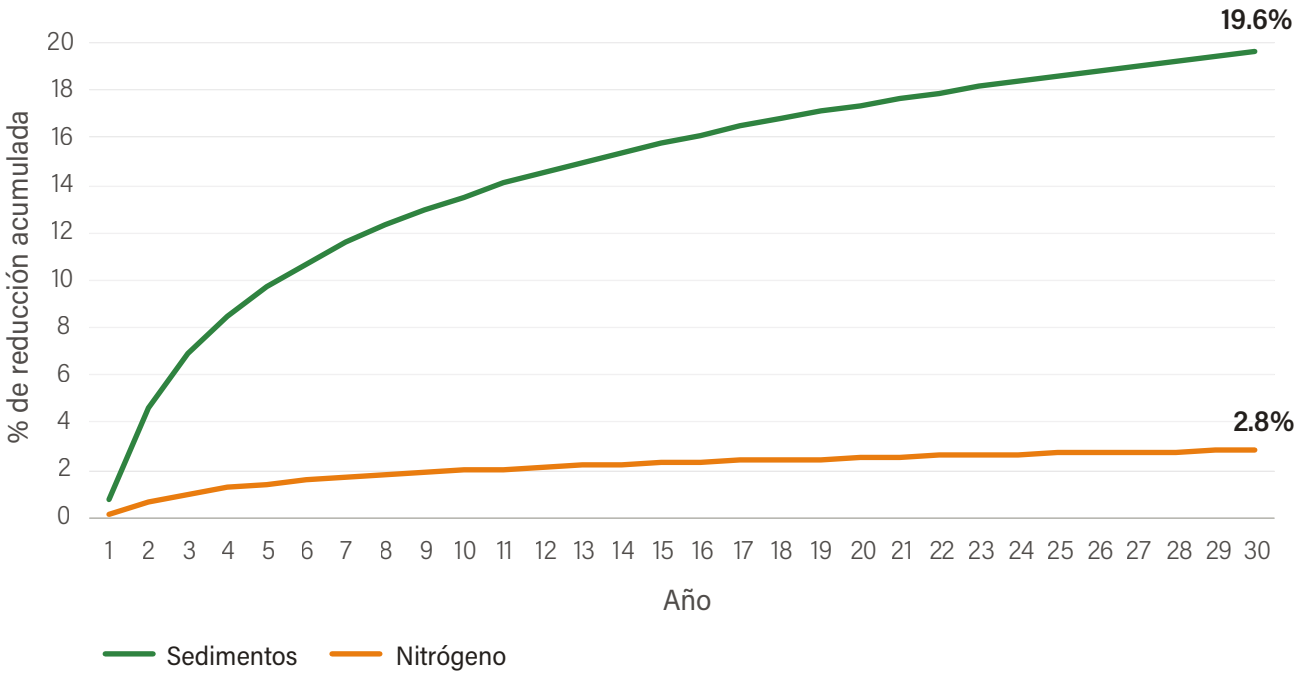
Las intervenciones específicas en áreas prioritarias disminuirían potencialmente el sedimento total exportado desde la cuenca a Tibitoc en un 20% en el año 30 (ver Figuras 4 y 5, Tabla 2, y Apéndice B para más detalles técnicos). Las estimaciones sobre la trayectoria temporal de los impactos acumulados se basan en Poorter et al. (2016), dada la falta de estudios centrados específicamente en el control de sedimentos en ecosistemas de páramo. Como se muestra en la Figura 5, los beneficios de estas intervenciones específicas en infraestructura natural aumentan con el paso del tiempo. En contraste, como se demuestra en el Apéndice C, la infraestructura gris en Tibitoc se deteriora con el tiempo. Las intervenciones específicas también reducirían potencialmente la turbiedad

en el punto de captación de agua en un 18% en el año 20 y en un 20% en el año 50³. Estos cálculos de exportación de sedimentos en Tibitoc tienen en cuenta la dinámica de la eficiencia de captura que ocurre dentro de la cuenca.

Las inversiones en infraestructura natural reducirían el nitrógeno en Tibitoc en un 3% para el año 30.

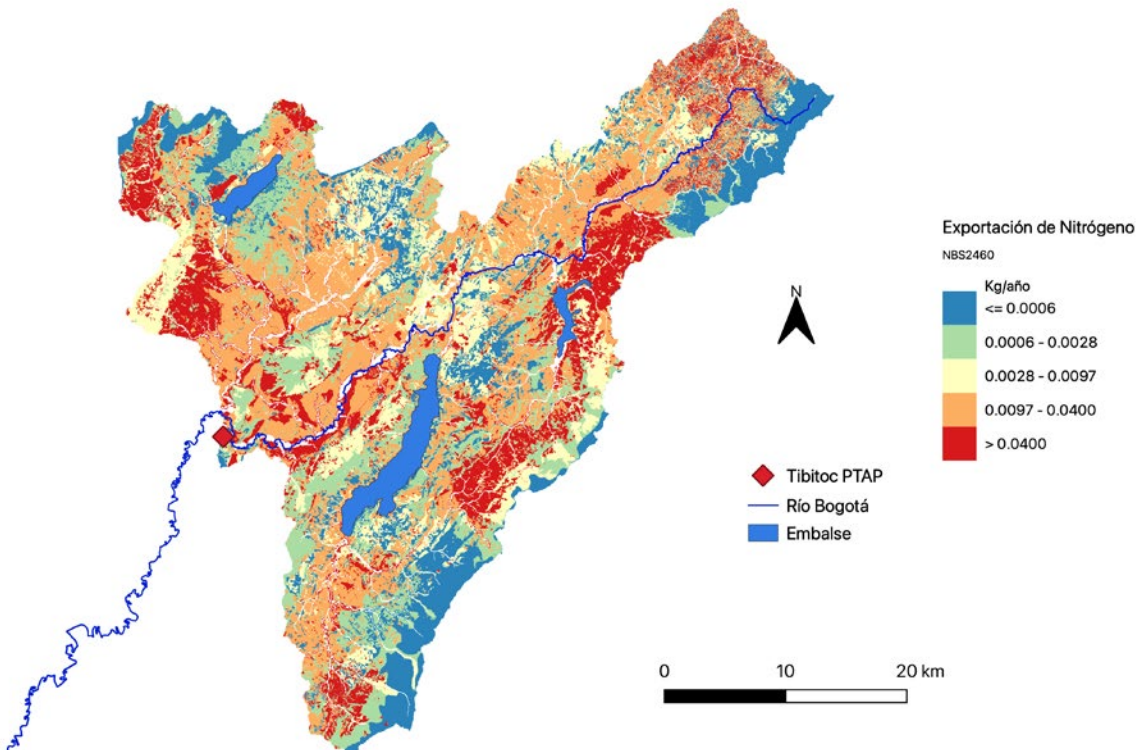
El cambio de uso del suelo ocasionado por el hombre, y en particular su transformación para la agricultura, altera significativamente el ciclo natural de los nutrientes (Sharp et al. 2016). La dinámica natural de los nutrientes se agrava por una serie de fuentes antropogénicas puntuales (como los vertimientos industriales) y fuentes no puntuales de nutrientes (como los fertilizantes a base de nitrógeno), que son transportados a través de la cuenca por las precipitaciones y otros flujos de agua (Sharp et al. 2016).

FIGURA 5 | Reducción de sedimentos y nitrógeno del NBS2460 en 30 años



Fuentes: Los cálculos del autor se basan en las reducciones porcentuales previstas de sedimentos y nitrógeno en Tibitoc, según el modelo InVEST, y el patrón de la trayectoria temporal de los impactos acumulados basado en Poorter et al. (2016).

FIGURA 6 | Resultados del modelo de exportación de nitrógeno para NBS2460



Fuente: Autores.

En la cuenca alta del río Bogotá, las actividades de conservación y restauración que promueven la cobertura vegetal natural y se complementan con obras biofísicas específicas, reducirían la exportación de nutrientes, al retener o degradar los contaminantes. Las buenas prácticas agrícolas, relacionadas con el uso de agroquímicos y la planificación de la fertilización, también reducen la cantidad de nutrientes vertidos en insumos agrícolas como los nitratos y la materia orgánica, que han aumentado notablemente en el 2019. Por lo tanto, teniendo en cuenta que hay efectos de captura de nutrientes en la parte alta de la cuenca, las actividades que inducen reducciones en los vertidos de nutrientes y la escorrentía reducirían los niveles de nutrientes en el punto de captación de agua de Tibitoc.

Intervenciones específicas en áreas prioritarias reducirían potencialmente el nitrógeno total exportado desde la cuenca a Tibitoc en un 3% para el año 30 (Figuras 5 y 6, y ver Apéndice B para más detalles técnicos).

PASO 4: VALORACIÓN DE COSTOS Y BENEFICIOS

La infraestructura natural costaría \$5,3 millones de dólares a lo largo de 30 años.

La infraestructura natural requeriría \$5,3 millones de dólares teniendo en cuenta todas las inversiones iniciales, los costos de transacción, el mantenimiento y los costos de oportunidad (Tabla 5). Las inversiones iniciales representan casi dos tercios de todos los costos (65%), seguidas del mantenimiento (20%), los costos de oportunidad (9%) y los costos de transacción (6%). Estos costos de intervención se basan en el número de hectáreas de cada actividad y en los perfiles detallados de costos por hectárea de CI Colombia, que se desarrollaron tras una amplia experiencia de aplicación y participación local de estas soluciones en la zona de estudio.

Las inversiones iniciales incluyen todos los insumos (como plántulas, plantaciones y fertilizantes), mano de obra, transporte, maquinaria y equipo, y el apoyo técnico especializado necesario durante el horizonte de inversión. Se parte de la base de que estas inversiones iniciales tienen lugar inmediatamente (es decir, en el año 0).

Los costos de transacción son los gastos previstos para llevar a cabo las inversiones, como la divulgación y la participación de los titulares de las tierras, y están calculados como porcentaje de los costos directos de inversión.

Los costos de mantenimiento incluyen todos los mantenimientos necesarios durante el periodo de inversión, incluidos los insumos y la mano de obra para la replantación periódica, la fertilización, la maquinaria, el equipo, el transporte y el apoyo técnico especializado. Estos costos de mantenimiento se acumulan durante un periodo máximo de tres años para cada actividad (años 1, 2 y 3).

Los costos de oportunidad, definidos como los beneficios potenciales a los que se renuncia por participar en actividades de infraestructura natural, se basan en cálculos de productividad de la tierra en la cuenca del río Bogotá (USAID, 2021). En cuanto a la restauración hacia actividades silvopastoriles sostenibles, se consideran los costos de oportunidad de la producción de leche en \$380 dólares anuales por hectárea. Para todas las actividades, se incluyen los costos de oportunidad durante tres años para que coincidan con el plazo necesario para consolidar las inversiones (años 0, 1 y 2). Para las actividades silvopastoriles, se incluye el 20% del costo de oportunidad porque se espera que los productores sólo destinen el 10% de sus tierras a la restauración ecológica y, por lo tanto, asumirían sólo una pequeña fracción de los beneficios no percibidos en su transición a actividades productivas sostenibles. Es decir, se asume que los propietarios de las tierras soportan los costos de oportunidad durante tres años al dedicarse a actividades silvopastoriles. Una vez transcurrido el periodo de tres años, los sistemas se recuperan y acaban superando los niveles de productividad del sistema original. No se incluyen los costos de oportunidad de los núcleos de restauración ni de la protección de nacimientos en ecosistemas estratégicos debido a que tienen lugar en zonas sujetas a restricciones ambientales del suelo y, por consiguiente, no se permiten otras actividades de uso de la tierra.

En cuanto a las actividades, los costos relacionados con los sistemas silvopastoriles sostenibles representan la gran mayoría de los costos de infraestructura natural (82%), seguidos por los núcleos de restauración en ecosistemas estratégicos (16%) (Tabla 6). Estos patrones de costos reflejan en general la proporción de áreas asignadas a cada

TABLA 5 | Costos de infraestructura natural por componente de costo para NBS2460

COMPONENTE	SUBCOMPONENTE	COSTOS (MILES DE DÓLARES)					COSTO POR HECTÁREA (COSTO PROMEDIO INCLUYENDO LAS 2.460 HA) (US\$)
		T=0	T=1	T=2	T=3	Total (% del total)	
Inversiones	1.1. Insumos: plántulas y semilleros	1,212				1,212	493
	1.2. Insumos: fertilizantes	411				411	167
	1.3. Insumos: cercado y otros	743				743	302
	1.4. Mano de obra	510				510	207
	1.5. Transporte	177				177	72
	1.6. Maquinaria y equipos	141				141	57
	1.7. Asistencia técnica	210				210	86
	Total (% del total)	3,405				3,405 (65%)	1,384
Transacción	2.1. Costos de transacción	300				300	122
	Total (% del total)	300				300 (6%)	122
Mantenimiento	3.1. Resiembra y fertilización: mano de obra e insumos		507	254	149	910	370
	3.2. Transporte		25	25	25	76	31
	3.3. Maquinaria y equipos		12	0	0	12	5
	3.4. Asistencia técnica		33	11	11	54	22
	Total (% del total)		577	291	185	1,053 (20%)	428
Costo de oportunidad	4.1. Producción lechera (sistemas silvopastoriles)		168	168	168	503	205
	Total (% del total)		168	168	168	503 (9%)	205
Costo total						5,261	2,138

Fuente: Autores.

actividad de inversión, aunque existen algunas variaciones de costos por hectárea entre las distintas actividades. En promedio, los costos de intervención por hectárea son de \$2.138 dólares y oscilan entre los \$1.975 dólares para los sistemas silvopastoriles sostenibles y los \$3.613 dólares para los núcleos de restauración.

La infraestructura natural reduciría significativamente los costos de tratamiento de agua en Tibitoc.

