

**CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL
DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA**

DIVISIÓN DE EDUCACIÓN

PROGRAMA DE POSGRADO

**Análisis del efecto de infraestructura verde para la protección del recurso hídrico en
las microcuencas del río Segundo y río Ciruelas, Heredia, Costa Rica**

**Tesis sometida a consideración de la División de Educación y el Programa de
Posgrado**

como requisito para optar al grado de

MAGISTER SCIENTIAE

en Manejo y Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas

Ana Karen Franco-Ábrego

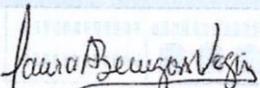
Turrialba, Costa Rica

2022

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

**MAGISTER SCIENTIAE EN MANEJO Y GESTIÓN INTEGRAL
DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS**

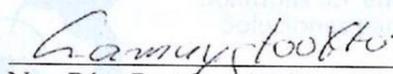
FIRMANTES:



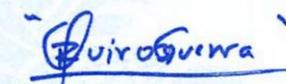
Laura Benegas Negri, Ph.D.
Directora de tesis



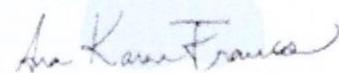
Cornelis Prins, MA.
Miembro Comité Consejero



Ney Ríos Ramírez, M.Sc.
Miembro Comité Consejero



Roberto Quiroz Guerra, Ph.D.
Decano, Escuela de Posgrado



Ana Karen Franco Abrego
Candidata

Dedicatoria

A Jesucristo.

Agradecimientos

A IFARHU-SENACYT por otorgarme la beca.

A los profesores, Laura, Kees y Ney, por su guía en este proyecto de tesis.

A la Empresa de Servicios Públicos de Heredia, por permitir la realización de la tesis dentro del Programa de Pagos por Servicios Ambientales Hídricos implementado en Heredia.

A la Ing. Vivian y voluntarios de la ESPH S.A., por el apoyo en las giras de campo.

A mis padres Lino y Rosa, a Lino Jr., Lian Adriana, Alexander por siempre estar, aún en la distancia.

A los de la potra, gracias por hacer esta experiencia educativa más divertida.

Agradecida con mis compañeros de la maestría, Aurorita, Andrea, Yefrin y Javier, con quienes compartí esta experiencia única de aprendizaje y a todos los integrantes de la promoción de maestría 2021-2022, por la agradable experiencia de convivir con un grupo super unido y por todos esos únicos, divertidos, algunos estresantes momentos que llevaré por siempre en mi corazón.

Contenido	
Introducción	1
Metodología	3
<i>Ubicación y descripción del área de estudio</i>	3
<i>Metodología de Cuantificación de Beneficios Hidrológicos</i>	4
<i>Unidad de muestreo</i>	4
<i>Características del suelo</i>	4
<i>Características de la cobertura forestal</i>	5
<i>Datos de entrada CUBHIC</i>	5
<i>Análisis de costo de los sistemas bosques, plantación establecida y reforestación</i>	6
<i>Actores y proyectos de conservación</i>	6
<i>Proceso metodológico</i>	8
Resultados	9
<i>Caracterización de los sistemas y escenarios evaluados</i>	9
<i>Cuantificación de beneficios hídricos</i>	12
<i>Escenarios de degradación de sistemas</i>	13
<i>Análisis de costo de los sistemas bosques, plantación establecida y reforestación</i>	14
<i>Actores relevantes en la implementación de proyectos de conservación</i>	14
<i>Aspectos relacionales y de influencia entre actores</i>	16
<i>Acciones implementadas para la protección y conservación del recurso hídrico</i>	18
Discusión	18
<i>Referente a la estructura del suelo y cobertura forestal</i>	18
<i>Referente al aporte actual de agua y suelo</i>	18
<i>Referente a escenarios de cambio de uso de suelo</i>	19
<i>Referente al análisis de costo de los sistemas bosques, plantación establecida y reforestación</i>	20
<i>Sobre la utilidad y limitaciones de CUBHIC</i>	20
<i>Sobre los actores y la sostenibilidad del recurso hídrico</i>	21
<i>Referentes a las acciones de escalamiento para la seguridad hídrica</i>	22
Conclusiones.....	23
Recomendaciones	24
Bibliografía	25
Anexos	29

Lista de cuadros

Cuadro 1 Referencias de las variables jurisdiccional, relacional y niveles de decisión para el mapeo de actores

Cuadro 2 Características de suelo del sistema bosque secundario evaluado en las microcuencas del río Segundo y río Ciruelas.

Cuadro 3 Características de la cobertura forestal del sistema de bosque secundario evaluado en las microcuencas del río Segundo y río Ciruelas.

Cuadro 4 Características de suelo del sistema plantación establecida evaluado en las microcuencas del río Segundo y río Ciruelas.

Cuadro 5 Características de la cobertura forestal del sistema de plantación establecida evaluado en las microcuencas del río Segundo y río Ciruelas.

Cuadro 6 Características de suelo del sistema reforestación evaluado en las microcuencas del río Segundo y río Ciruelas.

Cuadro 7 Características de la cobertura forestal del sistema de reforestación evaluado en las microcuencas del río Segundo y río Ciruelas.

Cuadro 8 Parámetros relacionados a las características de la vegetación y del suelo para los sistemas de bosque, plantación establecida y reforestación.

Cuadro 9 Parámetros relacionados a las características de la vegetación y del suelo para los escenarios de degradación de los sistemas.

Cuadro 10 Matriz de funciones y roles de actores identificados en el área de estudio relacionados con la conservación y protección del recurso hídrico

Lista de figuras

Figura 1 Mapa de localización de las microcuencas del río Ciruelas y río Segundo mostrando los ríos principales, afluentes, división administrativa y sitios de muestreo del área de estudio.

Figura 2 Diseño muestral de obtención de datos en situ para las variables de textura, capacidad de campo (CC), punto de marchitez (PM), cobertura de suelo, estructura forestal vertical y cobertura de dosel.

Figura 3 Proceso para el análisis de los beneficios de los proyectos de conservación con la metodología CUBHIC

Figura 4 a) Sistema de bosque en Los Ángeles, San Rafael; b) Sistema de plantación establecida en San José de la Montaña, Barva; c) Sistema de reforestación en San José de la Montaña, Barva

Figura 5 Beneficios hídricos de escorrentía (Q), evapotranspiración (ET), percolación (p) y pérdida de sedimentos (A) para los sistemas de bosque, plantación establecida, y reforestación. Los datos en los gráficos son representados en escala logarítmica de base 10.

Figura 6 Beneficios hídricos de escorrentía (Q), evapotranspiración (ET), percolación (p) y pérdida de sedimentos (A) para los escenarios de degradación de los sistemas de bosque (a, b), plantación establecida (c, d), y reforestación (e, f). Los datos en los gráficos son representados en escala logarítmica de base 10.

Figura 7 Comparación de los costos de sedimento reducido para los sistemas de bosque, plantación establecida y reforestación en las microcuencas del río Segundo y río Ciruelas.

Figura 8 Representación gráfica del mapeo de actores con los aspectos relacionales, niveles de toma de decisión y niveles jurisdiccionales teniendo como finalidad la conservación y protección hídrica (P).

Lista de acrónimos

ARESEP	Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos
ASADAS	Asociaciones Administradoras de Sistemas de Acueductos y Asociaciones Administradoras de Sistemas de Acueductos y Alcantarillados Comunes
AyA	Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados
bmh-MB	bosque muy húmedo montano bajo
CUBHIC	Cuantificación de beneficios hidrológicos de intervenciones en cuencas
ESPH S.A.	Empresa de los Servicios Públicos de Heredia
GEE	Google Earth Engine
IAF/LAI	Índice del área foliar
ICA	Inspector Cantonal de Aguas
MINAE	Ministerio de Ambiente y Energía
ONG	Organización no gubernamental
PSA	Pagos por Servicios Ambientales
PSAH	Pagos por Servicios Ambientales Hídricos
SINAC	Sistema Nacional de Áreas de Conservación
TPRH	Tarifa de Protección del Recurso Hídrico
UNA-SIL	Grupo de investigación de Isotopos Estables de la Universidad Nacional de Costa Rica
USLE	Ecuación Universal de Pérdida de Suelo

Lista de abreviaturas

A	Pérdida de suelo
CC	Capacidad de campo
ET	Evapotranspiración
Hsw C	Constante de radiación de onda corta entrante
K	Factor de erodabilidad del suelo
MO	Materia orgánica
p	Percolación
PM	Punto de marchitez
Q	Escorrentía
m s. n. m.	Metros sobre el nivel del mar

Lista de unidades

%	Porcentaje
₡	Colones
°C	Grados centígrados
<i>m</i>	metros
m ²	metros cuadrados
mm	milímetros
mm/año	milímetros por año
t/año	toneladas por año
%	Porcentaje
₡	Colones

Análisis del efecto de infraestructura verde para la protección del recurso hídrico en las microcuencas del río Segundo y río Ciruelas, Heredia, Costa Rica

Ana Karen Franco-Ábrego¹, Laura Andrea Benegas Negri¹, José Ney Ríos Ramírez¹, Cornelis Prins¹

¹Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), Turrialba, Costa Rica

Resumen

La implementación de infraestructura verde como proyectos de conservación de suelo y agua a nivel local es importante en la gestión integrada de los recursos hídricos por las medidas preventivas y correctivas que ofrecen en la búsqueda de la sostenibilidad del recurso hídrico. Los aportes de agua y sedimentos en los sistemas de bosque, plantación establecida y reforestación en la parte alta de las microcuencas del río Segundo y río Ciruelas dentro del programa de pago por servicios ambientales hídricos de la ESPH, pueden ser calculados con la herramienta de cuantificación de beneficios hidrológicos de intervención en cuencas (CUBHIC). Las evaluaciones de los sistemas y escenarios de degradación muestran variaciones del aporte anual actual de agua por escorrentía, percolación, evapotranspiración y generación de sedimentos en las microcuencas. El cambio de uso de suelo hacia la degradación de los sistemas crearía condiciones negativas en la calidad del agua, por el alto aporte de sedimentos a los afluentes de captación para el suministro de agua potable a las comunidades. La Tarifa de Protección del Recurso Hídrico siendo uno de los incentivos de actores con poder de planificación contribuye al fortalecimiento de la gestión para la protección y conservación del recurso hídrico en Costa Rica.