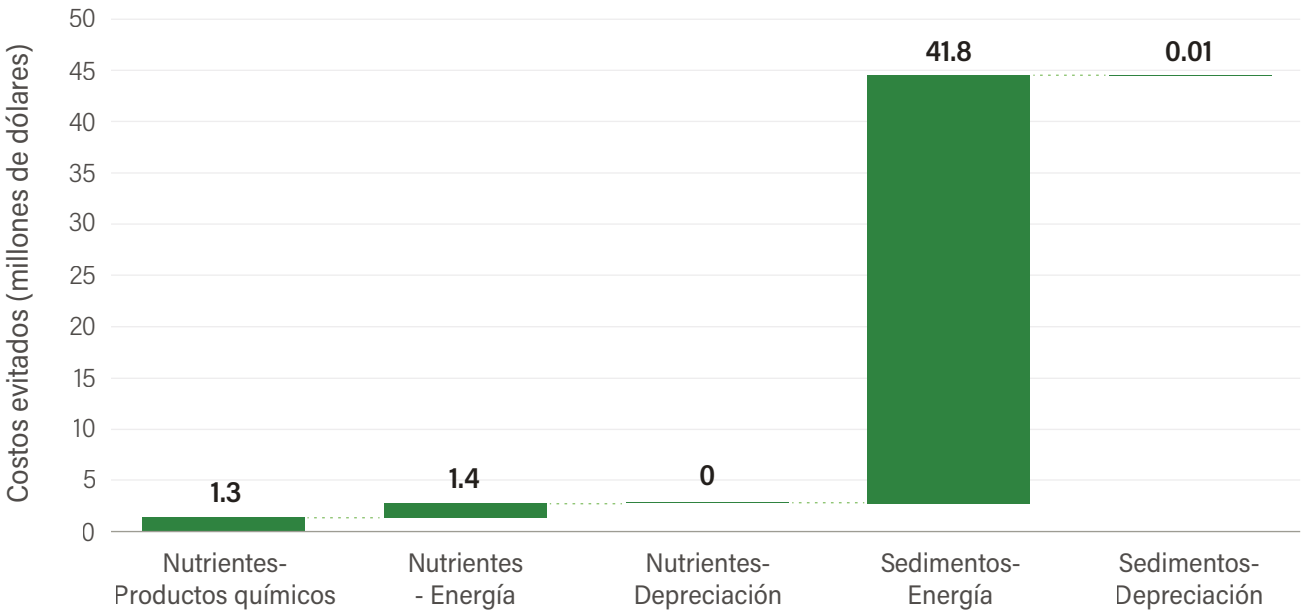
La infraestructura natural reduciría los costos de tratamiento de agua de Tibitoc en \$44,6 millones de dólares a lo largo de 30 años debido a las reducciones en energía, productos químicos y depreciación (Figura 7, y Apéndice C para los detalles técnicos). Este aspecto se detalla en la etapa 5.

TABLA 6 | Costos de infraestructura natural por actividad de inversión para el portafolio NBS2460

ACTIVIDAD DE INVERSIÓN	NÚMERO DE HECTÁREAS (% DEL TOTAL)	COSTO TOTAL (MILLONES DE US\$)	COSTO EN % DEL TOTAL	COSTO POR HECTÁREA (US\$)
Sistemas silvopastoriles sostenibles	2182 (89%)	4,3	82%	1975
Núcleos de restauración en ecosistemas estratégicos	237 (9%)	0,9	16%	3613
Protección de nacimientos en ecosistemas estratégicos	41 (2%)	0.1	2%	2,286
Total	2,460 (100%)	5.3	100.0%	2,138

Fuente: Autores.

FIGURA 7 | Costos totales evitados de NBS2460 en 30 años



Fuente: Autores.

Costos energéticos evitados

El tratamiento del agua requiere procesos que consumen mucha energía, como el bombeo y la distribución del agua por las instalaciones de la planta, la aplicación de productos químicos y el bombeo del agua hasta los puntos de vertido. Los costos energéticos derivados del tratamiento del agua representan casi la totalidad de los costos energéticos en Tibitoc (comentario personal, Rincón, 2022), que ascendieron a unos \$7,5 millones de dólares en 2020. Por lo tanto, la reducción de sedimentos y de contaminación del agua que llega a la planta de tratamiento puede reducir el consumo de energía, lo que se traduce en costos evitados.

El total de costos evitados en energía por el control de sedimentos y nutrientes ascenderían a \$43,2 millones de dólares a lo largo de 30 años, de los cuales \$41,8 millones se derivarían del control de sedimentos y \$1,4 millones del control de nitrógeno. Para calcular estos resultados, se estimó el porcentaje de los costos energéticos que están asociados con el tratamiento de sedimentos y nitrógeno, basándonos en la información histórica de Tibitoc (respectivamente, 4,5% y 0,2% de los costos energéticos totales). Posteriormente, se calcularon los cambios en los costos de energía teniendo en cuenta las reducciones

porcentuales esperadas en sedimentos y nutrientes asociados con la aplicación del portafolio de inversión. Para nuestro escenario de referencia, se asume que los costos reales de energía en Tibitoc aumentan con el tiempo a la misma tasa de crecimiento anual promedio experimentada entre 2010 y 2020, que fue del 6%⁴ (más información en el Apéndice C).

Costos evitados de los productos químicos

La potabilización para el consumo de agua en las plantas de tratamiento implica la aplicación de productos químicos en diferentes etapas del proceso de tratamiento, incluyendo la floculación (eliminación de grandes aglomeraciones), la coagulación (eliminación de sólidos en suspensión), la desinfección (eliminación o reducción de patógenos), la alcalinización (disminución de las cantidades de ácido) y la oxidación (obtención de oxígeno). En Tibitoc, se aplican dosis específicas de productos químicos dependiendo del nivel de varios contaminantes del agua, como el amonio, la materia orgánica, la alcalinidad, el pH y el manganeso. En 2020, los productos químicos aplicados en grandes dosis en Tibitoc incluían sulfato de aluminio y policloruro (coagulantes), cloro (desinfectante) y cal (alcalinizante). La reducción de la contaminación del agua que llega a la depuradora reduce la necesidad de productos químicos, lo que representa costos evitados.

La reducción de los costos de los productos químicos derivados del control de nutrientes ascendería a \$1,3 millones de dólares en 30 años. Estas cifras se obtuvieron comparando los costos actuales de tratamiento del agua en Tibitoc respecto a los costos esperados asociados con un escenario de inversión en el que se reduzcan significativamente los niveles de sedimentos y nutrientes que llegan a Tibitoc. Los cálculos de los costos actuales y previstos así como de los costos evitados se basaron en las dosis actuales de productos químicos en Tibitoc para tratar el nitrógeno, los indicadores históricos de la calidad del agua y los precios actuales de los productos químicos. Dado que Tibitoc no aplica actualmente productos químicos para tratar los sedimentos directamente, todo el ahorro de costos estimado procede de la reducción de nutrientes.

Un punto fuerte de este análisis fue la construcción de un modelo que relaciona los niveles de calidad del agua y los costos de tratamiento del agua, que fue desarrollado por designación por un equipo altamente especializado de IAN Consultores (IAN Consultores, 2022; ver Apéndice C).

Este modelo se desarrolló con datos de calidad del agua en Tibitoc para 1998-2014 y 2019-2021, proporcionados por la EAAB. El modelo también utilizó como entradas las dosis específicas de productos químicos aplicados en Tibitoc dependiendo del nivel de varios contaminantes del agua, incluyendo amonio, materia orgánica, alcalinidad, pH y manganeso. Por último, el modelo consideró la cantidad y los costos de los productos químicos aplicados en Tibitoc para tratar el agua, incluidos el sulfato de aluminio y el policloruro (coagulantes), el cloro (desinfectante) y la cal (alcalinizante). Dado que Tibitoc no utiliza productos químicos específicos para tratar los sedimentos, el control de los sedimentos se excluye de este análisis. A partir de estos datos, se desarrolló una “calculadora de costos de productos químicos” con el fin de obtener los costos de los productos químicos para diferentes niveles de calidad del agua.

Este modelo nos permitió calcular estimaciones fiables y específicas del contexto de los posibles costos evitados en Tibitoc como resultado del control de nutrientes de las actividades del portafolio.

Costos de depreciación evitados

La presencia de sedimentos y de contaminantes del agua puede provocar el desgaste de los equipos e instalaciones de bombeo, recolección y tratamiento del agua, que con el tiempo necesitan ser sustituidos o reparados. La reducción de los sedimentos y contaminantes del agua puede reducir de este modo la depreciación de los equipos en Tibitoc.

La reducción de los costos de depreciación alcanzaría un total de \$6.600 dólares en 20 años, con \$5.800 dólares resultantes del control de sedimentos y \$800 dólares resultantes del control de nitrógeno (ver Apéndice C). Para calcular estos resultados, se recopiló información sobre el valor actual de la infraestructura en Tibitoc directamente relacionada con el tratamiento del agua en 2021 y las prácticas contables de depreciación utilizadas por la EAAB para la infraestructura, que incluye un método de depreciación lineal con un valor de rescate de cero y una vida útil de 50 a 70 años. Luego se calculó cómo los costos de depreciación asociados con el valor actual de la infraestructura en Tibitoc para el tratamiento de agua se verían impactados dadas las reducciones porcentuales esperadas en sedimentos y nitrógeno de las inversiones en infraestructura natural.

Otros costos evitados no incluidos

Si bien los otros estudios anteriores en Brasil que utilizaron la metodología GGA incluyeron costos de dragado evitados (Ozment et al. 2018; Feltran-Barbieri et al. 2021), estos no son relevantes en el contexto de Tibitoc debido en gran parte a que el gran tamaño (54 ha) de la dársena de sedimentación antes de la planta ha permitido que los sedimentos se contengan antes del bombeo de agua, reduciendo así la necesidad de dragado periódico. Además, los niveles de turbiedad son relativamente bajos en Tibitoc, con un promedio de 12,2 unidades nefelométricas de turbiedad (NTU) para 2019-2022. Sin embargo, la inversión en NBS2460 podría eventualmente reducir los costos si la saturación de la dársena de sedimentación en los próximos años requiere un dragado no periódico.

PASO 5: COMPARACIÓN DE COSTOS Y BENEFICIOS

La infraestructura natural proporcionaría un beneficio financiero neto a Tibitoc.

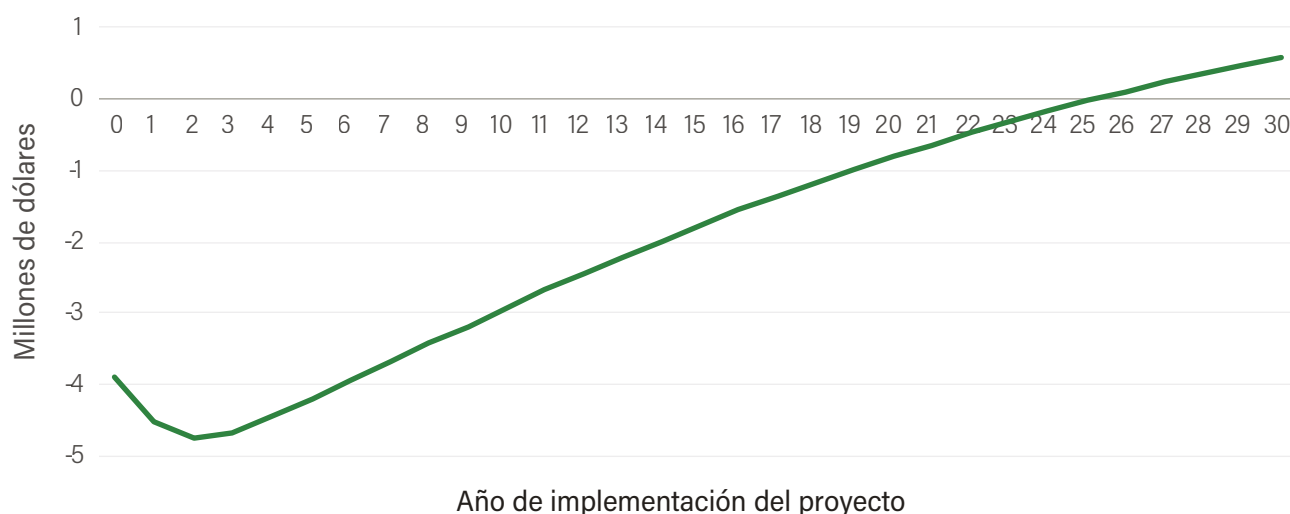
Los resultados revelan que una inversión específica en NBS2460 podría ser financieramente viable para Tibitoc. El portafolio arroja un VAN positivo con un periodo de recuperación de la inversión de 25 años (ver Recuadro 1, Figura 8). Como se muestra en la figura 8,

los portafolios de inversión necesitan mucho tiempo para ser rentables porque todos los costos de inversión tienen lugar en los tres primeros años, mientras que los beneficios tardan en acumularse.

Las inversiones en infraestructura verde son una solución viable para el manejo de agua

En general, estos resultados muestran que la infraestructura natural puede complementar de forma costo efectiva a la infraestructura tradicional para el control de sedimentos y nutrientes con el fin de mejorar la calidad del agua en la cuenca del río Bogotá. A pesar de que la atención se ha centrado en el ahorro inmediato en el tratamiento del agua en Tibitoc, estas inversiones también podrían dar lugar a una gama más amplia de beneficios adicionales ecológicos y socioeconómicos asociados al portafolio de inversión. Tal y como sugieren experiencias anteriores con proyectos de infraestructura natural, otros beneficios adicionales pueden incluir la adaptación al cambio climático y su mitigación, la captura de carbono, la conservación de la biodiversidad y los ecosistemas, los servicios culturales y recreativos, así como la mejora de los medios de vida locales (Ozment et al. 2021; Seymour et al. 2022). La conclusión de que la infraestructura natural puede ser una solución viable para la gestión del agua en la cuenca alta del río Bogotá también coincide con la necesidad y la oportunidad de invertir en alternativas a Chingaza para diversificar las fuentes de agua disponibles para la ciudad de Bogotá (Peña Guzman et al. 2016).

FIGURA 8 | Flujo de caja libre acumulado de los portafolios de inversión NBS2460 a lo largo de 30 años



Fuente: Autores.

PASO 6: ABORDANDO EL RIESGO Y LA INCERTIDUMBRE

Los resultados muestran que invertir en infraestructura natural es una alternativa financieramente viable para Tibitoc. Sin embargo, es crucial identificar qué tan sólidos son estos resultados si se modifican los supuestos clave, y reconocer que las fuentes de incertidumbre pueden influir en el rendimiento del portafolio (Manski, 2019). A continuación, se ofrece un análisis detallado para dos variables clave: la tasa de descuento aplicada y las condiciones de calidad del agua.