Palabras clave

CUBHIC, PSAH, agua, sedimentos, cobertura forestal, mapa de actores.

Abstract

The implementation of green infrastructure such as soil and water conservation projects at the local level is important in the integrated management of water resources due to the preventive and corrective measures that they offer in the search for the sustainability of water resources. The contributions of water and sediments in the forest, established plantation and reforestation systems in the upper part of the micro-basins of the Río Segundo and Río Ciruelas within the payment program for water environmental services of the ESPH, can be calculated with the quantification tool of hydrological benefits of intervention in basins (CUBHIC). The evaluations of the degradation systems and scenarios show variations in the current annual contribution of water by runoff, percolation, evapotranspiration, and sediment generation in the micro-basins. The change of land use towards the degradation of the systems would create negative conditions in the quality of the water, due to the high contribution of sediments to the catchment tributaries for the supply of drinking water to the communities. The Water Resource Protection Fee being one of the incentives of actors with planning power to contribute to the strengthening of management for the protection and conservation of water resources in Costa Rica.

Key Words

CUBHIC, PSAH, water, sediments, forest cover, map of actors.

Introducción

La implementación de proyectos de conservación a nivel local y la interacción entre actores pertinentes para su escalamiento son importantes en la gestión integrada de los recursos hídricos por las medidas preventivas y correctivas, que ofrecen en la búsqueda de la sostenibilidad del recurso hídrico en el tiempo. La seguridad hídrica que es definida como “la disponibilidad de agua en aceptable cantidad y calidad para la salud, las actividades humanas, los ecosistemas y la producción, junto con un nivel aceptable de riesgos hídricos para las personas, el ambiente y las economías” (Grey y Sadoff. 2007), es de interés mundial y tiene retos relacionados a la escasez, exceso, calidad inadecuada y el riesgo de afectación a la resiliencia de los sistemas de agua dulce (OECD 2013). Factores como la disponibilidad, variabilidad y distribución de los recursos hídricos, el entorno socioeconómico y los cambios futuros por el cambio climático serán determinantes en las decisiones institucionales y la inversión de diferentes tipos y escalas de infraestructura necesarios para lograr la seguridad hídrica, además del desafío que enfrentan los científicos y múltiples actores siendo una oportunidad de comprender y gestionar estos cambios esperados (Grey y Sadoff 2007, Wheeler y Gober 2015).

La gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH), como un enfoque de manejo de los recursos hídricos, brinda soluciones para lograr la seguridad hídrica a través de la protección, conservación y restauración de los ecosistemas asegurando los servicios ecosistémicos del agua a través del uso sostenible y gestión eficiente del agua, la tierra y otros recursos vinculados teniendo como unidad integradora de gestión a la cuenca hidrográfica (GWP 2013, Ait-Kadi 2013). Costa Rica cuenta con una base sólida en la política nacional en materia de gestión del recurso hídrico (MINAE et al. 2022) y se desarrollan acciones para garantizar la disponibilidad de los recursos hídricos en el tiempo, implementando instrumentos económicos como lo es el canon de aprovechamiento de aguas (Decreto Ejecutivo N. 32868 2005), el Programa de Pago por Servicios Ambientales (PPSA) del Fondo de Financiamiento Forestal (FONAFIFO) del Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE) y la tarifa para la protección del recurso hídrico (TPRH) de la Empresa de Servicios Públicos de Heredia (ESPH) implementada desde el año 2000.

La ESPH como precursora de la tarifa hídrica permitió que la Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos (ARESEP) sentara las bases para la implementación de la metodología tarifaria para la protección del recurso hídrico, la cual busca la aplicación a los abonados de los operadores de agua regulados por esta entidad. Este esquema permite su inversión en múltiples tipos de proyectos (CEDARENA y ARESEP 2019), por ejemplo, el Pago por Servicios Ambientales Hídricos (PSAH) para la protección y conservación de bosques, áreas en regeneración natural, reforestación y plantaciones establecidas, también la adquisición de fincas para protección, estudios hidrológicos e hidrogeológicos, entre otros, en zonas de recarga hídrica (Solano 2010, ESPH 2020).

La protección de las zonas de recarga hídrica como estrategia de gestión proveen a las poblaciones servicios ecosistémicos como el de abastecimiento del agua para el consumo humano, actividades agropecuarias y ecosistemas acuáticos, también, servicios de regulación del agua y del ciclo hidrológico previendo la erosión, además de los servicios de apoyo en la existencia de diferentes hábitats en las zonas de recarga acuífera (Pérez de Madrid et al. 2019).

En un estudio realizado en 20 plantas de tratamiento de agua potable en Costa Rica, enfocado en examinar la importancia de la protección de los bosques para los servicios de purificación del agua, se encontró evidencia que la conservación de bosque puede incrementar la calidad del agua y disminuir la cantidad de químicos necesarios para el suministro de agua potable,

además que la contribución por hectárea de los bosques aumenta a medida que disminuye el tamaño de la cuenca (Piaggio y Siikamäki 2021). Otros estudios coinciden en que las coberturas forestales tienen diversos efectos en la cantidad, calidad del agua de captación, escorrentía y generación de sedimentos que dependen de la variación temporal por la precipitación (Franco y Pascual 2020, Mohammad y Adam 2010).

Además, condiciones como las formaciones geológicas, material parental, textura del suelo alto contenido de materia orgánica, profundidad efectiva de los suelos permiten el almacenamiento y transporte de agua hacia los acuíferos y afluentes (USDA 2007, Madrigal-Solís et al. 2017, Rawls et al. 2003). Un cambio de uso de suelo que conlleve a la degradación de este afectaría la disponibilidad del agua, influenciaría en la regulación de temperatura a escala local y emisión de gases de efecto invernadero (Ellison et al. 2017).

Las estrategias de gestión requieren del trabajo conjunto de diferentes actores relevantes en la protección y conservación del recurso hídrico como los entes públicos, operadores de agua, ONG, grupo de productores entre otros donde convergen en la implementación de acciones como la implementación de la TPRH, compra de terrenos, educación ambiental, entre otras. para la sostenibilidad del recurso hídrico en las microcuencas del río Ciruelas y río Segundo. Estos esfuerzos forman parte de procesos complejos, por lo que el conocimiento de los intereses, percepciones, perspectivas, barreras, oportunidades y acciones desarrolladas son importantes para el escalamiento de las diversas acciones impulsadas e implementadas por los actores y que según (Pozo Solís 2007) conocer estos procesos permiten tener una representación real de las relaciones entre diversos actores que intervienen en una iniciativa como la conservación del recurso hídrico.

Con el fin de entender los efectos de la implementación de algunas modalidades de proyectos dentro del programa de PSAH de la ESPH financiado por la TPRH en la parte alta de las microcuencas del río Segundo y río Ciruelas esta investigación plantea los siguientes objetivos: a) cuantificar los aportes de agua y suelo de tres sistemas de cobertura forestal y comparar los montos de compensación en relación a la generación de suelo, b) recopilar y analizar el estado de implementación de las prácticas de conservación de suelos y agua, c) elaborar recomendaciones para fortalecer la implementación de las prácticas de conservación de suelos y agua.

Esta investigación pretende aportar información valiosa para avanzar en las iniciativas de cuantificación los beneficios potenciales en el caudal base y reducción de sedimentos a nivel local generados por los bosques, plantaciones forestales establecidas y áreas reforestadas, utilizando la calculadora de beneficios CUBHIC de Forestación y Conservación de Bosque.

Asimismo, esta investigación se enmarca en la demanda por parte de la comunidad científica e institucional por encontrar, analizar y adaptar a las condiciones tropicales nuevas herramientas efectivas y prácticas de cuantificación de procesos hídricos, donde los resultados sean útiles para la toma de decisiones y proyecciones futuras sobre la implementación de proyectos de conservación del recurso hídrico.

Metodología

Ubicación y descripción del área de estudio

El área de estudio forma parte de las microcuencas del río Ciruelas y río Segundo, en la provincia de Heredia. Ambas microcuencas drenan a la subcuenca del río Virilla y esta, a su vez, es un afluente de la cuenca del río Grande de Tárcoles, ubicada en el sector central y occidental del valle central de Costa Rica que se extiende sobre la vertiente del pacífico (Figura 1).

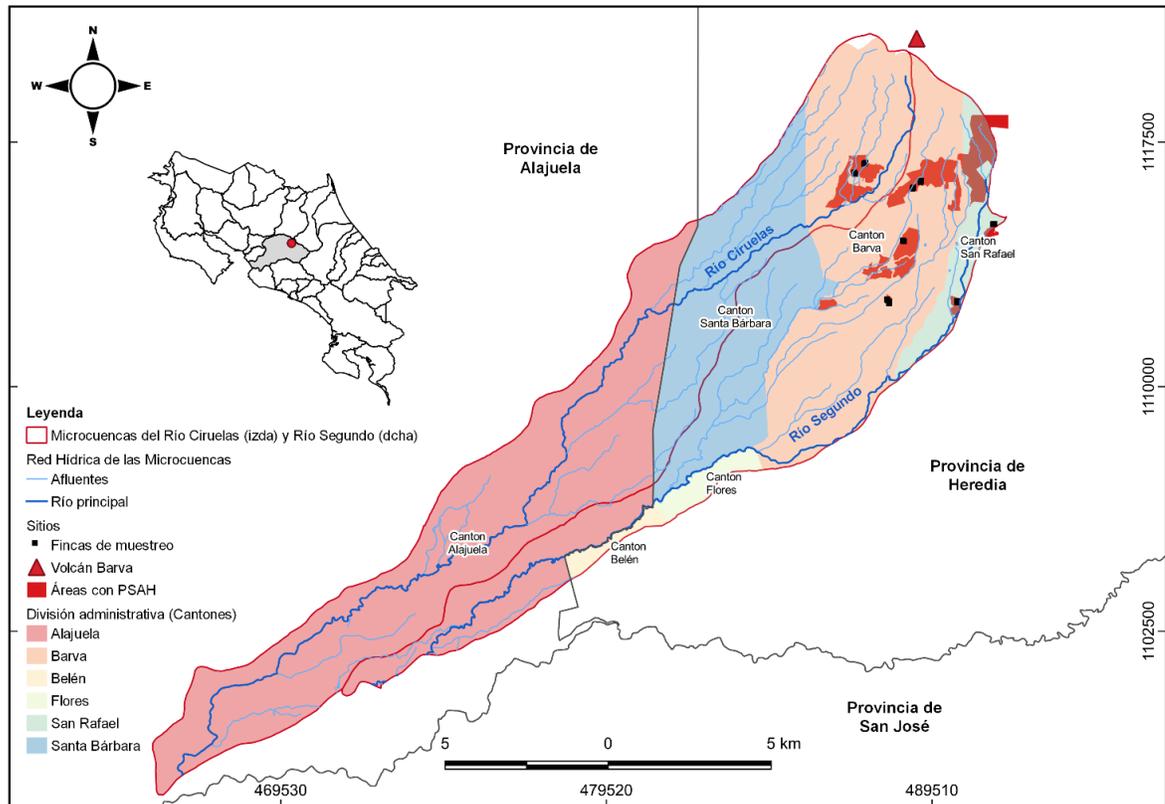


Figura 1 Mapa de localización de las microcuencas del río Ciruelas y río Segundo mostrando los ríos principales, afluentes, división administrativa y sitios de muestreo del área de estudio.

El área de estudio se ubica desde los 1 500 m s. n. m. hasta los límites de la zona inalienable de la Ley 65 del 30 de julio de 1888 y el Parque Nacional Braulio Carrillo, específicamente entre las coordenadas aproximadas 480000-492000 y 1109290-1121480 del sistema de coordenadas de referencia CR05/CRTM05. Comprende específicamente fincas bajo contrato por servicios ambientales hídricos en las modalidades de conservación de bosques, reforestación y plantaciones establecidas de la Empresa de Servicios Públicos de Heredia S. A. (ESPH) en los cantones de Barva y San Rafael.

Los materiales geológicos, que constituyen el área de estudio son rocas ígneas volcánicas, coladas de lava, lahares y cenizas volcánicas del Cuaternario, comprende la formación Barva y presenta una baja susceptibilidad de deslizamiento (Ramírez Chavarría 2014, Rojas 2011). La zona está compuesta por suelos de orden andisoles, según Mata-Chinchilla y Castro-Chinchilla (2019) y acorde con la clasificación de las zonas de vida de Holdridge se presenta un bosque muy húmedo montano bajo (bmh-MB) (Rojas 2011).

Se identifican dos épocas climáticas, la seca que va de diciembre a abril y la lluviosa que comprende los meses de mayo hasta noviembre, con un veranillo a finales de junio o principios de julio. La precipitación media anual varía entre 3 000 mm a 4 000 mm y a temperatura anual varía desde 14 a 18 °C en promedio.

La topografía del área de estudio tiene rangos de elevación entre 1 627 - 2 070 m s. n. m. m., siendo el volcán Barva el lugar de referencia con mayor altitud con 2 906 m. La parte alta y media del área de estudio presenta una topografía con pendientes mayores a 30% y en la parte baja las pendientes son menores del 20%.

Metodología de Cuantificación de Beneficios Hidrológicos

Los aportes de agua y suelo se estiman con la calculadora CUBHIC (Cuantificación de Beneficios Hidrológicos de Intervención en Cuencas) con la finalidad de conocer los beneficios hídricos relacionados a los tres sistemas de cobertura forestal. CUBHIC considera las ecuaciones del balance hídrico y la pérdida del suelo para el cálculo de beneficios de escorrentía, percolación, evapotranspiración y pérdida de suelo, también cuenta con la opción de análisis de costo eficiencia si se conocen los costos de implementación de los proyectos (Foster et al. 2020). Esta evaluación se realizó para los sistemas de bosques, plantación y reforestación y en tres escenarios de cambio de uso de suelo de degradación de los sistemas siendo estos matorral, pastizales y suelo desnudo para poner en contexto los efectos que tienen la protección y conservación de los sistemas.

Unidad de muestreo

Para determinar las características de suelo y cobertura forestal de cada sistema se seleccionaron aleatoriamente 9 fincas, 3 fincas por cada sistema. Se evaluó la textura, capacidad de campo (CC), punto de marchitez (PM), pendiente, cobertura del suelo, estructura vertical y cobertura del dosel. Para ello se establecieron parcelas de 50 m de largo y 20 m de ancho (1000 m²) en un solo periodo de muestreo; la parcela principal se dividió en subparcelas de 10 m x 10 m para la toma de muestras de manera sistemática.

Características del suelo

La toma de muestras de suelo para la determinación de la textura consistió en el uso de una pala donde se hizo un hoyo en forma de V y a una profundidad de 20 cm se tomó la muestra, se eliminó el material de los bordes de la pala, y fueron un total de 10 submuestras (Figura 2). La granulometría y textura fue determinada en laboratorio por el método de Bouyoucos.

Las muestras para el análisis de CC y PM fueron tomadas en 3 puntos de la parcela de 1 000 m² (Figura 2), donde se insertó un cilindro metálico en la superficie del suelo, siendo antes eliminada la materia vegetal. El método de análisis fue de retención de humedad a 0,33 y 15 Bares de presión por 48 horas de muestras saturadas por 24 horas y seguido por el secado de las muestras en horno por 24 horas a 105 °C.

Para la estimación de cobertura de suelo se utilizó un marco con dimensiones de 0,5 m x 0,5 m. En cada subparcela se realizaron dos observaciones (Figura 2) y se estimó el porcentaje promedio de cobertura de suelo desnudo, rocas, hojarasca, materia vegetal y musgos de la parcela. Otras características del suelo como porcentaje de materia orgánica (MO), material parental y clasificación taxonómica de la USDA fueron extraídos de la base de datos de calicatas y mapa de suelos de Costa Rica (CIA-UCR 2013).

Características de la cobertura forestal

Se estimó el grado de heterogeneidad de la estructura vertical de los sistemas, calculando el índice promedio de cobertura forestal en varios estratos. En el centro de cada subparcela (Figura 2) se determinó el porcentaje de la cobertura en 5 estratos: 0-2 m, 2-9 m, 10-20 m, 20-30m, >30m. La altura se estimó de forma subjetiva, y se usó una escala con valores de 0, 1, 2, o 3 si el porcentaje de cobertura era de 0, 1-33, 34-66 y 67-100%, respectivamente (Thiollay 1992).

La cobertura del dosel fue estimada utilizando un densiómetro esférico convexo en 5 subparcelas (Figura 2). Con el instrumento nivelado, se contó el número de puntos iluminados dentro de cada uno de los cuatro puntos de cada cuadro, hasta un total del 96. Posteriormente, la suma de los puntos fue multiplicada por 1,04 para obtener el porcentaje de área no ocupada por dosel. La diferencia entre ese porcentaje y el 100% determinó el porcentaje estimado de la cobertura del dosel (Lemmon 1957).