La aplicación de una tasa de descuento similar a la de otras empresas de agua en América Latina produciría beneficios netos mucho mayores.

Nuestra elección de una tasa de descuento del 12,28% corresponde a la WACC utilizada en la EAAB para evaluar la viabilidad financiera de los proyectos de infraestructura. No obstante, esta tasa de descuento es mucho más elevada que la utilizada para plantas de agua y proyectos de infraestructura similares en Colombia y otros países, así como la tasa de descuento social propuesta para Colombia. Por tanto, es posible financiar este proyecto a un porcentaje de descuento inferior, teniendo en cuenta la creación de valor esperado en términos financieros, tal como se ha descrito aquí, así como otros posibles beneficios sociales y medioambientales adicionales.

Por ello, se ha calculado la rentabilidad financiera del portafolio para una gama más amplia de tasas de descuento (Tabla 7). Este análisis revela que el rendimiento

del portafolio aumentaría notablemente si la EAAB pudiera financiar proyectos de infraestructura natural a un menor costo.

El deterioro de los niveles de calidad del agua en toda la cuenca representa un riesgo importante para Tibitoc, creando así una mejor oportunidad de negocio para la infraestructura natural.

Nuestro análisis considera un escenario base de niveles constantes de calidad del agua en toda la cuenca durante el periodo de inversión en su estado actual. Sin embargo, la cuenca puede sufrir un deterioro de la calidad del agua en el futuro si aumentan los vertimientos industriales, agrícolas y urbanos, y si se aceleran los cambios en el uso del suelo y el deterioro de los ecosistemas. Este escenario es posible en el futuro, teniendo en cuenta las elevadas tasas históricas de cambios en el uso y la cobertura del suelo. Por ejemplo, a partir 2015 los bosques nativos disminuyeron a una tasa anual de 1,54%, mientras que las tierras agrícolas aumentaron a una tasa anual de 0,83% en la cuenca alta del río Bogotá (Cortés Sánchez, 2018). Además, los niveles de calidad del agua en la captación de Tibitoc han presentado menor calidad y mayor volatilidad en indicadores clave en los últimos años (Figura 8).

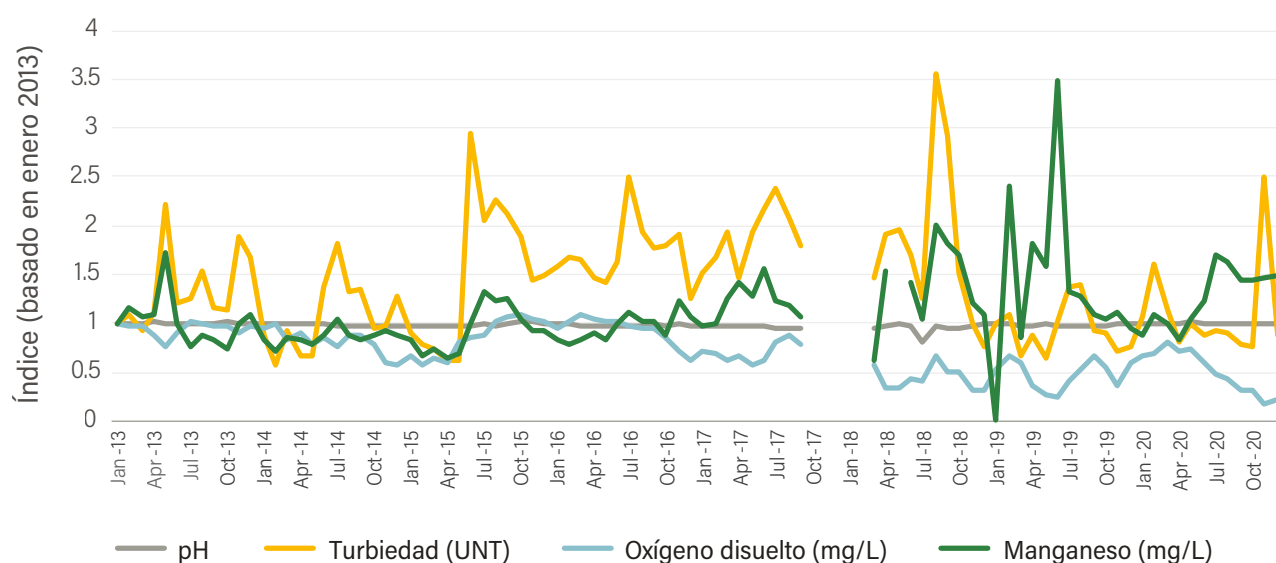
El deterioro de la calidad del agua generaría costos adicionales para Tibitoc debido al aumento de las necesidades de tratamiento del agua, lo que justificaría en mayor medida la inversión en infraestructura natural. A modo de ejemplo, la figura 9 muestra que el NBS2460 generaría costos adicionales evitados de \$2,7 millones de dólares (descontados \$0,7 millones de dólares) por la reducción de productos químicos en condiciones de deterioro de la calidad del agua en Tibitoc, en comparación

TABLA 7 | Resultados financieros de NBS2460 con distintos tipos de descuentos

ESCENARIO	FUENTE DE LA TASA DE DESCUENTO	TASA DE DESCUENTO APLICADA	DETALLE	ROI (%)	VPN (MILLONES US\$)
Tasa actual de descuento en la EAAB	EAAB (Bogotá, Colombia)	12,28%	WACC aplicado en la EAAB a los proyectos de infraestructura	12%	0,6
Tasas alternativas de descuento	Banco Interamericano de Desarrollo (BID), Banco Mundial y otros inversores del sector hídrico en América Latina.	12%	Los inversores del sector hídrico en América Latina recomiendan una tasa de descuento del 12% para los proyectos de infraestructura pública de agua ^a	16%	0,8
	Fondo Monetario Internacional	5%	Tasa social de descuento en Colombia para 2021 ^b	227%	11,7

Notas: ^a Feltran-Barbieri et al. 2021; Fontanele y Vasconcelos, 2006.
^b Tasas recopiladas a partir de los datos del CEIC ("Colombia CO: Discount Rate: End of Period from 1964 to 2021").
Fuente: Autores.

FIGURA 9 | Niveles históricos de calidad del agua en la captación de Tibitoc para indicadores clave



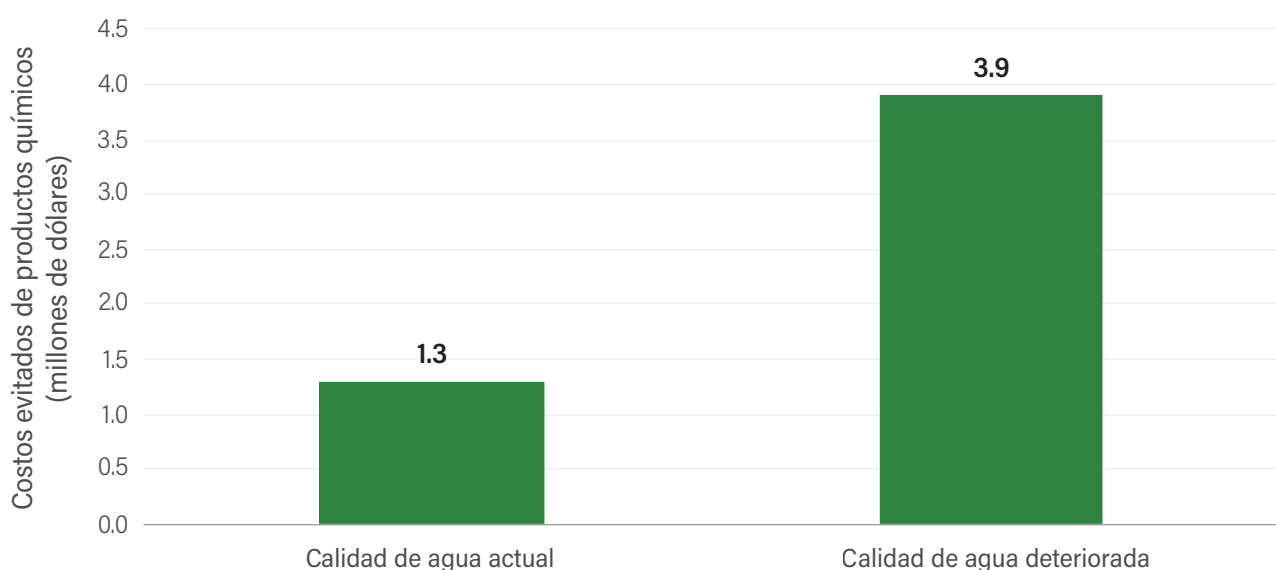
Nota: El índice de comparación fue creado tomando como base enero de 2013. Las observaciones se basan en promedios mensuales. Calidad de agua no disponible para el periodo de octubre de 2017 a febrero de 2018.

Fuentes: Autores, con información histórica sobre la calidad del agua en Tibitoc proporcionada por la EAAB.

con las condiciones actuales. Estos costos adicionales evitados darían como resultado un ROI del 21% y un VPN de \$1,1 millones de dólares, frente a los resultados financieros del NBS2460 de un ROI del 12% y un VPN de \$0,6 millones de dólares. No obstante, se observa que, aunque el portafolio de inversión en infraestructura natural

propuesto es adecuado para el control de sedimentos y nutrientes en Tibitoc, puede que no aborde necesariamente otros contaminantes problemáticos de los vertidos industriales y urbanos, como los metales pesados. Estos tipos de contaminantes pueden requerir otros mecanismos de control, incluida la regulación.

FIGURA 10 | Costos evitados de productos químicos según las condiciones actuales y deterioradas de la calidad del agua para el NBS2460



Notas: Los niveles actuales de calidad del agua se basan en valores promedio o medianos de manganeso, oxígeno disuelto, pH, temperatura, amoníaco, hierro y sólidos suspendidos totales en Tibitoc para 2019-2022. Los niveles de calidad del agua deteriorados se basan en valores altos/bajos para contaminantes y oxígeno disuelto durante 2019-2022.

Fuente: Autores.





CAPÍTULO 3

Siguientes pasos

Este informe presenta los resultados de un portafolio de inversión en infraestructura natural que controla de manera costo efectiva la carga de sedimentos y la contaminación de nutrientes en la cuenca alta del río Bogotá. Este capítulo describe análisis adicionales que podrían mejorar la confiabilidad de los resultados de este estudio y respaldar la formulación de oportunidades de inversión. También detalla los pasos en la toma de decisiones locales que pueden ayudar a catalizar la acción y la colaboración hacia la infraestructura natural para el manejo de agua en Bogotá.



Este informe demuestra que invertir en infraestructura natural podría ser costo-efectivo para la EAAB en el manejo de la contaminación de nutrientes y la carga de sedimentos en la cuenca alta del río Bogotá. Un análisis más profundo podría mejorar la fiabilidad de los resultados de este estudio y apoyar la creación de una oportunidad de inversión para la EAAB y sus aliados financieros. A continuación, se consideran los siguientes pasos para el análisis:

- **Desarrollar nuevos análisis con proyecciones más sólidas de la cobertura y el uso del suelo, la hidrología y las condiciones climáticas futuras.** Tal y como se ha indicado anteriormente, se ha adoptado un escenario de referencia en el que estas condiciones se mantienen constantes en su estado actual en toda la cuenca, excepto en las áreas en las que se llevan a cabo las intervenciones. El desarrollo de nuevos análisis bajo diferentes supuestos de las trayectorias de cambio de uso del suelo, hidrológicas y climáticas proporcionaría una comprensión más sólida de la rentabilidad esperada del portafolio de inversión bajo diferentes escenarios y la probabilidad de cada uno de ellos. También podría ayudar a identificar las regiones geográficas en las que existen riesgos potenciales para la implementación, lo que podría ayudar a desarrollar estrategias de mitigación de riesgos, como volver a ejecutar modelos de priorización espacial basados en el potencial esperado para el control de sedimentos. El desarrollo de estos análisis requeriría la recopilación de información histórica sobre el uso de la tierra, la hidrología y el clima en toda la cuenca, y el desarrollo de diferentes escenarios bajo distintos supuestos.
- **Identificar y desarrollar estrategias locales de implementación.** Entre los aspectos clave que merecen un examen más detenido para apoyar la preparación de una fase de implementación del portafolio de inversión cabe citar los siguientes:

- Estimar el número de beneficiarios en la zona de inversión.
- Comprender la disposición de los propietarios de tierras y las comunidades locales a participar en actividades de infraestructura natural.
- Validar los supuestos relacionados con la adopción de prácticas agrícolas y de conservación alternativas, así como los costos de oportunidad.
- Perfeccionar las estimaciones sobre los costos de transacción previstos y las posibles fuentes de financiación.
- Identificar posibles asociaciones institucionales para involucrar a las comunidades.

Esta información sería útil para determinar qué propietarios de tierras y comunidades están dispuestos y son capaces a participar en actividades de infraestructura natural, lo que a su vez podría ayudar a perfeccionar las áreas prioritarias en torno a la viabilidad de la implementación de las mismas. Esta información podría recopilarse mediante encuestas, talleres o un proyecto piloto de aplicación con los propietarios de tierras en las áreas prioritarias.

- **Recopilar más información sobre los vínculos entre la infraestructura natural y el control de la erosión.** Nuestras estimaciones de control de la erosión, se basaron en las estimaciones de Poorter et al. (2016) en bosques secundarios neotropicales, lo que coincide con estudios previos basados en ecosistemas de páramo que apoyan la capacidad de la vegetación natural en estos ecosistemas para el control de sedimentos (Harden, 1993). La observación directa o la estimación del potencial para el control de la erosión en la cuenca alta del río Bogotá, por ejemplo a través de una intervención piloto para recopilar datos empíricos,

podría proporcionar más evidencia de estas dinámicas en el área de inversión objetivo, lo que arrojaría estimaciones más exactas.