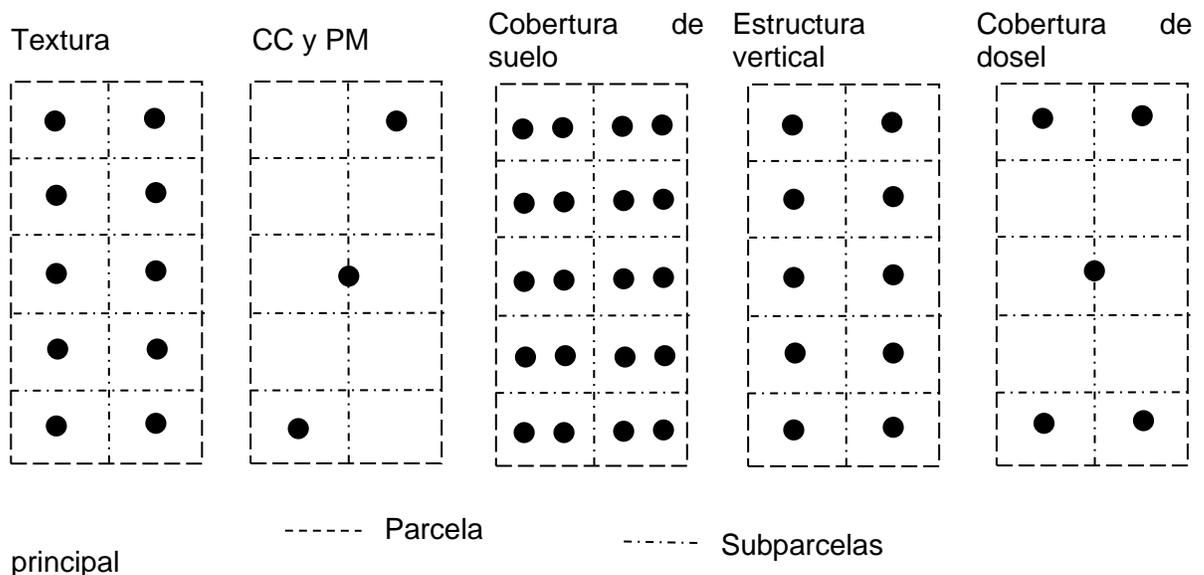


Figura 2 Diseño muestral de obtención de datos in situ para las variables de textura, capacidad de campo (CC), punto de marchitez (PM), cobertura de suelo, estructura forestal vertical y cobertura de dosel.

Datos de entrada CUBHIC

Otros valores de parámetros relacionados con el suelo y tipo de cobertura forestal fueron estimados mediante la utilización de programas, fórmulas y revisión bibliográfica.

Los valores para diferentes texturas de suelo, así como la CC y PM fueron reestimados con el programa Soil Water Characteristics versión 6.02.74 del Servicio de investigación Agrícola del Departamento de Agricultura de Estados Unidos desarrollado por Saxton y Rawls (2022) y donde se consideró la MO para obtener los valores de estas características del suelo. El factor K de USLE fue estimado utilizando la ecuación de Williams, citado por (Wawer et al. 2005).

Los valores de tipo de suelo, condición hidrológica y número de curva fueron calculados con el programa NUMCUR de la Universidad de Valladolid desarrollado por Hospital Villacorta et al. (2006), otros valores como albedo, índice de área foliar fueron estimados con imágenes

satelitales y revisión bibliográfica. Para las coberturas de suelo matorral y pastizales los valores utilizados fueron los predeterminados de la herramienta CUBHIC (Anexo 1).

Para el cálculo de número de curva se requirió información necesaria de textura de suelo, espesor de la hojarasca, espesor del humus y el grado de compacidad. El índice de área foliar (IAF/LAI) fue estimado utilizando imágenes satelitales descargadas de la plataforma de Google Earth Engine (GEE). El valor del albedo fue estimado con los rangos aproximados de superficies naturales según (Wang 2020) y factor C de USLE fue estimado con los valores descritos por (Linares et al. 2009).

Los coeficientes del modelo como el valor de la fracción de la cobertura nubosa (c) fue estimada según Soneye (2021) y el ajuste K según el diámetro estimado de las partículas del suelo relacionado a su textura (Foster et al. 2020, FAO 2009).

Los datos de variables climáticas fueron los adquiridos de la estación meteorológica Barva de la red de estaciones meteorológicas entre los volcanes Barva e Irazú de la Universidad Nacional (UNA-SIL), con base en su ubicación espacial, se realizaron promedios diarios de temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación para el periodo de 2017 - 2021.

Análisis de costo de los sistemas bosques, plantación establecida y reforestación

El análisis de costos contempló el monto de compensación del programa de pago del servicio ambiental hídrico (€/ha) y la producción de sedimentos (t/ha) como factores para la reducción de contribución de sedimentos en las microcuencas de río Segundo y río Ciruelas por parte de los sistemas en un periodo de 5 años, es decir, del 2017 al 2021. Los montos de inversión por cada sistema se estimaron promediando el pago realizado por la ESPH a las 3 fincas que conforman cada sistema, los montos a pagar están fijados en el Reglamento para el pago por Servicio Ambiental Hídrico Empresa de Servicios Públicos de Heredia S.A (2009) y ajustados a la tasa de inflación del Banco Central de Costa Rica.

El costo por tonelada de sedimento reducido se estimó dividiendo el costo total del pago por compensación por el volumen total de sedimento producido (toneladas) por los sistemas de bosque, plantación establecida y reforestación (Adeogun et al. 2018).

Actores y proyectos de conservación

Con la finalidad de recopilar y analizar el estado de las acciones implementadas en la protección y conservación del recurso hídrico en el área de estudio se realizaron entrevistas, revisión de literatura y un mapeo de actores.

La información primaria consistió en entrevistas semi estructuradas a actores identificados en el área de estudio e instituciones públicas. Esta información se complementó con revisión de literatura existente como leyes, documentación disponible en los sitios electrónicos de las instituciones sobre proyectos e iniciativas en la protección del recurso hídrico.

El mapeo de actores fue realizado con base en las propuestas de Pozo Solís (2007) y Ortiz et al. (2016), quienes definen al mapeo de actores como una representación real de las relaciones entre los actores que intervienen en una iniciativa. Este mapeo consistió en un proceso de cuatro fases donde, primero se clasificaron los actores, segundo se identificaron las funciones y roles de cada actor, tercero se realizó un análisis de los actores y cuarto se elaboró una representación gráfica del mapeo de actores.

Los actores fueron identificados mediante revisión bibliográfica y observación directa, se clasificaron en tres categorías: a) entes públicos como aquellas instituciones autónomas y

semiautónomas del estado, b) entes públicos no estatal como aquellos que desempeñan una función administrativa a pesar de que no son parte del estado y c) organismos de la sociedad civil independiente de la administración pública y sin fines de lucro.

Por otro lado, se describieron en una matriz los roles y funciones de cada actor, así como diferentes acciones desarrolladas en la conservación del recurso hídrico en Costa Rica, seguido de un análisis cualitativo frente a los procesos participativos en la conservación y protección del recurso hídrico. La representación gráfica del mapeo de actores incluyó las variables relacionales, decisiones y jurisdiccional para la conservación del recurso hídrico (cuadro 1).

Cuadro 1 Referencias de las variables jurisdiccional, relacional y niveles de decisión para el mapeo de actores

Variables		Referencias
Jurisdiccional	Nacional	Nacional
	Cantonal	Cantonal
	Zonal	Zonal
Relaciones	Colaboración	
	Tensión	
	Intermitencia	
	Ausencia de relación	Sin flecha
	Influencia sobre	
Decisiones	Decisiones de estrategia o planificación	N1
	Decisiones operativas	N2
	Decisiones según intereses	N3

Proceso metodológico

El esquema que se muestra a continuación representa gráficamente los procesos de la cuantificación de los beneficios hidrológicos realizados en la investigación (figura 3).