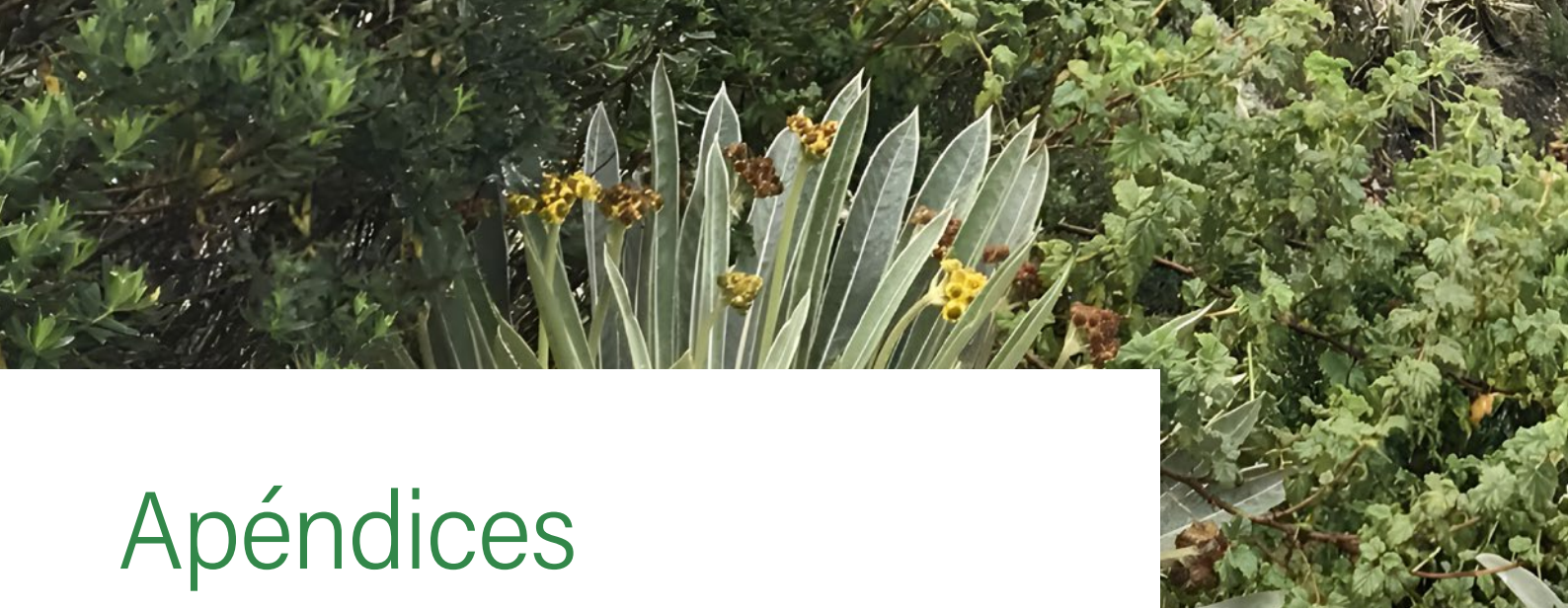
- **Explorar oportunidades de financiación mixta entre múltiples partes.** Teniendo en cuenta los intereses de la financiación climática, los donantes son otros beneficiarios posibles de las actividades de infraestructura natural en la cuenca. Por lo tanto, un siguiente paso podría ser evaluar los costos y beneficios de múltiples partes para fundamentar el diseño de un instrumento de financiación combinada para ampliar la intervención a escala de toda la cuenca. Las experiencias en otros lugares ofrecen ejemplos de las diferentes opciones internas a disposición de las empresas de servicios públicos para financiar la infraestructura natural, incluidos los presupuestos generales de funcionamiento, los cambios en las tarifas u otras medidas (Ozment et al. 2016). Otras fuentes externas de financiación son los bonos verdes (Marsters et al. 2021) y los préstamos con bancos multilaterales de desarrollo como el Banco Mundial o el Banco Interamericano de Desarrollo. También existen oportunidades más amplias para cofinanciar infraestructura natural con otras empresas, organismos gubernamentales o donantes interesados en promover este tipo de soluciones. Los siguientes pasos podrían ayudar a fomentar este tipo de colaboraciones: identificar el conjunto de partes interesadas que operan en la región, comprender las necesidades e intereses individuales y colectivos de las partes interesadas, desarrollar procesos para promover la colaboración entre varias partes y el compromiso institucional, y explorar oportunidades de financiación. En cuanto al primer paso, las partes interesadas identificadas hasta ahora incluyen la empresa local de servicios públicos encargada del suministro de agua (EEAB) and for “EAAB, autoridades ambientales regionales como la CAR, gobiernos regionales y locales, comunidades, propietarios de tierras, sector privado, organizaciones no gubernamentales, así como CI Colombia y otras organizaciones sociales que promueven la sostenibilidad.
- **Evaluar los beneficios adicionales asociados al portafolio de inversión.** Los beneficios adicionales previstos más allá de la gestión del agua podrían incluir los medios de subsistencia y el bienestar de las comunidades, el control de las inundaciones, la adaptación al cambio climático, la captura de carbono y la mitigación del cambio climático, así como la

conservación de la biodiversidad y los ecosistemas. La evaluación de estos beneficios adicionales exigirá la recopilación de datos primarios y/o secundarios pertinentes y la elaboración de estimaciones sobre los cambios previstos como consecuencia de la aplicación del portafolio de inversión.

Usos de este análisis en la toma de decisiones locales

Los resultados de este estudio podrían servir como catalizador para la acción y la colaboración en pro de una infraestructura natural destinada al manejo del agua en Bogotá. Estos resultados pueden utilizarse a escala local para:

- **Obtener apoyo para los enfoques de manejo del agua basados en inversiones en infraestructura natural dentro de la EAAB.** Los resultados destacan el papel estratégico que pueden desempeñar las inversiones en infraestructura natural para abordar los retos actuales y futuros de la gestión del agua en Bogotá. La protección de una cuenca hidrográfica sana no sólo puede reducir los costos operativos de Tibitoc, sino que también puede desempeñar un papel clave en la diversificación de las fuentes de agua, garantizando el suministro de agua para las crecientes poblaciones urbanas y sirviendo de escudo contra las posibles amenazas provocadas por el cambio climático y los fenómenos meteorológicos extremos asociados, como las sequías y las inundaciones. A medida que aumentan las presiones sobre los sistemas hídricos de Bogotá debido a la actividad humana, el cambio climático y otros factores, la EAAB puede utilizar la metodología y los resultados de este estudio para fomentar el apoyo a la infraestructura natural como un enfoque eficaz y complementario a la infraestructura gris para mantener la calidad del agua y el suministro de agua.
- **Catalizar la colaboración y los acuerdos institucionales entre las principales partes interesadas para aprovechar la oportunidad de invertir en infraestructura natural.** Al demostrar los valores estratégicos de la infraestructura natural para la gestión del agua en Bogotá, se considera que los resultados de este estudio pueden ayudar a catalizar la colaboración y la creación de acuerdos institucionales entre las principales partes interesadas de la cuenca alta del río Bogotá para aprovechar la oportunidad de invertir en infraestructura natural.

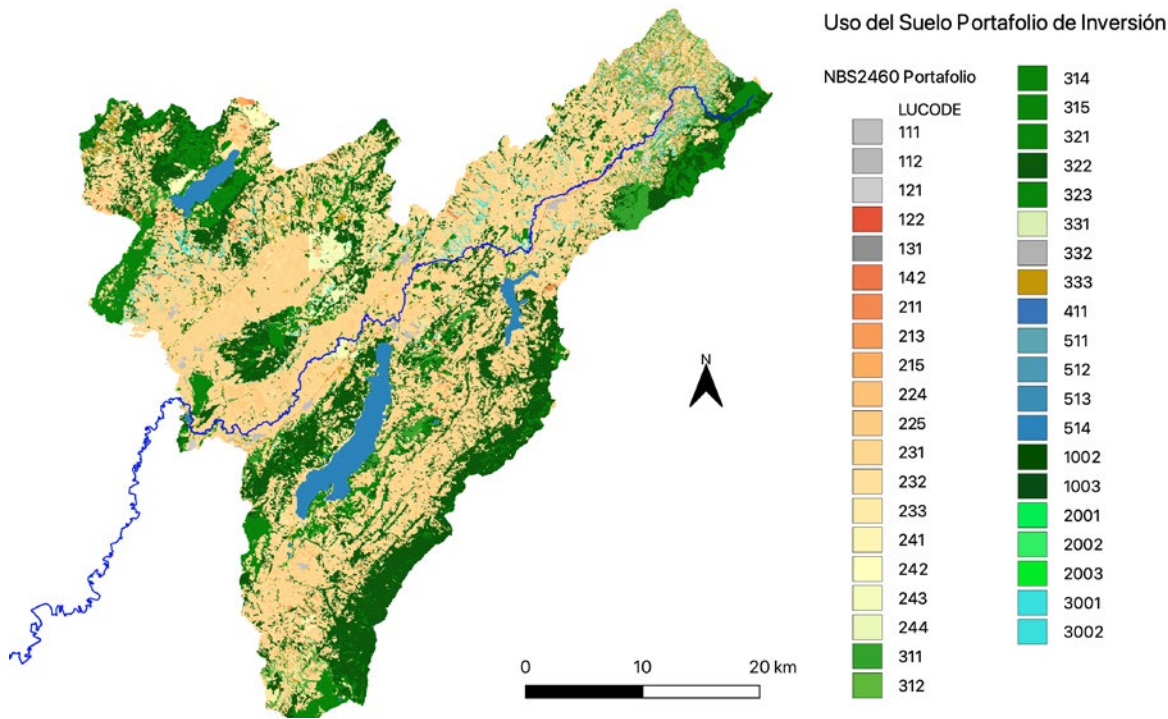


Apéndices

APÉNDICE A. DEFINICIÓN DE LAS NORMAS DE APLICACIÓN PARA LAS ACTIVIDADES DE INVERSIÓN EN INFRAESTRUCTURA NATURAL

Una vez identificadas las actividades de inversión en infraestructura natural para formar parte de un portafolio (ver Tabla 2), se siguió un doble enfoque para definir las reglas de implementación de cada actividad en la cuenca alta del río Bogotá. En primer lugar, se identificó el uso actual/clasificación de la cobertura en la cuenca alta del río Bogotá con base en el POMCA 2019 (Figura 2, Tabla A1).

FIGURA A1 | Portafolio de inversión clasificación actual del uso/cobertura del suelo



Fuente: Autores, a partir de modificaciones del POMCA 2019.



TABLA A1 | Códigos de uso del suelo

LUCODE	LULC_DESC
111	Tejido urbano continuo
112	Tejido urbano discontinuo
121	Zonas industriales o comerciales
122	Red vial ferroviaria y terrenos asociados
125	Obras hidráulicas
131	Zonas de extracción minera
142	Instalaciones recreativas
211	Cereales
213	Oleaginosas y leguminosas
215	Tubérculos
223	Oleaginosas y leguminosas
224	Cultivos agroforestales
225	Cultivos confinados
231	Pastos limpios
232	Pastos
233	Pastos enmalezados
241	Mosaico de cultivos
242	Mosaico de pastos y cultivos
243	Mosaico de cultivos pastos y espacios naturales
244	Mosaico de pastos con espacios naturales
245	Mosaico de cultivos con espacios naturales
311	Bosque denso
312	Bosque abierto
314	Bosque de galería y ripario
315	Plantacion forestal

LUCODE	LULC_DESC
321	Herbazal
322	Arbustal
323	Vegetación secundaria o en transición
325 or 1001	Páramo
331	Zonas arenosas naturales
332	Afloramientos rocosos
333	Tierras desnudas y degradadas
411	Zonas pantanosas
413	Vegetación acuática sobre cuerpos de agua
511	Cuerpos de agua naturales
512	Lagunas, lagos y ciénagas naturales
513	Canales
514	Cuerpos de agua artificiales
1002	Subpáramo
1003	Bosque altoandino
2001	Páramo_Res
2002	Subpáramo_res
2003	Bosque altoandino_res
3001	Agroforestería
3002	Silvopastoril

Fuente: Autores.

A partir de esta clasificación, se aplicaron los siguientes criterios de inclusión y exclusión para cada una de las actividades de inversión del portafolio:

■ Sistemas silvopastoriles sostenibles:

- Excluir áreas bajo protección ambiental legal y clasificadas como páramos por el Instituto Humboldt.
- Si la pendiente es inferior a 18 grados, transformar a sistemas silvopastoriles.

■ Núcleos de restauración y protección de nacimientos en ecosistemas estratégicos:

- Incluir zonas bajo protección ambiental legal (311, 314, 315, 321, 322, 323, 325).
- Incluir áreas catalogadas como páramos por el Instituto Humboldt.

- No se incluyó la clasificación 312 (bosque abierto) debido a que no corresponde a vegetación natural.
- Incluir áreas no sometidas a uso agropecuario y tampoco definidas bajo conservación.
- Incluir áreas ubicadas a menos de 500 metros de páramos y que no estén bajo protección ambiental.
- Incluir las áreas situadas a más de 2200 metros sobre el nivel del mar que no estén bajo uso agrícola.
 - Si la elevación es superior a 3500 metros, restaurar a páramos.
 - Si la elevación es de 2800-3499 metros, restaurar a subpáramos.
 - Si la elevación es de 2200-2799 metros, restaurar al bosque altoandino.

Estos criterios de inclusión y exclusión funcionaron como reglas de conversión desde el uso/cobertura del suelo de la línea de base hacia el uso/cobertura del suelo alternativo relacionado con cada actividad del portafolio (Figura A1, Tabla A1). Por ejemplo, según los criterios de los sistemas silvopastoriles sostenibles, "Pastos" se convertiría en "Silvopastoril" en la línea de base. El impacto de esta conversión en el control de sedimentos y nutrientes se modeló como se detalla en el Apéndice B. Este enfoque doble nos permitió establecer qué actividades podrían llevarse a cabo en la cuenca, que se utilizaron posteriormente como insumo para la modelación biofísica (detallada en el Apéndice B).

APÉNDICE B. MÉTODOS E HIPÓTESIS PARA LA MODELACIÓN BIOFÍSICA

Se aplicaron los modelos InVEST para estimar el potencial de control de sedimentos y nutrientes de las inversiones en infraestructura natural.