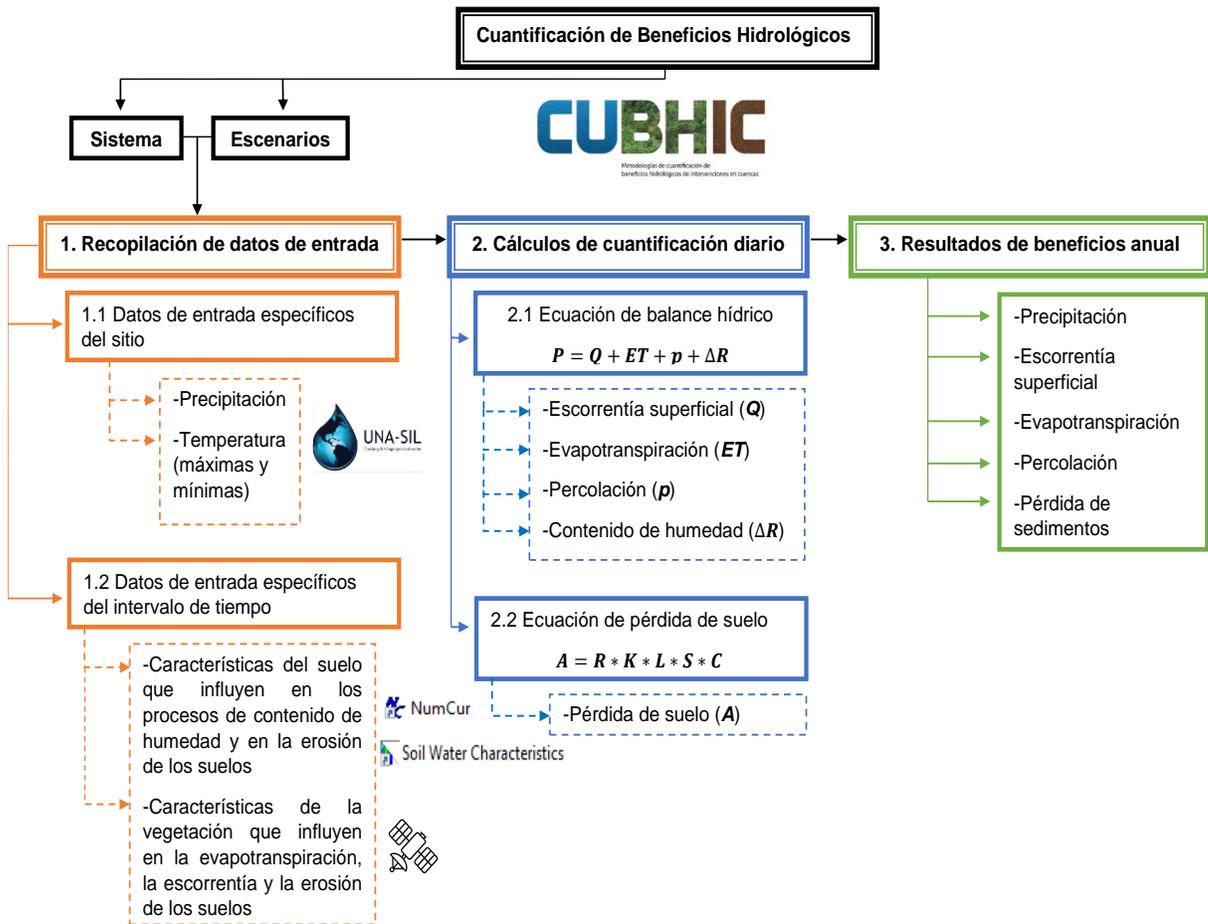


Figura 3 Proceso para el análisis de los beneficios de los proyectos de conservación con la metodología CUBHIC.

Resultados

Caracterización de los sistemas y escenarios evaluados

Bosque

El sistema bosque se encuentra a una altura de aproximadamente a 1 966 m s.n.m. y con un área aproximada de 195,83 ha, presenta suelos de orden andisoles, textura franco-arenosa y un rango de pendiente de 30 – 60%. Está conformado por bosques secundarios y cuenta con cuatro estratos definidos de estructura vertical con mayor cobertura en el estrato de 2-10 m con un índice de 2,5 de cobertura forestal, además presenta una cobertura promedio de dosel de 88%. Las características del suelo y cobertura forestal se muestran en los cuadros 2 y 3.

Cuadro 2 Características de suelo del sistema bosque secundario evaluado en las microcuencas del río Segundo y río Ciruelas.

Pendiente promedio (%)	Granulometría (%)			Textura	MO (%)	CC (%)	PM (%)	Humus (cm)	Hojarasca (cm)
	Arena	Limo	Arcilla						
43,1	57	36	7	Franco arenoso	6,8	25,1	10,3	15	0,3

Cuadro 3 Características de la cobertura forestal del sistema de bosque secundario evaluado en las microcuencas del río Segundo y río Ciruelas.

Luz	Densidad del dosel (%)	Cobertura	Índice promedio de cobertura forestal					Cobertura de suelo (%)			
			0-2 m	2-10 m	10-20 m	20-30 m	>30 m	Suelo desnudo	Hojarasca	Materia Vegetal	Musgos
12	88		1,6	2,5	2	0,1	0	16,00	63,75	18,58	1,67

Plantación establecida

El sistema de plantación establecida se encuentra a una altura de aproximadamente a 1 826 m s.n.m y con área aproximada de 41,98 ha, presenta suelos de orden andisoles, textura franco-arenosa y un rango de pendiente de 15– 30 %. Está conformado por plantaciones en su mayoría de Ciprés (*Cupressus lusitanica*) y cuenta con tres estratos definidos de estructura vertical con mayor cobertura en los estratos de 0-2 m y 2-10 m con índice de 1,95 de cobertura forestal, además presenta una cobertura promedio de dosel de 84%. Las características del suelo y cobertura forestal se muestran en los cuadros 4 y 5.

Cuadro 4 Características de suelo del sistema plantación establecida evaluado en las microcuencas del río Segundo y río Ciruelas.

Pendiente promedio (%)	Granulometría (%)			Textura	MO (%)	CC (%)	PM (%)	Humus (cm)	Hojarasca (cm)
	Arena	Limo	Arcilla						
15,8	54	39	7	Franco arenoso	6,8	25,8	10,3	1	0

Cuadro 5 Características de la cobertura forestal del sistema de plantación establecida evaluado en las microcuencas del río Segundo y río Ciruelas.

Densidad del dosel (%)		Índice promedio de cobertura forestal					Cobertura de suelo (%)			
Luz	Cobertura	0-2 m	2-10 m	10-20 m	20-30 m	>30 m	Suelo desnudo	Hojarasca	Materia Vegetal	Musgos
16	84	2	1,9	0,7	0	0	18,67	35,58	39,50	6,25

Reforestación

El sistema de reforestación se encuentra a una altura de aproximadamente a 1 886 m s.n.m. y con área aproximada de 8,37 ha, esta área presenta suelos de orden andisoles, textura franco-arenosa y un rango de pendiente de 15– 30 %. Está conformado por especies como el Jaúl (*Alnus acuminata*), Ciprés (*Cupressus lusitanica*) y Gravilea (*Grevillea robusta*) y cuenta con tres estratos definidos de estructura vertical con mayor cobertura en el estrato de 0-2 m con índice de 2,2 de cobertura forestal además presenta una cobertura promedio de dosel de 92%. Las características del suelo y cobertura forestal se muestran en los cuadros 6 y 7.

Cuadro 6 Características de suelo del sistema reforestación evaluado en las microcuencas del río Segundo y río Ciruelas.

Pendiente promedio (%)	Granulometría (%)			Textura	MO (%)	CC (%)	PM (%)	Humus (cm)	Hojarasca (cm)
	Arena	Limo	Arcilla						
17,2	61	32	7	Franco arenoso	6,8	24,6	10,9	10	0,1

Cuadro 7 Características de la cobertura forestal del sistema de reforestación evaluado en las microcuencas del río Segundo y río Ciruelas.

Densidad del dosel (%)		Índice promedio de cobertura forestal					Cobertura de suelo (%)			
Luz	Cobertura	0-2 m	2-10 m	10-20 m	20-30 m	>30 m	Suelo desnudo	Hojarasca	Materia Vegetal	Musgos
8	92	2,2	1,9	1,7	0	0	13,67	68,00	15,08	3,25

Los resultados muestran las variaciones en los parámetros de suelo y cobertura forestal en diferentes sistemas. La pendiente varía desde 15,8% en el sistema de plantaciones establecidas a 43,1% en el sistema bosque. Según MAG-MIRENEM (1994) son pendientes clasificadas como onduladas a fuertemente onduladas.

Los sistemas de bosque y reforestación muestran valores cercanos entre sí. El porcentaje de suelo desnudo varía entre 12% - 16%, además entre 60% - 70% del suelo se encuentra cubierto por hojarasca y hasta un 20% de cobertura con materia vegetal y musgos. El sistema de plantación establecida está cubierto en un 39,50% de materia vegetal verde, 6,25% de musgos, 35,58% de hojarasca y tiene 18,67% de suelo desnudo. El sistema bosque tiene 4 estratos, mientras que las plantaciones establecidas y la reforestación tienen 3 estratos

definidos, siendo los estrados de 0-2 m y 1-10 m con mayor índice de cobertura forestal. El sistema de bosque tiene entre 34-66% de cobertura forestal por encima de los 10 m de altura en comparación con los sistemas de plantación establecida y reforestación.

En los cuadros 8 y 9 se muestran variaciones en los parámetros relacionados con las características de la vegetación y del suelo para diferentes sistemas y escenarios de degradación de uso de suelo, estos valores fueron los ingresados a la herramienta CUBHIC para el cálculo de los beneficios hidrológicos. Las características del suelo como la textura, MO, CC, PM, tipo de suelo no varían entre sistemas, mientras que el humus y hojarascas son relevantes para la clasificación de la condición hidrológica y número de curva de los sistemas. El índice de área foliar varía de 3,8 en bosque a 0 en el escenario de suelo desnudo. Esto indica que hay un gradiente del LAI según el tipo de sistema, donde valores bajos representan doseles menos densos y valores más altos corresponden a doseles más densos. También se muestra un gradiente de variación para el albedo en un rango de 0,11 a 0,6, donde valores entre 0,1 a 0,2 corresponden a suelos oscuros y ásperos (Wang 2020).

Cuadro 8 Parámetros relacionados a las características de la vegetación y del suelo para los sistemas de bosque, plantación establecida y reforestación.

Parámetros	Bosque	Plantación establecida	Reforestación
Tipo de suelo	B	B	B
Condición hidrológica	IV	III	IV
Número de Curva	52	60	52
Prof. efectiva en mm	1 811	1 544	1 811
Factor K de USLE	0,142	0,142	0,14
Índice de Área Foliar (LAI)	3,8	3,6	3,7
Albedo (fracción)	0,11	0,13	0,12
Factor C de USLE	0,006	0,05	0,01

Cuadro 9 Parámetros relacionados a las características de la vegetación y del suelo para los escenarios de degradación de los sistemas.

Parámetros	Matorral	Pradera	Suelo desnudo
Tipo de suelo	B	B	B
Condición hidrológica	Pobre	Pobre	Pobre
Número de Curva	70	77	82
Factor K de USLE	0.13	0.13	0.13
Índice de Área Foliar (LAI)	2	1	0
Albedo (fracción)	0,2	0,21	0,6
Factor C de USLE	0,072	0,1	1



Figura 4 a) Sistema de bosque en Los Ángeles, San Rafael; b) Sistema de plantación establecida en San José de la Montaña, Barva; c) Sistema de reforestación en San José de la Montaña, Barva.

Quantificación de beneficios hídricos

Los tres sistemas evaluados mostrados en la figura 4, suman un total de 246,18 hectáreas, de los cuales se obtuvieron los siguientes resultados, la escorrentía en promedio es de 126,35 mm/año, la percolación es de 2 445,88 mm/año, evapotranspiración es de 1 344,92 mm y pérdida de suelo anual de los tres sistemas suman un total de 13,02 t/ha. El gráfico de beneficios hídricos de sistemas (figura 5) muestra patrones similares del porcentaje de variación en la evapotranspiración (33,69% - 34,99%) y percolación (61,79% - 63,10%). La escorrentía muestra valores iguales en los sistemas de bosque y reforestación con 2,58% y el sistema de plantación establecida aporta el doble (4,52%) respectos a los otros sistemas. La pérdida de sedimento varía de 9,67% en el sistema de reforestación, 26,24% en bosque hasta 64,09% en plantación establecida.

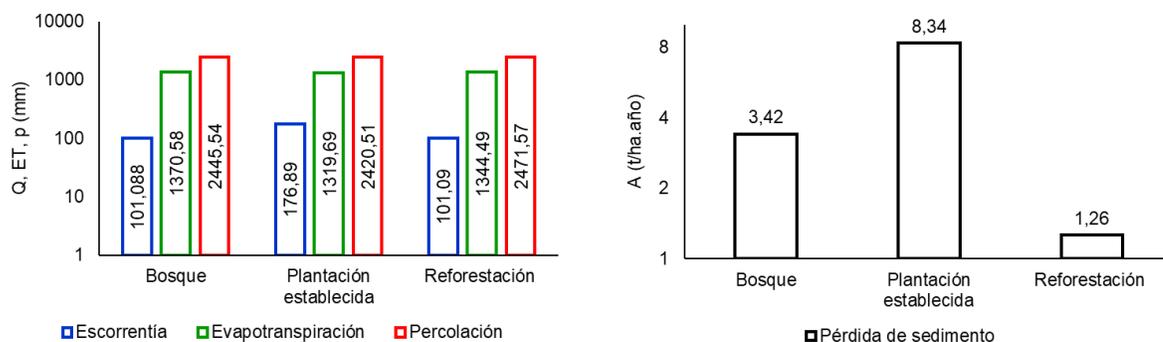


Figura 5 Beneficios hídricos de escorrentía (Q), evapotranspiración (ET), percolación (p) y pérdida de sedimentos (A) para los sistemas de bosque, plantación establecida, y reforestación. Los datos en los gráficos son representados en escala logarítmica de base 10.

Escenarios de degradación de sistemas

Los escenarios de degradación implicaron el cambio de uso de suelo de cada sistema hacia tres usos de suelos degradados siendo estos matorral, pastizales y suelo desnudo. Donde las variables de Q, ET, p, A fueron determinantes para realizar la comparación entre sistemas y escenarios, además de poner en contexto los efectos que tienen la protección y conservación de los sistemas.

Los beneficios hídricos de escenarios (figura 6) muestran patrones similares de escorrentía, evapotranspiración, percolación y pérdida de suelo. En todos los escenarios, los valores de la escorrentía aumentan y los de percolación se mantienen muy similares. Por otro lado, la evapotranspiración disminuye entre escenarios, esto indica que existe un gradiente de la ET según el tipo de cobertura de suelo donde valores bajos muestran menos transpiración de la cobertura. Entre los escenarios de degradación, el suelo desnudo tiene generación de sedimentos superiores a los escenarios de matorral y pradera.

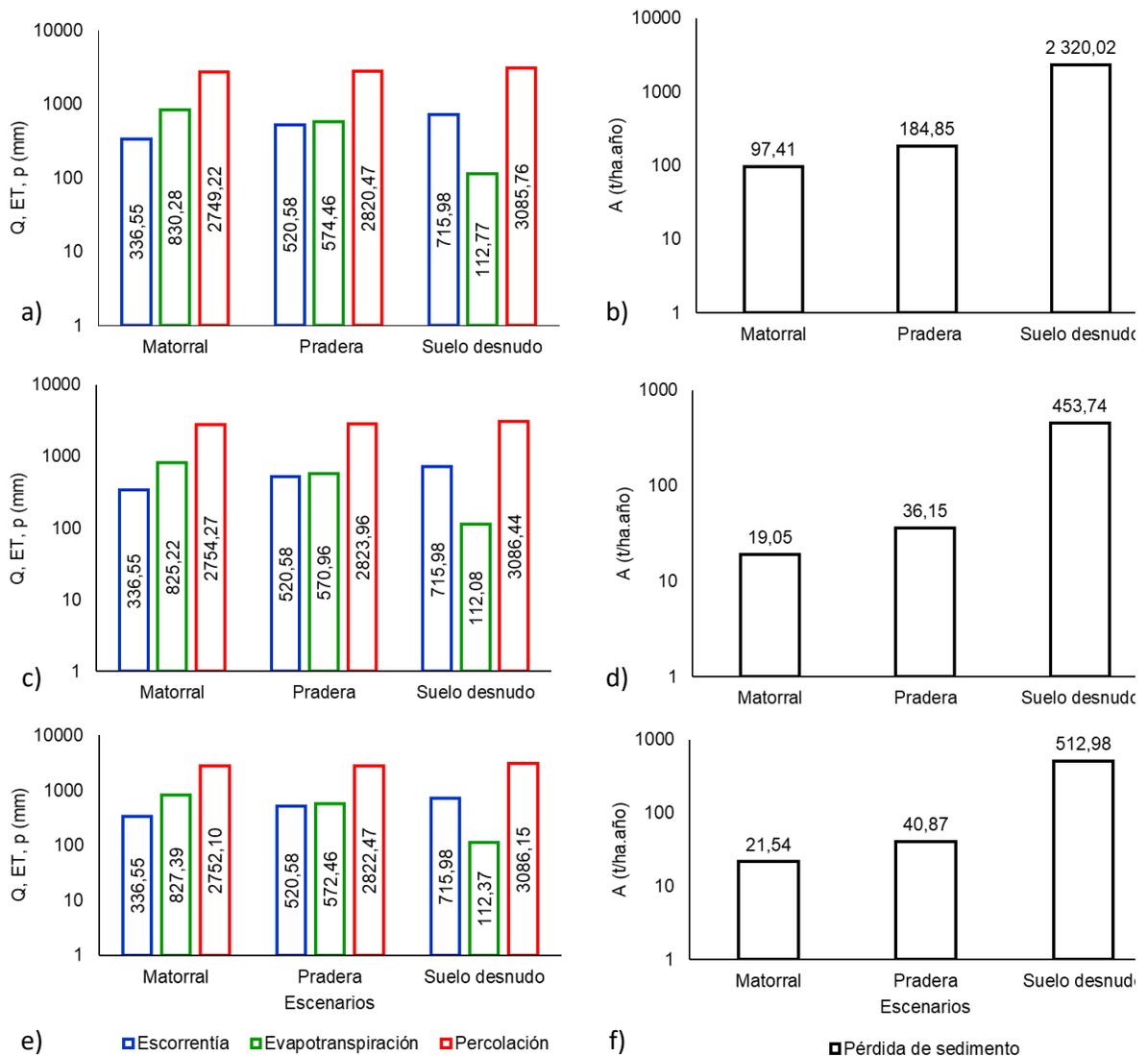


Figura 6 Beneficios hídricos de escorrentía (Q), evapotranspiración (ET), percolación (p) y pérdida de sedimentos (A) para los escenarios de degradación de los sistemas de bosque (a, b), plantación establecida (c, d), y reforestación (e, f). Los datos en los gráficos son representados en escala logarítmica de base 10.

Análisis de costo de los sistemas bosques, plantación establecida y reforestación

La producción anual de sedimento se estimó para bosque en 3,42 t/ha/año, plantación establecida en 8,34 t/ha/año y 1,26 t/ha/año para reforestación. Estos valores son equivalentes a 17,08 t/ha (bosque), 41,72 t/ha (plantación establecida) y 6,29 t/ha (reforestación) para los 5 años considerados.

El costo total invertido por la conservación y protección de bosque se estimó en ₡617 214,75 (\$1 098,20) para el sistema bosque, ₡620 380,84 (\$1 103,84) plantación establecida y ₡511 942,91 (\$910,89) reforestación según datos proporcionados por la ESPH. El costo de reducir una tonelada de sedimento (figura 7) fue estimado en ₡36 094,43 (\$64,22) para bosque, ₡14 877,24 (\$26,47) para plantación establecida y ₡81 260,78 (\$144,59) para reforestación.