Modelo de exportación de sedimentos

InVEST cuenta con un modelo de regulación de sedimentos que pretende identificar la ubicación de las fuentes de erosión del suelo así como la acumulación y distribución de

sedimentos a través de los principales ríos y arroyos. A partir de esa información espacial, se puede determinar la generación y retención de sedimentos por parte de la vegetación y los ecosistemas naturales. Para calcular la regulación de los sedimentos en la cuenca se utilizó el Modelo de Regulación de Sedimentos de InVEST, que requiere información inicial de buena calidad y buena resolución. El modelo calcula la carga anual de sedimentos transportados en la cuenca, a partir de la información indicada en el cuadro B1.

El modelo se basa en la ecuación universal de pérdidas de suelo, representado por la cantidad de pérdida de suelo del pixel i , ($usle_i$), que está dada por la siguiente ecuación (USLE):

$$usle_i = R_i \times K_i \times LS_i \times C_i \times P_i$$

Donde:

R_i = la erosividad de la lluvia en $MJ \times mm(ha \times hr)^{-1}$

K_i = la erodabilidad del suelo en $ton \times ha \times hr \times (MJ \times ha \times mm)^{-1}$

LS_i = el factor del gradiente longitudinal (*adimensional*)

C_i = el factor del cultivo (*adimensional*)

P_i = el factor de las buenas prácticas de uso (*adimensional*)

El factor de cultivo (factor-C) y el factor de buenas prácticas de uso (factor-P) se definieron para cada tipo de cobertura del suelo como se indica en la tabla B2.

TABLA B1 | Datos utilizados para el modelo de exportación de sedimentos

ENTRADA	DESCRIPCIÓN	FUENTE
Modelo digital de elevación	Archivo ráster con la elevación del terreno sobre el nivel del mar, resolución 12,5 m	ASF/ALOS-PALSAR; CI 2020
Uso del suelo	Archivo ráster con información sobre el uso del suelo	POMCA 2019; DCI 2021
Erosividad de la lluvia (r)	Archivo ráster con el índice de erosividad de cada píxel. Esta variable depende de la intensidad y duración de la lluvia en la zona de interés; a mayor intensidad y duración de la lluvia, mayor potencial de erosión.	CI 2020
Erodabilidad del suelo (k)	Archivo ráster con la erosionabilidad del suelo por píxel, que representa la medida de la susceptibilidad de las partículas del suelo para ser levantadas y transportadas por la lluvia y la escorrentía.	IGAC 2019; CI 2020

Nota: Estos insumos fueron tratados y modificados por CI Colombia.

Fuente: Autores.

TABLA B2 | Factores C y P para el modelo de exportación de sedimentos

CÓDIGO DE USO DEL SUELO	DESCRIPCIÓN	USLE_C	USLE_P
111	Tejido urbano continuo	0,01	1
112	Tejido urbano discontinuo	0,008	1
121	Zonas industriales o comerciales	0,008	1
122	Red vial ferroviaria y terrenos asociados	0,01	1
125	Obras hidráulicas	0,001	1
131	Zonas de extracción minera	0,5	1
142	Instalaciones recreativas	0,003	1
211	Cereales	0,2	1
213	Oleaginosas y leguminosas	0,2	1
215	Tubérculos	0,2	1
223	Oleaginosas y leguminosas	0,2	1
224	Cultivos agroforestales	0,01	1
225	Cultivos confinados	0,2	1
231	Pastos limpios	0,08	1
232	Pastos	0,08	1
233	Pastos enmalezados	0,08	1
241	Mosaico de cultivos	0,2	1
242	Mosaico de pastos y cultivos	0,15	1
243	Mosaico de cultivos pastos y espacios naturales	0,15	1
244	Mosaico de pastos con espacios naturales	0,01	1
245	Mosaico de cultivos con espacios naturales	0,01	1
311	Bosque denso	0,009	1
312	Bosque abierto	0,009	1
314	Bosque de galería y ripario	0,009	1
315	Plantación forestal	0,009	1
321	Herbazal	0,001	1
322	Arbustal	0,003	1
323	Vegetación secundaria o en transición	0,003	1
1001	Páramo	0,001	1
331	Zonas arenosas naturales	0,5	1
332	Afloramientos rocosos	0,4	1
333	Tierras desnudas y degradadas	0,5	1
411	Zonas Pantanosas	0,001	1
413	Vegetación acuática sobre cuerpos de agua	0,001	1
511	Cuerpos de agua naturales	0,001	1
512	Lagunas, lagos y ciénagas naturales	0,001	1
513	Canales	0,001	1

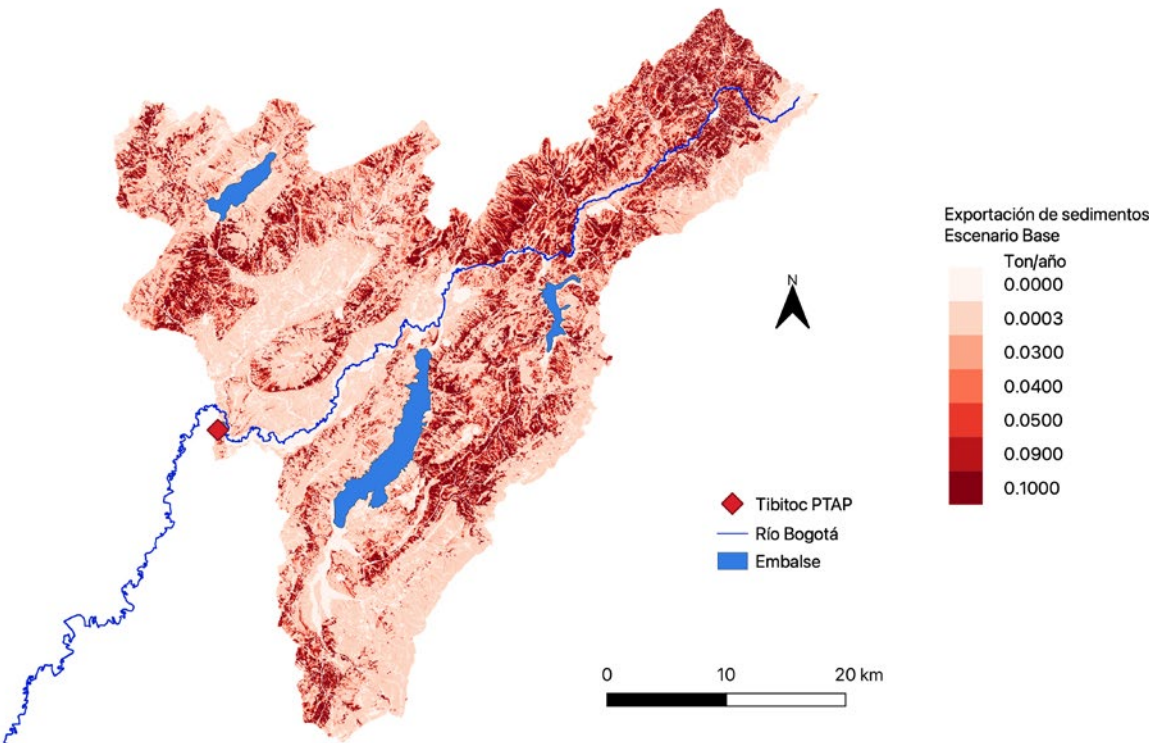
CÓDIGO DE USO DEL SUELO	DESCRIPCIÓN	USLE_C	USLE_P
514	Cuerpos de agua artificiales	0,001	1
1002	Subpáramo	0,003	1
1003	Bosque altoandino	0,003	1
2001	Páramo_Res	0,001	1
2002	Subpáramo_res	0,003	1
2003	Bosque altoandino_res	0,003	1
3001	Agroforestería	0,01	1
3002	Silvopastoril	0,009	1
5001	Agroforestería_páramo	0,01	1
5002	Silvoapastoril_páramo	0,009	1

Fuente: Autores.

Los resultados de ejecución del modelo actual de exportación de sedimentos en la cuenca alta del río Bogotá (Figura B1) evidencian una alta capacidad de exportación de sedimentos en la parte más alta de la cuenca, en los municipios de Villapinzón y Chocontá. Esto se debe a las características de alta capacidad de erosión del suelo presente en esta zona de la cuenca, así como las coberturas de suelo y uso predominantes de cultivos y pastos. Por

otro lado, la cuenca del río Checua genera una importante cantidad de sedimentos debido a la escasa cobertura vegetal y a las áreas de suelos sin vegetación y degradados (desertificación), lo cual acelera los procesos erosivos en esta zona de la cuenca. Otras áreas con alta exportación de sedimentos son las partes altas de las cuencas del embalse del Sisga, la zona oriental del embalse de Tominé

FIGURA B1 | Exportación de sedimento en el escenario base



Fuente: Autores.

TABLA B3 | Información empleada para el modelo de exportación de nutrientes

ENTRADA	DESCRIPCIÓN	FUENTE
Modelo digital de elevación	Archivo ráster con la elevación del terreno sobre el nivel del mar, resolución 12,5 m	ASF/ALOS-PALSAR; CI 2020
Uso del suelo	Archivo ráster con información sobre el uso del suelo	POMCA 2019; CI 2021
Mapa de la escorrentía directa por cuenca	Archivo ráster con la escorrentía directa generada por la cuenca. Se utilizó el mapa de flujo superficial generado con el modelo de rendimiento hídrico estacional desarrollado en InVEST.	CI 2020

Nota: Estos insumos fueron tratados y modificados por CI Colombia.
Fuente: Autores.

y la parte alta de la cuenca del embalse del Neusa, donde el páramo ha sido degradado para dar espacio a áreas de producción intensiva.

El valor de exportación que llega a Tibitoc tiene en cuenta un factor de retención de sedimentos (eficiencia de retención, ET), ya que gran parte de los sedimentos acaban precipitándose al fondo de los embalses y no atraviesan la presa. Para calcular esa eficiencia, se utilizó la ecuación de Brune (1953): $TE = 1 - (0,05)/t^{0,5}$; $t = c/MAR$, donde c es la capacidad del embalse y MAR el caudal medio anual que recibe el embalse a través de los afluentes.

Modelo de exportación de nitrógeno

El Modelo de Regulación de Nutrientes InVEST se utilizó para calcular el transporte de nutrientes en la cuenca. El modelo calcula la cantidad anual de nutrientes, y en concreto de nitrógeno, transportado en la cuenca, basándose en la información indicada en la Tabla B3.

El ciclo natural de los nutrientes puede verse afectado por la reconversión de los usos del suelo a la agricultura, la ganadería y la urbanización. En general, estos cambios antropogénicos generan vertidos de aguas residuales, vertidos de plantas de tratamiento, uso de fertilizantes, entre otros. Al generarse escorrentía en el suelo por las lluvias, estos nutrientes son arrastrados a los cauces principales, convirtiéndose en contaminantes que deterioran la cali-

dad del agua. Existen varias formas de reducir la carga de nutrientes en una cuenca, una forma es reducir las fuentes contaminantes y generar prácticas sostenibles que reduzcan la cantidad de fertilizantes en los procesos de producción. Por otro lado, la naturaleza presta un servicio de filtrado de nutrientes y absorción de contaminantes a través de la vegetación natural. Los suelos también pueden retener algunos contaminantes solubles. Ecosistemas como los humedales y la vegetación ribereña también pueden ayudar en la retención de contaminantes, lo que reduce la carga antes de que lleguen a los cauces principales. El modelo de retención de nutrientes utiliza una metodología basada en el balance de masas, que describe el movimiento de los nutrientes en el espacio. El modelo representa el transporte y la permanencia de los nutrientes mediante relaciones empíricas. La fuente de nutrientes se representa a través de la carga de nutrientes, que depende del tipo de uso del suelo. Para cada tipo de uso del suelo, se asignó una carga total de nitrógeno y fósforo de acuerdo con las cargas típicas para algunos usos agrícolas y otras actividades presentes en la cuenca.

Para cada tipo de cobertura del suelo se definieron los siguientes factores que figuran en el la tabla B4.

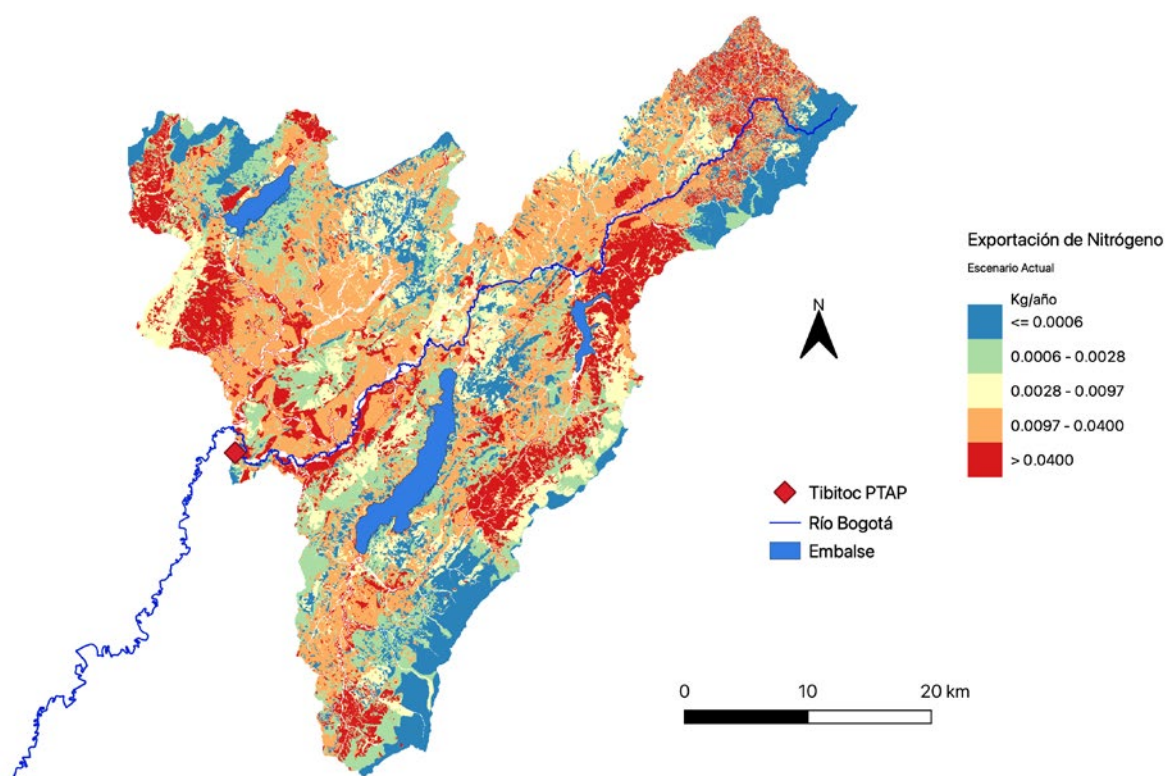
TABLA B4 | Factores de uso del suelo para los cálculos del modelo de exportación de nutrientes