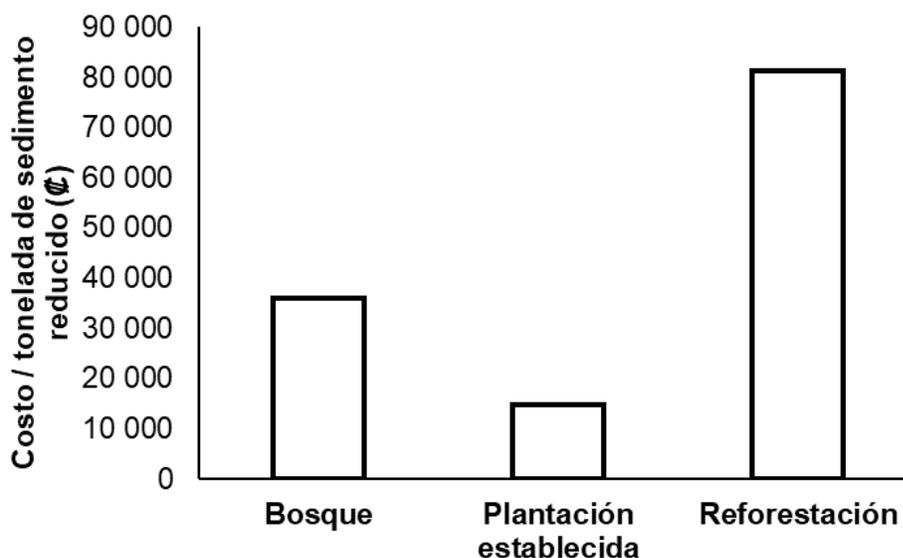


Figura 7 Comparación de los costos de sedimento reducido para los sistemas de bosque, plantación establecida y reforestación en las microcuencas del río Segundo y río Ciruelas.

Actores relevantes en la implementación de proyectos de conservación

El mapeo de actores permitió identificar diez actores relevantes en el área de estudio siendo ellos la ESPH, ASADAS, FASHA, ARESEP, MINAE-SINAC-DA, AyA, gobierno local-ICA, grupo de productores, ONG y empresas privadas. De los actores identificados se clasificaron 4 entes públicos, 3 entes públicos no estatales y 3 organizaciones de la sociedad civil (cuadro 10).

Entre los actores clasificados como entes públicos, estos tienen diversas funciones respecto al recurso hídrico, tales como administrador, regulador y operador. Existen dos actores con la función de operador de agua dentro del grupo de entes públicos no estatales, indicando los distintos proveedores de agua potable a las comunidades.

Por otro lado, del grupo de organizaciones de la sociedad civil, dos actores funcionan como actores claves en la generación de bienes y servicios del sector económico siendo estos los grupos de productores y las empresas privadas. Las ONG se desempeñan como entes integradores de los sectores públicos privados con el fin de la sostenibilidad del recurso hídrico (cuadro 10). Considerando los niveles de decisión ejercida se clasifican 5 actores con

decisiones operativas, 3 actores con decisiones según intereses y 2 actores con decisión de estrategia o planificación.

Cuadro 10 Matriz de funciones y roles de actores identificados en el área de estudio relacionados con la conservación y protección del recurso hídrico

Actor	Rol en la conservación del recurso hídrico
Entes públicos	
Ministerio de Ambiente y Energía – Dirección de Agua – Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC)	La Dirección de Agua tiene la función de administrar el recurso hídrico de Costa Rica en el uso, control y aprovechamiento de los cuerpos de aguas y cauces, por ejemplo, el otorgamiento de concesiones de uso de agua, mientras que la función del SINAC se centraliza en la gestión, coordinación y ejecución de políticas con la finalidad de la sostenibilidad de los recursos naturales, por ejemplo, la protección y conservación de uso de cuencas hidrográficas y sistemas hídricos.
Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos (ARESEP)	La ARESEP es la institución pública encargada de fijar precios y tarifas sobre el suministro del servicio de agua potable, además de impulsar la Tarifa para la Protección del Recurso Hídrico (TPRH) con el fin de financiar proyectos para la conservación de cuenca hidrográficas, ríos y acuíferos.
Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA)	La AyA es la institución responsable de la provisión de agua de calidad potable a los habitantes de Costa Rica, además de la conservación de las cuencas hidrográficas y protección ecológica con la implementación de TPRH y promoción de la TPRH en las ASADAS.
Gobierno local – Inspector Cantonal de Aguas (ICA)	El ICA tiene formalmente la función de resolución administrativa de diferencias y conflictos entre particulares por el aprovechamiento de manantiales, aguas corrientes y subterráneas.
Entes públicos no estatal	
Empresa de Servicios Públicos de Heredia (ESPH S. A.)	La Empresa es una operadora de agua que cuenta con una tarifa de protección del recurso hídrico la cual es invertida en el programa PROCUENCAS (programa para la conservación y protección de microcuencas de los ríos Ciruelas, Segundo, Bermúdez, Tibás, Pará y Las Vueltas) y PRIAGIRH (Programa de Investigación Aplicada a la Gestión Integrada del Recurso Hídrico), con esto busca brindar un servicio de calidad en el sector de agua, y otros como energía, saneamiento, infocomunicaciones aportando valores y desarrollo a la sociedad mediante la mejora continua de su gestión.
Asociaciones Administradoras de Sistemas de Acueductos y Alcantarillados Comunales (ASADAS)	Las asociaciones prestan los servicios de agua en las áreas rurales y periurbanas, tienen la responsabilidad de la edificación, administración, operación y cuidado de los acueductos rurales (función delegada del AyA, como ente legal responsable de esos servicios), así como de la conservación y aprovechamiento racional de las fuentes de agua.

Federaciones ASADAS	de	Las federaciones coadyuvan a las ASADAS en la administración, operación y conservación de los acueductos, participan en la protección y vigilancia de las fuentes de abastecimiento, con el fin velar por la protección y conservación de las cuencas hidrográficas de la región de evitando la contaminación de estas.
Organizaciones de la sociedad civil		
Grupo de productores		Son aquellas personas que producen bienes y servicios en el sector agropecuario, turismo ecológico, donde algunos voluntariamente participan en programas de compensación económica para la protección del recurso hídrico.
Empresas privadas		Conforman el sector privado de la economía del país, que mediante proyectos de responsabilidad social implementan proyectos que aportan a la conservación de los recursos naturales.
ONG		Las organizaciones no gubernamentales son agentes que conforman y agrupan fuerzas de la interacción pública privada con el fin de la sostenibilidad del recurso hídrico en las áreas de incidencia.

Aspectos relacionales y de influencia entre actores

Se entrevistaron a 4 actores identificados, siendo estos la ESPH, ARESEP, FASHA, gobierno local-ICA. De los aspectos relacionales (figura 8) se identificó que la ARESEP tiene una relación de colaboración con los operadores de agua esto debido a la función institucional en la regulación y fijación de tarifas de los servicios que los operadores ofrecen, específicamente la relación entre ESPH y ARESEP parece ser sólida, debido a que la ESPH fue pionero en la implementación de la TPRH en el año 2000 y que desde el 2013, la ARESEP adoptó como estrategia de implementación de los demás proveedores con miras hacia la sostenibilidad del recurso hídrico.

Asimismo, la Federación de ASADAS de la zona norte de Heredia y Norte y Central de Alajuela cuenta con una relación de confianza con las ASADAS afiliadas dado a que su relación se centra en el intercambio y mejoramiento de experiencias en la administración y operatividad de las ASADAS ejemplos, los cursos de fontanería, desarrollo de los planes de seguridad del agua, curso de manejo de tuberías en alianzas con las comunidades, ASADAS y empresas privadas. También se identificó una relación de colaboración eventual entre la ESPH y MINAE-SINAC durante las actividades de evaluación y visitas de monitoreos a los proyectos.