LUCODE	LULC_DESC	ROOT_DEPTH	KC	LOAD_N	EFF_N	LOAD_P	EFF_P
111	Tejido urbano continuo	0	0,1	20	0,05	5	0,05
112	Tejido urbano discontinuo	0	0,1	10	0,1	3	0,1
121	Zonas industriales o comerciales	0	0,1	25	0,05	5	0,05
122	Red vial ferroviaria y terrenos asociados	0	0,1	20	0,05	5	0,05
125	Obras hidráulicas	0	0,2	5	0,1	3	0,1
131	Zonas de extracción minera	500	0,2	5	0,1	3	0,1
142	Instalaciones recreativas	500	0,3	5	0,1	3	0,1
211	Cereales	1000	0,7	35	0,5	3	0,25
213	Oleaginosas y leguminosas	1000	0,6	35	0,5	3	0,25
215	Tubérculos	1000	0,7	35	0,5	3	0,25
223	Oleaginosas y leguminosas	1000	0,6	35	0,5	3	0,25
224	Cultivos agroforestales	1500	0,7	13	0,75	4	0,7
225	Cultivos confinados	1000	0,5	35	0,5	3	0,25
231	Pastos limpios	2000	0,8	20	0,7	4	0,7
232	Pastos	2000	0,8	20	0,7	4	0,7
233	Pastos enmalezados	2000	0,8	14	0,7	1	0,7
241	Mosaico de cultivos	1000	0,7	24	0,25	4	0,25
242	Mosaico de pastos y cultivos	1500	0,7	27	0,6	4	0,5
243	Mosaico de cultivos pastos y espacios naturales	1500	0,7	13	0,75	4	0,7
244	Mosaico de pastos con espacios naturales	1500	0,8	10	0,7	2	0,7
245	Mosaico de cultivos con espacios naturales	1500	0,8	9	0,75	2	0,7
311	Bosque denso	3500	1	1,8	0,8	0,011	0,8
312	Bosque abierto	3500	1	1,8	0,8	0,011	0,8
314	Bosque de galería y ripario	3500	1	2	0,8	0,011	0,8
315	Plantación forestal	3500	1	2	0,8	0,011	0,8
321	Herbazal	1500	0,6	1	0,8	0,011	0,8
322	Arbustal	1500	0,8	2	0,5	0,011	0,5
323	Vegetación secundaria o en transición	2000	1	2	0,5	0,011	0,5
1001	Páramo	1000	0,5	1	0,8	0,011	0,8
331	Zonas arenosas naturales	500	0,3	15	0,1	1,5	0,1
332	Afloramientos rocosos	500	0,3	15	0,1	1,5	0,1
333	Tierras desnudas y degradadas	500	0,3	15	0,1	1,5	0,1
411	Zonas Pantanosas	1000	1,1	2	0,8	0,05	0,8
413	Vegetación acuática sobre cuerpos de agua	10	1,1	1,8	0,8	0,05	0,8
511	Cuerpos de agua naturales	10	1,1	1,8	0,8	0,05	0,8

LUCODE	LULC_DESC	ROOT_DEPTH	KC	LOAD_N	EFF_N	LOAD_P	EFF_P
512	Lagunas, lagos y ciénagas naturales	10	1.1	1,8	0,8	0,05	0,8
513	Canales	10	0.8	0,001	0,05	0,001	0,05
514	Cuerpos de agua artificiales	10	1.1	1,8	0,8	0,05	0,8
1002	Subpáramo	1500	0.6	1	0,8	0,011	0,8
1003	Bosque altoandino	1500	0.8	2	0,5	0,011	0,5
2001	Páramo_Res	1000	0.5	1	0,8	0,011	0,8
2002	Subpáramo_res	1500	0.6	1	0,8	0,011	0,8
2003	Bosque altoandino_res	1500	0.8	2	0,5	0,011	0,5
3001	Agroforestería	1500	0,7	13	0,75	4	0,7
3002	Silvopastoril	1500	0.8	10	0,7	2	0,7
5001	Agroforestería_páramo	1500	0,7	13	0,75	4	0,7
5002	Silvoapastoril_páramo	1500	0.8	10	0,7	2	0,7

Fuente: Autores.

FIGURA B2 | Exportación de nutrientes en el escenario base



Fuente: Autores.

Los resultados de la exportación de los nutrientes en el escenario base (Figura B2) muestran una cantidad significativa de cargas contaminantes en la zona norte de la cuenca alta del río Bogotá, es decir, en los municipios de Villapinzón y Chocontá, cerca del embalse del Sisga, donde se concentra gran parte de la producción agrícola y pecuaria. Por otro lado, las zonas con mayor exportación de nutrientes se encuentran en la parte oriental del embalse de Tominé y en la cuenca del río Checua, en el municipio de Cogua, y en la cuenca alta del río Neusa, en el municipio de Tausa, donde hay una fuerte presencia de actividades agropecuarias como el cultivo de papa.

Priorización de terrenos según el potencial de exportación de sedimentos

Una vez aplicados los modelos de exportación de sedimentos y nutrientes para establecer un escenario base en toda la cuenca alta del río Bogotá, se utilizaron las siguientes reglas de priorización para identificar áreas específicas de intervención potencial:

- Seleccionar el 1% superior de las tierras (percentil 99) en la cuenca que tengan el mayor impacto esperado para el control de sedimentos en Tibitoc.
- Seleccionar el 2% superior de las tierras (percentil 98) en la cuenca que tengan el mayor impacto esperado para el control de sedimentos en Tibitoc.
- Seleccione el 3% superior de las tierras (percentil 97) en la cuenca que tengan el mayor impacto esperado para el control de sedimentos en Tibitoc.

Para cada una de las zonas de intervención prioritarias, se calculó el porcentaje previsto de reducción de sedimentos y nutrientes en comparación con la situación de referencia. A partir de las directrices de aplicación de cada actividad de inversión definidas anteriormente, se asignaron actividades específicas para cada hectárea de terreno en estas zonas de intervención prioritarias (véase la Tabla 3).

Aunque la priorización de tierras de nuestros portafolios de inversión propuestos se basó exclusivamente en el potencial de control de sedimentos, también desarrollamos análisis similares de priorización de tierras basados en el potencial de control de nitrógeno. En específico, se desarrollaron escenarios para el 1%, 2%, 3% de las tierras con el mayor potencial para el control de nutrientes en Tibitoc. Sin embargo, después de ejecutar los Pasos 3-5 para los tres escenarios basados en el control de nitrógeno, se encontró que cada uno tenía un rendimiento financiero negativo; como resultado, se descartaron como alternativas

potenciales. Por lo tanto, el análisis reveló que, dadas las condiciones actuales de la cuenca alta del río Bogotá, es más costo efectivo priorizar las intervenciones basadas en los sedimentos que en el control del nitrógeno.

APÉNDICE C. MÉTODOS DE ANÁLISIS FINANCIERO E HIPÓTESIS

Planificación de las inversiones

Se asume que todas las intervenciones se producirán a lo largo de un periodo de tres años, que cubre todas las actividades de mantenimiento necesarias asociadas a las actividades propuestas en el portafolio de inversión.

Periodo

El plazo de 30 años se ajusta al horizonte temporal habitual utilizado en la EAAB para las inversiones en infraestructura gris destinadas a la gestión del agua.

Tasa de descuento

La tasa de descuento del 12,28% corresponde al WACC utilizado por la EAAB para evaluar la viabilidad financiera de los proyectos de infraestructura. En el paso 6, se presentan los resultados financieros del portafolio considerando tipos de descuento alternativos.

Procedimientos de valoración de beneficios: costos energéticos

Para estimar los posibles costos energéticos evitados gracias al control de los sedimentos y el nitrógeno, se adoptaron las siguientes medidas:

1. Estimar la contribución de los sedimentos y el nitrógeno en los costos totales de energía en Tibitoc.

Mediante conversaciones con el personal de Tibitoc, se pudo deducir que los costos energéticos del tratamiento del agua representan la mayoría de los costos energéticos de la planta, aunque estos no están asociados con la sedimentación en el lago (comentario personal, Rincón, 2022). Por lo tanto, se asume que todos los costos de energía en Tibitoc están asociados con el tratamiento de agua. A partir de los datos mensuales de Tibitoc para 2013-2020, se calculó la correlación lineal entre el uso de energía y la turbiedad (como un indicador de los sedimentos) y los nitritos (Tabla C1). Sobre esta base, se supone que el 21,22% de los costos energéticos están asociados a los sedimentos y el 5,10% a los nitritos.

TABLA C1 | Matriz de correlación para el consumo de energía (electricidad) así como los niveles de turbiedad y nitritos en tibitoc.

MATRIZ DE CORRELACIÓN	KILOVATIOS-HORA CONSUMIDOS	TURBIEDAD (U.N.T)	NITRITOS
Kilovatios-hora consumidos	1		
Turbiedad (U.N.T)	0,2122	1	
Nitritos	0,051	-0,2609	1

Fuente: Autores

2. Estimación de la trayectoria de los costos energéticos en la línea base.

A partir de los datos sobre los costos anuales de energía de Tibitoc para 2010-20, se calculó que los costos de energía en términos reales (es decir, teniendo en cuenta la inflación) han crecido a una tasa anual del 6,04% de 2010 a 2020. (Los costos reales de energía en 2010 y 2020 fueron, COP\$18.240.946.569 y COP\$32.777.575.524, lo que representa una tasa de crecimiento anual de 6,04 % en este periodo). De 2010 a 2020, el crecimiento anual promedio año a año fue de 8,02% con una desviación estándar de 23,92%. Los costos reales de energía en 2020 fueron de COP\$32.777.575.524, lo que equivale a US\$7,5 millones. Para nuestro escenario base, se asume que los costos de energía continúan aumentando a esta tasa a partir de 2021 durante los 30 años de inversión en infraestructura natural. Dado que nuestro escenario de referencia considera una capacidad máxima de tratamiento de 10,5 m3/s mientras que el tratamiento real en Tibitoc fue de 6,21 m3/s en 2021, se multiplica por un factor de conversión lineal de 1,69 (10,5 / 6,21) a los costos energéticos actuales:

$CostosEnergéticos_{max} = 1,69 \times CostosEnergéticos_{actuales}$

Donde:

$CostosEnergéticos_{max}$ es el costo energético con una capacidad máxima de 10,5 m3/s.

$CostosEnergéticos_{actuales}$ es el costo de energía con la capacidad actual en 2021, al 6,21 m3/s.

1,69 Es el factor de conversión de dividir la capacidad máxima a 10,5 m3/s por la capacidad actual en 2021 a 6,21 m3/s.

3. Estimación del porcentaje de costos evitados del portafolio.

A partir de las estimaciones de las posibles reducciones porcentuales de sedimentos y nutrientes de los portafolios NBS1230, NBS2460 y NBS3690, se calcularon las reducciones porcentuales esperadas de los costos energéticos de cada portafolio asociadas a las reducciones de sedimentos y nutrientes (en el año 50, cuando las inversiones alcanzan un potencial del 100% para el control de sedimentos y nutrientes) (Tabla C2).

TABLA C2 | Reducción porcentual de los costos de energía para cada portafolio en el año 50, cuando las inversiones alcanzan su pleno potencial

PORTAFOLIO	REDUCCIÓN DE SEDIMENTOS	REDUCCIÓN DE NITRÓGENO	CORRELACIÓN ENTRE COSTOS ENERGÉTICOS Y TURBIEDAD	CORRELACIÓN ENTRE COSTOS ENERGÉTICOS Y NITRITOS	REDUCCIÓN DE LOS COSTOS ENERGÉTICOS GRACIAS AL CONTROL DE LOS SEDIMENTOS	REDUCCIÓN DE LOS COSTOS ENERGÉTICOS GRACIAS AL CONTROL DEL NITRÓGENO
NBS1230	14,2%	2%	0,2122	0,051	3%	0,1%
NBS2460	21,3%	3,1%			4,5% =0.2122×21.3%	0,2% =0.051×3.1%
NBS3690	26,3%	4%			5,6%	0,2%

Fuente: Autores

Para ejemplificar el uso del portafolio NBS2460, se calculó una reducción esperada de los costos de energía del 4,5% para NBS2460 debido a la reducción de sedimentos (para el año 50, en el que las inversiones alcanzan el 100% del potencial de control de sedimentos) de la siguiente manera:

- $4,5\% = \text{correlación entre turbiedad y uso de energía } (0,2122) \times \% \text{ de reducción de sedimentos de NBS2460 } (21,3\%)$

Se calculó una reducción esperada de los costos de energía del 0,2% para NBS2460 debido a las reducciones de nitrógeno (para el año 50, en el que las inversiones alcanzan el 100% del potencial de control de nitrógeno) de la siguiente manera:

- $0,2\% = \text{correlación entre nitritos y uso de energía } (0,0510) \times \% \text{ de reducción de nitrógeno del NBS2460 } (3,1\%)$

A partir de lo anterior, se calculó un porcentaje anual de reducción de los costos de energía basado en la trayectoria temporal de los impactos esperados de los años 1 a 40. Con este fin, se utilizaron los resultados de Poorter et al. (2016) aplicados por Feltran-Barbieri et al. (2021) para evaluar la trayectoria temporal del control de la erosión en bosques secundarios neotropicales (Figura C1). Por ejemplo, dado que el impacto acumulado esperado del control de sedimentos y nitrógeno sería del 63,5% para el

año 10, entonces las reducciones esperadas en los costos de energía para ese año con respecto a una línea de base serían las siguientes:

- Control de sedimentos: $2,9\% = 4,5\% \times 63,5$
- Control del nitrógeno: $0,10\% = 0,2\% \times 63,5\%$.

4. Estimación de los costos evitados.

Una vez estimados los costos energéticos de referencia y el porcentaje de costos energéticos evitados del portafolio vinculado al control de sedimentos y nitrógeno, se calcularon los costos anuales evitados multiplicando los costos estimados de referencia de cada año por el porcentaje de reducción de costos energéticos de ese mismo año. A continuación, se sumaron todos los costos evitados a lo largo del periodo de inversión de 30 años.

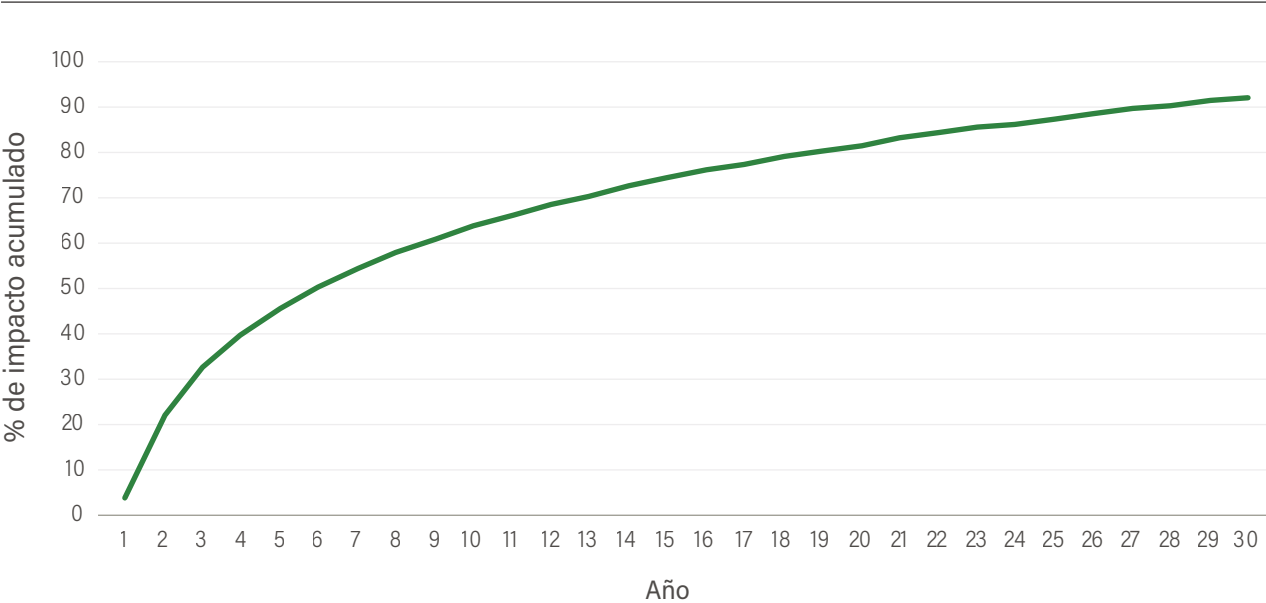
Valoración de beneficios: productos químicos

Para estimar los posibles costos energéticos evitados gracias al control del nitrógeno, se siguieron los siguientes pasos:

1. 1. Modelización de los costos de tratamiento de los productos químicos en Tibitoc.

Se designó a IAN Consultores para desarrollar un análisis estadístico de los parámetros de calidad del agua y modelar los costos de tratamiento del agua asociados con los productos químicos para diferentes niveles de calidad del

FIGURA C1 | Impacto acumulado para la reducción de sedimentos y nitrógeno de los portafolios de infraestructura natural a lo largo de 30 años



Fuentes: Cálculos del autor, basados en Feltran-Barbieri et al. (2021) y Poorter et al. (2016).

agua basados en las normas actuales de dosificación de productos químicos y los costos en Tibitoc (IAN Consultores 2022). En Tibitoc, se aplican dosis específicas de productos químicos en función del nivel de varios contaminantes del agua, como amonio, materia orgánica, alcalinidad, pH y manganeso. En 2020, los productos químicos aplicados en grandes dosis en Tibitoc incluían sulfato de aluminio y policloruro (coagulantes), cloro (desinfectante) y cal (alcalinizante). Tibitoc no utiliza productos químicos específicos para tratar los sedimentos, por lo que el control de los sedimentos queda excluido de este análisis.

Este análisis, basado en los datos de calidad del agua en Tibitoc para 1998-2014 y 2019-21 proporcionados por la EAAB, nos permitió obtener los costos actuales de los productos químicos (COP\$20.509.603.796 en 2020) y una "calculadora de costos de productos químicos", mediante la cual se pudieron obtener resultados para diferentes niveles de calidad del agua. Dado que el escenario base considera una capacidad máxima de tratamiento de 10,5 m³/s, mientras que el tratamiento real en Tibitoc fue de 6,21 m³/s para 2021, se aplicó un factor de conversión de 1,69 (es decir, 10,5 / 6,21) a los costos actuales de los productos químicos.

2. Estimación de los costos evitados.

Al utilizar la calculadora de costos de productos químicos, se obtuvieron las siguientes reducciones porcentuales en los costos de productos químicos asociadas a los posibles portafolios (para el año 50, cuando la inversión alcance su máximo potencial):

- NBS1230: 0,52% de reducción.
- NBS2460: 0,82 % de reducción
- NBS3690: 1,07 % de reducción.

A partir de estas reducciones porcentuales de los productos químicos, se calcularon los costos anuales evitados multiplicando los costos estimados en la línea de base de cada año por las reducciones porcentuales de los costos de los productos químicos de ese mismo año. La trayectoria temporal desde el año 1 al 30 se calculó utilizando los resultados de Poorter et al. (2016) aplicados por Feltran-Barbieri et al. (2021), como se ha explicado anteriormente. A continuación, se sumaron todos los costos evitados durante el período de inversión de 30 años.

Los resultados anteriores sobre las reducciones de los costos químicos asumen una situación de referencia en la que los indicadores de calidad del agua, excepto el nitrógeno, permanecen constantes en su estado actual. Sin embargo, en el paso 6, se presentan los resultados de las reducciones de costos químicos previstas para un escenario con niveles de calidad del agua deteriorados.

Valoración de beneficios: depreciación

Para estimar los posibles costos evitados de depreciación gracias al control de los sedimentos y el nitrógeno, se han seguido los siguientes pasos:

1. Cálculo del valor contable de los activos vinculados al tratamiento del agua.

A partir de la información sobre activos facilitada por la EAAB hasta junio de 2022, se calculó el valor contable de las infraestructuras relacionadas con el tratamiento del agua en Tibitoc. De los estados financieros ⁵y de esta información, se deduce que la EAAB utiliza un método de depreciación lineal con un valor de rescate cero, mientras que la vida útil de los activos oscila entre 1 y 50 años.

A partir de la información recopilada, se calculó el valor de los activos directamente relacionados con el tratamiento del agua en los próximos años. Lo más importante es que se concluyó que se espera que toda la infraestructura utilizada para el tratamiento del agua quede completamente amortizada al final de los dos años siguientes. Por lo tanto, se espera que los costos evitados de amortización vinculados a las reducciones de sedimentos y nutrientes sólo tengan lugar en el año 1 y 2 de la inversión.

2. Estimación de los costos evitados

Para calcular los costos anuales evitados en concepto de depreciación, se multiplicó el valor contable de los activos utilizados para el tratamiento del agua en el año 1 y 2 por el porcentaje correspondiente de reducción de los costos asociados al control de sedimentos y nutrientes. Para esto último, se multiplicó el porcentaje previsto de reducción de sedimentos y nutrientes asociado al portafolio por el porcentaje acumulado de impacto de la inversión para ese año, y luego se sumaron los costos evitados de los años 1 y 2.

SIGLAS

CAR	Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca
CI	Conservación Internacional
CRA	Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico
EAAB	Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá
GGA	Metodología Verde- Gris
IRR	Tasa Interna de Retorno
NbS	Soluciones Basadas en la Naturaleza
NPV	Valor Presente Neto
NTU	Unidad Nefelométrica de Turbiedad
POMCA	Plan de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas
ROI	Retorno de la Inversión
WACC	Costo Medio Ponderado de Capital
WRI	World Resources Institute

NOTAS FINALES

1. Los páramos son ecosistemas de pastizales y matorrales de gran altitud que se encuentran desde Venezuela hasta el norte de Perú (Goldstein y DellaSala 2020).
2. Ver Resolución 907 de la Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico (CRA) en 2019: <https://www.cra.gov.co/transparencia/normatividad/normatividad-entidad-autoridad/resolucion-cra-908-2019>. Consultada el 11 de noviembre de 2022.
3. Este cálculo lo basamos en los resultados de Poorter et al. (2016), aplicados por Feltran-Barbieri et al. (2021) para evaluar la trayectoria temporal del control de la erosión en bosques secundarios neotropicales. Luego se aplicó la siguiente fórmula desarrollada por IAN Consultores basada en información histórica en Tibitoc: $Turbiedad = 1.4278 \times (\text{Sólidos Totales Superados}) - 0.2513$
4. El crecimiento anual promedio de los costos de energía para el período 2010-20 refleja un aumento tanto en la energía utilizada (3,91% de aumento anual en kilovatios hora) como en el costo de adquisición de energía durante este período.
5. Para los estados financieros, ver: https://www.acueducto.com.co/wps/wcm/connect/EAB2/c04bafa1-d52f-43f7-a95d-9bd990c751fe/2021+Notas+y+Certificacion+a+los+Estados+Financieros.pdf?MOD=AJPERES&CACHEID=RO_OTWORKSPACE.Z18_K862HG82NOTF70QEKDBLFL3000-c04bafa1-d52f-43f7-a95d-9bd990c751fe-n.WaR2c. Consultado el 6 de noviembre de 2022.

GLOSARIO

Restauración ecológica: Actividades cuyo objetivo es "reconstruir, iniciar o acelerar la recuperación de un ecosistema que ha sido perturbado" (Vaughn et al. 2010).

Soluciones basadas en la naturaleza (SbN): "Acciones para proteger, gestionar de forma sostenible y restaurar ecosistemas naturales o alterados, que abordan los retos sociales de forma eficaz y adaptativa, proporcionando a la vez beneficios para el bienestar humano y la biodiversidad" (Cohen-Shacham et al. 2016, 2).

Infraestructura natural o verde: "La protección, restauración o gestión estratégica de sistemas naturales como bosques y humedales que contribuyen a servicios básicos de infraestructura como el suministro de agua" (Feltran-Barbieri et al. 2021).

Control de nutrientes: Inversiones/actividades destinadas a reducir el nivel de nutrientes, como el nitrógeno y el fósforo, en una fuente de agua determinada.

Páramo: Un ecosistema de pastizales o matorrales de gran altitud que se encuentra desde Venezuela hasta el norte de Perú (Goldstein y DellaSala, 2020).

Control de sedimentos: Inversiones/actividades destinadas a reducir el nivel de sólidos en suspensión en un determinado cuerpo de agua.

Sistemas silvopastoriles: "Sistemas agroforestales que combinan plantas forrajeras, como gramíneas y hierbas leguminosas, arbustos y árboles para la alimentación animal y usos complementarios" (Murgueitio et al. 2011).

Costos de oportunidad: El costo que se deja de pagar por elegir una alternativa por encima de la segunda mejor opción.

Gestión del agua: "El control y el manejo de los recursos hídricos para minimizar los daños a la vida y la propiedad así como para maximizar su uso eficiente y beneficioso" (USDA, 2022).

Metodología GGA: Un método de seis pasos que ayuda a comprender los costos y beneficios para que una empresa de servicios públicos de agua invierta en infraestructura natural (Gray et al. 2019).

BIBLIOGRAFÍA

Bezerra, M.O., D. Vollmer, N. Acero, M.C. Marques, D. Restrepo, E. Mendoza, B. Coutinho, I. Encomenderos, L. Zuluaga, O. Rodríguez, and K. Shaad. 2022. "Operationalizing integrated water resource management in Latin America: insights from application of the freshwater health index." *Environmental Management*: 1–20.

Calbi, M., N. Clerici, T. Borsch, and G. Brokamp. 2020. "Reconstructing long term high Andean forest dynamics using historical aerial imagery: A case study in Colombia." *Forests* 11(8): 788.

CAR (Corporación Autónoma Regional de Cundimarca). 2006. *Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del Río Bogotá*. Bogotá, Colombia: CAR. <https://www.car.gov.co/uploads/files/5ac24aeabc81c.pdf>.

CAR. 2019. "POMCA río Bogotá 2019." <https://www.car.gov.co/vercontenido/3691#>. Accessed March 24, 2023.

CI Colombia (Conservation International Colombia). 2017. "Agua y Ciudades." <https://www.conservation.org.co/programas/Aguas-y-ciudades>. Accessed May 12, 2023.

Cohen-Shacham, E., G. Walters, C. Janzen, and S. Maginnis, eds. 2016. *Nature-Based Solutions to Address Global Societal Challenges*. IUCN International Union for Conservation of Nature. doi:10.2305/IUCN.CH.2016.13.en.

Cortés Sánchez, S.P. 2018. "Identificación y cuantificación de los procesos de cambio de las coberturas sobre el territorio de la cuenca alta del río Bogotá, entre 1977 y 2015." *Revista Ciudades, Estados y Política* 5(2): 17–32.

Cremades, R., H. Mitter, N.C. Tudose, A. Sanchez-Plaza, A. Graves, A. Broekman, S. Bender, C. Giupponi, P. Koundouri, M. Bahri, S. and Cheval. 2019. "Ten principles to integrate the water-energy-land nexus with climate services for co-producing local and regional integrated assessments." *Science of the Total Environment* 693: 133662. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133662>.

EAAB (Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá). 2022. "Informes de Sostenibilidad 2021." Bogotá, Colombia: EAAB. https://www.acueducto.com.co/wps/portal/EAB2/Home/transparencia_informacion_publica/planeacion_presupuesto_informes/informes%20de%20sostenibilidad.

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2022. "FAO and Adaptation Fund." <https://www.fao.org/land-water/overview/adaptation-fund/es/>. Accessed November 30, 2022.

- Feltran-Barbieri, R., S. Ozment, P. Hamel, E. Gray, H. Lucchesi Mansur, T. Piazzetta Valente, J. Baladelli Ribeiro, and M.M. Matsumoto. 2018. *Infraestrutura Natural para Agua no Sistema Guandu, Rio de Janeiro*. World Resources Institute (WRI). <https://www.wribrasil.org.br/sites/default/files/InfraestruturaNaturalGuanduRJ.pdf>.
- Feltran-Barbieri, R., S. Ozment, M. Matsumoto, E. Gray, T. Belote Silva, and M. Oliveira. 2021. *Natural Infrastructure in Vitoria's Water System, Espírito Santo State*. WRI. doi:10.46830/wriipt.18.00155en.
- Fontanele, R., and O. Vasconcelos. 2006. *Análise da viabilidade econômico-financeira de projetos de abastecimento d'água: O caso do sistema de abastecimento da cidade de Milhã, no estado do Ceará*. Paper presented to the Brazilian Society for Economics, Administration and Rural Sociology, 9-11 October.
- Goldstein, M.I., and D.A. DellaSala. 2020. *Encyclopedia of the World's Biomes*. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier.
- Gray, E., S. Ozment, J.C. Altamirano, R. Feltran-Barbieri, and G. Morales. 2019. *Green-Gray Assessment: How to Assess the Costs and Benefits of Green Investments for Water Supply Systems*. Washington, DC: WRI.
- Harden, C. P. 1993. "Land use, soil erosion, and reservoir sedimentation in an Andean drainage basin in Ecuador." *Mountain Research and Development*: 177-184.
- Heubaum, H., C. Brandon, T. Tanner, S. Surminski, and V. Roezer. 2022. "The Triple Dividend of Building Climate Resilience: Taking Stock, Moving Forward." Working Paper. Washington, DC: WRI. <https://doi.org/10.46830/wriwp.21.00154>.
- IAN Consultores. 2022. "Cálculo de los costos de tratamiento con la disminución de nutrientes y sedimentos." Bogotá, Colombia: IAN Consultores.
- IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi). 2019. *Memoria Técnica Cundinamarca, Estudio de Suelos*. Bogotá, Colombia: IGAC.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)). (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the IPDCC, edited by V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou. Cambridge University Press, Cambridge, and New York: IPCC. doi:10.1017/9781009157896.
- IUCN (2020). Global Standard for Nature-based Solutions. A user-friendly framework for the verification, design and scaling up of NbS. First edition. Gland, Switzerland: IUCN.
- Junqueira, A., J. Pimentel, and G. Castro. 2017. *Brazilian Water and Sewage Sector: Is a Revolution Coming?* New York: BTG Pactual, Equity Research.
- López Portillo, V., S. Gómez, and S.E. Rodríguez. 2022. "5 Barreras que Dificultan el Financiamiento Verde," September 27. WRI México. <https://wrimexico.org/bloga/5-barreras-que-dificultan-el-financiamiento-verde>.
- Manski, C. F. 2019. "Communicating uncertainty in policy analysis." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 116(16): 7634-7641.
- Marsters, L., A.G. Morales, S. Ozment, M. Silva, G. Watson, M. Netto, and G. Frisari. 2021. "Nature-Based Solutions in Latin America and the Caribbean: Financing Mechanisms for Replication." Washington, DC: Inter-American Development Bank and WRI.
- Murgueitio, E., Z. Calle, F. Uribe, A. Calle, and B. Solorio. 2011. "Native Trees and Shrubs for the Productive Rehabilitation of Cattle Ranching Lands." *Forest Ecology and Management* 261 (2011): 1654-1663. doi: 10.1016/j.foreco.2010.09.027.
- OCGA (Observatorio Colombiano de Gobernanza del Agua). 2022. "Sentencia del Río Bogotá." <http://www.ideam.gov.co/web/ocga/sentencia>. Accessed December 30, 2022.
- OECD (Organisation for Economic Co-Operation and Development). 2022. *National Urban Policy Review of Colombia*. Paris: OECD Urban Studies. <https://doi.org/10.1787/9ca1caae-en>.
- Ozment, S., T. Gartner, H. Huber-Stearns, K. DiFrancesco, N. Lichten, and S. Tognetti. 2016. "Protecting drinking water at the source: lessons from watershed investment programs in the United States". Washington, DC: WRI. <http://www.wri.org/publication/protecting-drinking-water-source>.
- Ozment, S., R. Feltran-Barbieri, P. Hamel, E. Gray, J. Baladelli, Ribeiro, S. Barreto, and A. Padovezi. 2018. "Natural Infrastructure in São Paulo's Cantareira System." Washington, DC: WRI.
- Ozment, S., M. Gonzalez, A. Schumscher, E. Oliver, A.G. Morales, T. Gartner, M. Silva, A. Grünwaldt, and G. Watson. 2021. *Nature-Based Solutions in Latin America and the Caribbean: Regional Status and Priorities for Growth*. Washington, DC: Inter-American Development Bank and WRI.
- Peña Guzmán, C. A., J. Melgarejo Moreno, and D. Prats Rico. 2016. "El ciclo urbano del agua en Bogotá, Colombia: Estado actual y desafíos para la sostenibilidad." *Tecnología y ciencias del agua* 7(6): 57-71.
- Poorter, L., F. Bongers, T.M. Aide, A.M. Almeyda Zambrano, P. Balvanera, J. Becknell, V. Boukili, Brancalion, P.H., Broadbent, E.N., Chazdon, R.L. and Craven, D. 2016. Biomass Resilience of Neotropical Secondary Forests. *Nature* 530 (7589): 211-14.

Reinoso Rodríguez, G. 2020. "La titánica tarea de blindar los túneles que traen el agua a Bogotá." *El Tiempo*, November 15. <https://www.eltiempo.com/bogota/asi-se-blindaron-los-tuneles-que-traen-agua-de-chingaza-a-bogota-549010>.

Richerzhagen, C., J.C. Rodríguez de Francisco, F. Weinsheimer, A. Döhnert, L. Kleiner, M. Mayer, J. Morawietz, and E. Philipp. 2019. "Ecosystem-Based Adaptation Projects, More than just Adaptation: Analysis of Social Benefits and Costs in Colombia." *International Journal of Environmental Research and Public Health* 16(21): 4248. <https://doi.org/10.3390/ijerph16214248>.

Rincon, Carlos. 2022. Personal communication between Santiago Izquierdo Tort, Laura Bulbena, Natalia Acero and Carlos Rincon, División Abastecimiento Tibitoc, Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, online. June 2.

Rodríguez-Jeangros, N., L.A. Camacho, J.P. Rodríguez, and J.E. McCray. 2018. "Integrated urban water resources model to improve water quality management in data-limited cities with application to Bogotá, Colombia." *Journal of Sustainable Water in the Built Environment* 4(2): 04017019. <https://doi.org/10.1061/JSWBAY.0000846>.

Santos Santos, T. F., and L.A. Camacho. 2022. "An Integrated Water Quality Model to Support Multiscale Decisions in a Highly Altered Catchment." *Water* 14(3): 374.

Seymour, F., M. Wolosin, and E. Gray. 2022. *Not Just Carbon: Capturing All the Benefits of Forests for Stabilizing the Climate from Local to Global Scales*. Washington, DC: WRI. doi.org/10.46830/wriprpt.19.00004.

Sharp, R., H. Tallis, T. Ricketts, A. Guerry, S. Wood, and R. Chaplin-Kramer. 2016. *Invest User's Guide*. The Natural Capital Project, Stanford University, University of Minnesota, The Nature Conservancy, and World Wildlife Fund.

The Green Blue Water Coalition. 2022. "The São Paulo Water Fund." The Nature Conservancy, Fundación Femsa, Inter-American Development Bank, and Global Environmental Facility. <https://www.fondosdeagua.org/content/dam/tnc/nature/en/documents/latin-america/WFen.pdf>.

UNDP (United Nations Development Programme). 2022. "Enhancing climate resilience of rural communities and ecosystems in Ahuachapán Sur, El Salvador." <https://www.adaptation-undp.org/projects/enhancing-climate-resilience-rural-communities-and-ecosystems-ahuachap%C3%A1n-sur-el-salvador>. Accessed November 30, 2022.

UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change). 2022. "Adaptation Fund: Nature-Based Solutions for Climate Change Adaptation." <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/Adaptation%20Fund.pdf>. Accessed November 30, 2022.

USAID (United States Agency for International Development). 2021. "Reporte de Instrumentos Económicos e Incentivos Financieros. PRODUCTO 5. Piloto de articulación de la tarifa de inversiones ambientales y otros instrumentos económicos e incentivos financieros para la protección de cuencas y fuentes de agua en el Corredor de Conservación de páramos Chingaza – Sumapaz – Guerrero – Guacheneque." Washington, DC: USAID.

USDA (United States Department of Agriculture). 2022. "Water Management." <https://www.nrcs.usda.gov/water-management>. Accessed November 29, 2022.

Vaughn, K. J., L.M. Porensky, M.L. Wilkerson, J. Balachowski, E. Peffer, C. Riginos, and T.P. Young. 2010. "Restoration Ecology." *Nature Education Knowledge* 3(10):66. <https://www.nature.com/scitable/knowledge/library/restoration-ecology-13339059/>.

Crédito de las fotografías

Portada, Gabriel Eisenband/Conservation International Colombia; Pg. ii, Diego Restrepo-Zambrano/Conservation International Colombia; Pg. 1, Luis Alejandro Bernal Romero/ Flickr; Pg. 2, Diego Restrepo-Zambrano/Conservation International Colombia; Pg. 4, Logan Watts/Conservation International Colombia; Pg. 7, Diego Restrepo-Zambrano/Conservation International Colombia; Pg. 11, Logan Watts/Conservation International Colombia; Pg. 12, Diego Restrepo-Zambrano/Conservation International Colombia; Pg. 18, Lady Rodríguez/Conservation International Colombia; Pg. 22, Diego Restrepo-Zambrano/Conservation International Colombia; Pg. 24, Diego Restrepo-Zambrano/Conservation International Colombia; Pg. 38, Sebastián Di Doménico/Meseta Films; Pg. 40, Diego Restrepo-Zambrano; Pg. 42, Natalia Acero/Conservation International Colombia.

ACERCA DEL WRI

World Resources Institute es una organización mundial de investigación que transforma las grandes ideas en acciones vinculadas al medio ambiente, las oportunidades económicas y el bienestar humano.

NUESTRO DESAFÍO

Los recursos naturales son la base de las oportunidades económicas y del bienestar humano. Pero hoy en día se están agotando a un ritmo insostenible, lo que pone en peligro la economía y la vida de las personas. La gente depende del agua potable, las tierras fértiles, los bosques sanos y un clima estable. Las ciudades habitables y la energía limpia son esenciales para un planeta sostenible. En esta década se deben abordar estos retos mundiales de manera urgente.

NUESTRA VISIÓN

Imaginamos un planeta equitativo y próspero movido por la correcta gestión de los recursos naturales. Aspiramos a crear un mundo en el que las acciones de los gobiernos, las empresas y las comunidades coincidan en la eliminación de la pobreza y la sostenibilidad del entorno natural para todas las personas.

ACERCA DE CITIES4FORESTS

Cities4Forests es una red mundial de más de 80 ciudades comprometidas con la conservación, restauración y gestión sostenible por el bienestar humano de árboles, bosques y otras reservas naturales. Cities4Forests contribuye a los esfuerzos de las ciudades en sus propios bosques (como parques urbanos y vías verdes), bosques vecinos (como cuencas hidrográficas) y bosques lejanos (especialmente bosques tropicales) mediante la sensibilización sobre los beneficios de los bosques, impulsando la acción política y el compromiso, ofreciendo asistencia técnica y facilitando el análisis económico, la financiación y la inversión.

ACERCA DE CONSERVACIÓN INTERNACIONAL COLOMBIA

Conservación Internacional trabaja para destacar y conservar los beneficios que la naturaleza proporciona a la humanidad. Desde su fundación, ha ayudado a proteger más de 6 millones de kilómetros cuadrados (2,3 millones de millas cuadradas) de tierra y mar en más de 70 países. En la actualidad actúa en 29 países y cuenta con 2000 socios en todo el mundo, lo que genera un alcance global auténtico.

La organización promueve economías sostenibles basadas en la conservación de las áreas de mayor importancia para las personas y la naturaleza, mediante la creación de nuevos modelos de financiación de la conservación y modelos de producción que a la vez mantiene un equilibrio entre la demanda y la protección de los recursos naturales esenciales.

La misión de Conservación Internacional Colombia es empoderar a la sociedad para que cuide de manera responsable y sostenible la naturaleza, nuestra biodiversidad y el bienestar de la humanidad.

ACERCA DE LA EMPRESA DE ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO DE BOGOTÁ

Somos una empresa pública prestadora de servicios de acueducto y alcantarillado, de manera directa a más de 2.4 millones de suscriptores en Bogotá y la región. Suministramos más de 41 millones de metros cúbicos a 11 municipios vecinos a través de venta de agua en bloque. Somos financieramente sólidos, en crecimiento y con importantes oportunidades de nuevos negocios a nivel nacional e internacional. Contamos con una calificación financiera AAA.

Somos pioneros en el empleo de tecnologías de punta que disminuyen impactos ambientales y de movilidad. Estamos comprometidos con la sostenibilidad y con el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible y Principios de Pacto Global. Adelantamos importantes proyectos ambientales como el saneamiento del río Bogotá, la recuperación de humedales y la conservación del páramo de Chingaza. Somos la primera empresa en Colombia en generar Mecanismos de Desarrollo Limpio para reducir los gases de efecto invernadero mediante la producción de energía limpia.

Each World Resources Institute report represents a timely, scholarly treatment of a subject of public concern. WRI takes responsibility for choosing the study topics and guaranteeing its authors and researchers freedom of inquiry. It also solicits and responds to the guidance of advisory panels and expert reviewers. Unless otherwise stated, however, all the interpretation and findings set forth in WRI publications are those of the authors.

Maps are for illustrative purposes and do not imply the expression of any opinion on the part of WRI, concerning the legal status of any country or territory or concerning the delimitation of frontiers or boundaries.



WORLD
RESOURCES
INSTITUTE

10 G Street, NE
Washington, DC 20002
WRI.ORG