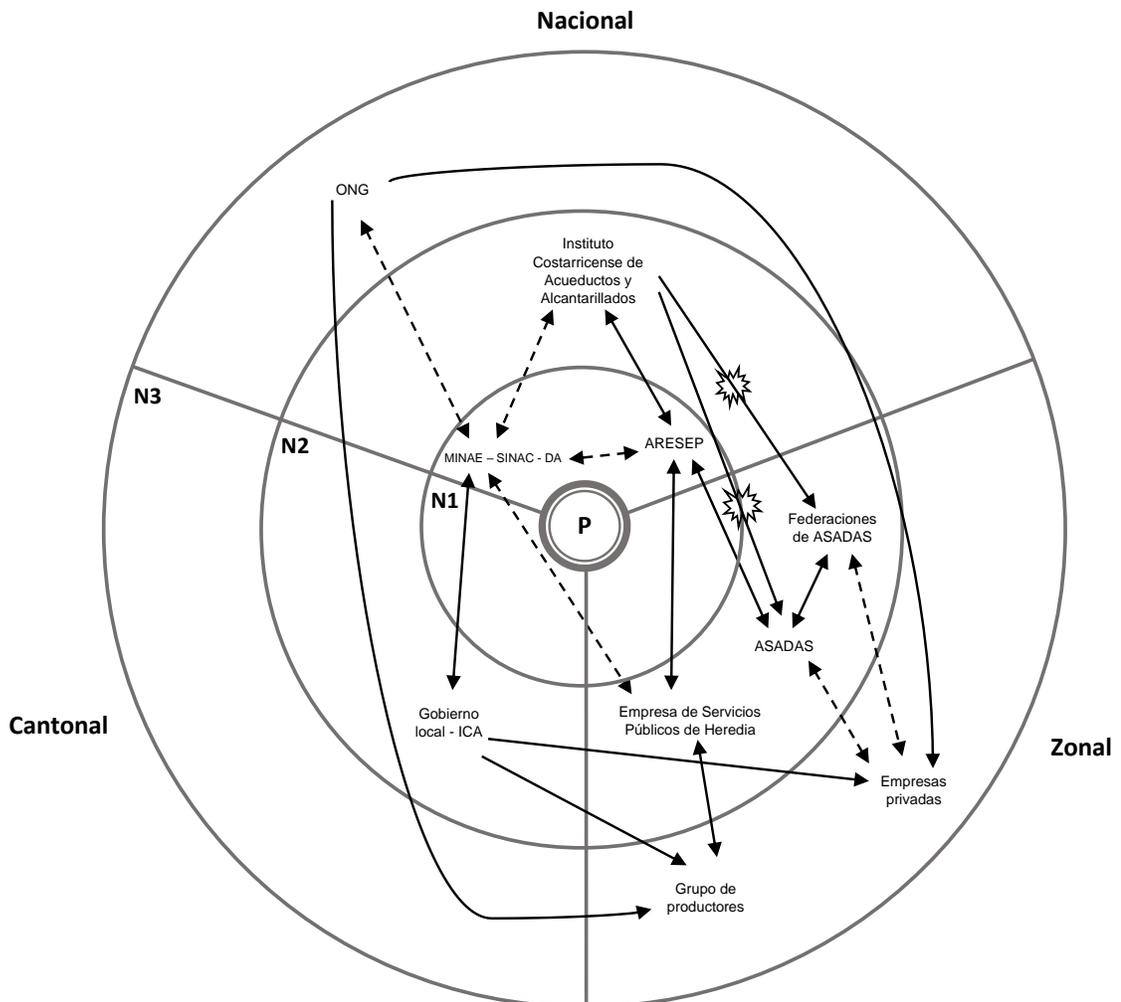
Entre los entes públicos se reconoce la existencia de comunicación intermitente por lo que se han realizado esfuerzos en el ordenamiento de competencias institucionales, específicamente entre las instituciones de MINAE-SINAC-DA, AyA y ARESEP en la estrategia de impulsar la TPRH en las ASADAS. Este tipo de relación intermitente se observa también entre los operadores de agua y las organizaciones de la sociedad civil donde solo realizan actividades periódicas relacionadas a la protección y conservación del recurso hídrico.

Se identificaron relaciones no exentas de tensión como lo es la relación entre las ASADAS y la AyA como ente rector técnico de los servicios de agua potable, saneamiento de aguas residuales debido a ciertas restricciones por reglamento en las acciones de necesarias para la gestión del recurso hídrico, ya que la responsabilidad de estos servicios públicos es delegada por la AyA a las ASADAS. Las Federaciones de ASADAS presentan una situación similar en

lo relacional, aunque no tan clara debido a la naturaleza de la conformación de federaciones donde existen restricciones como las de generar fondos para la implementación de acciones orientadas a la conservación del recurso hídrico. Otras razones por la que la relación entre estos actores no siempre es buena es debido a factores como la distancia, el apoyo limitado y prejuicios.

Por otro lado, se identifican 3 actores con alta influencia sobre la facilitación de acciones de conservación y protección del recurso hídrico. Los entes públicos tienen la capacidad de articular y planificar estrategias a nivel nacional y la ONG (sociedad civil) tiene la capacidad de colaborar con los entes públicos e influir sobre los productores y empresas privadas según los objetivos propios de la organización. La ESPH también presenta alta influencia a nivel zonal sobre los productores quienes participan voluntariamente en el programa de PSAH con un total de 42 contratos vigentes a la fecha. A nivel cantonal, el ICA tiene alta y útil influencia en la resolución de conflictos por motivos de aprovechamiento de las aguas provenientes de manantiales, afluentes y aguas subterráneas, así como reclamaciones provenientes del uso de las servidumbres, ya sean naturales, legales o establecida en contrato.

Figura 8 Representación gráfica del mapeo de actores con los aspectos relacionales, niveles



de toma de decisión y niveles jurisdiccionales teniendo como finalidad la conservación y protección hídrica (P).

Acciones implementadas para la protección y conservación del recurso hídrico

Los actores con decisiones operativas en la zona de estudio desarrollan actividades para la conservación del recurso hídrico como el Programa de PSAH en fincas con áreas de bosques, reforestación, áreas en regeneración natural y plantaciones establecidas implementado por la ESPH, la compra de terrenos por la ESPH y la ASADA San Rafael de Ojo de Agua. Otras actividades periódicas orientadas a la promoción de la nueva cultura del agua como la reforestación en terrenos comunitarios y propiedades privadas, educación ambiental en escuelas y colegios son realizadas por la ASADA de San José de la Montaña, Barva. Estos proyectos de conservación se encuentran ubicados en zona de recarga del acuífero de Barva y afluentes que abastecen a los operadores de agua para dar el servicio de agua potable a sus abonados.

Discusión

Con base en la metodología de cuantificación de beneficios hidrológicos de intervenciones en cuencas (CUBHIC), esta investigación provee información del aporte anual en escorrentía, evapotranspiración, percolación, generación de sedimentos de áreas con bosques, plantaciones establecidas y reforestaciones, además que los cambios en la cobertura de suelo alterarían los servicios ecosistémicos hídricos en los sistemas bajo PSAH.

Referente a la estructura del suelo y cobertura forestal

Los sistemas bosque, plantaciones establecidas y áreas reforestadas se encuentran sobre la formación Barva, constituida por los miembros Bermúdez, Bambinos y Los Ángeles, son suelos oscuros volcánicos de orden andisoles y material tobáceo con propiedades favorables para almacenamiento de agua y desarrollo de las raíces de las plantas (USDA 2007). Esto indica que las tobas permiten una recarga en promedio entre 830 mm/año hasta 1 700 mm/año del acuífero Barva (Madrigal-Solís et al. 2017).

Por otro lado, los sistemas son de textura franco-arenosa con alto contenido de materia orgánica, lo que destaca la contribución del humus y hojarasca como fuente de mayor retención de agua en el suelo (Rawls et al. 2003). Los sistemas están clasificados como suelos tipo B, con valores de profundidad efectiva por encima de 1 m, indicando que el potencial de generar escorrentía es bajo cuando estos se encuentren completamente húmedos, la pendiente no se considera como factor en la asignación del grupo hidrológico del suelo (USDA 2007).

Pese a que hay tres tipos de cobertura, existe poca diferencia entre las densidades de bosques, plantaciones establecidas y áreas reforestadas. En estos sistemas, se identifican tres estratos de dosel, teniendo mayor índice de cobertura de follaje el estrato de 2-10 m, además presentan valores entre 0,11 a 0,13 de la fracción de albedo. La presencia de varios estratos y valores bajos de albedo es el comportamiento esperado de las vegetaciones forestales debido a la penetración profunda y captura de la radiación solar entre las hojas y ramas dentro del dosel (Dobos 2020).

Referente al aporte actual de agua y suelo

La aportación anual de agua por escorrentía de los tres sistemas va de 26,7% hasta 46,7 % de las áreas de drenaje de cada sistema hacia los afluentes cercanos. Entre 32,7 % y 34,0% de agua es evapotranspirada por las diferentes coberturas forestales y de 33,0% a 33,7% de

agua es movida anualmente por percolación, a través del medio poroso, según Ramírez Chavarría (2014), las características como el material tobáceo, la profundidad de la estructura radicular y el alto potencial de recarga del área, aportarían a la recarga del acuífero Barva y afluentes.

La plantación establecida genera la mayor cantidad de sedimento por hectárea por año (8,34), esto puede ser debido a las condiciones de cobertura de suelo. Por otro lado, la reforestación genera menos sedimento anual que el bosque posiblemente por la acción de la pendiente de 43,1% en la escorrentía lo cual es respaldado por Liu et al. (2001) donde indica que factores como la pendiente y escorrentía influyen en la generación y erosión del suelo.

Estos resultados también fueron hallados en un estudio realizado al sur de Cisjordania por Mohammad y Adam (2010) donde la estimación temporal de escorrentía y sedimentación por acción de la precipitación en 5 diferentes usos de suelo (bosques plantados con *P. halepensis*, vegetación natural dominada por *S. spinosum*, vegetación natural donde sin *S. spinosum*, tierra cultivada y deforestación) determinaron que los bosques y vegetación natural previenen y minimizan el riesgo de escorrentía y erosión. Los resultados en estudio realizado en Costa Rica donde evaluaron en 20 plantas de tratamiento de agua potable, indica que la conservación de los bosques puede incrementar la calidad de agua y disminuir la cantidad de químicos necesario para el tratamiento de agua potable (Piaggio y Siikamäki 2021).

La capacidad de percolación, escorrentía y generación de sedimentos están relacionados con las características del suelo y las diferentes estructuras de la vegetación de los sistemas, esto a su vez es un indicador de calidad y cantidad de agua que según un estudio realizado por Franco y Pascual (2020) en la Reserva Forestal Protectora El Mamo, Colombia. La evaluación de la cantidad y calidad del agua de captación, y escorrentía en relación con diferentes coberturas (pastizales, plantación latifoliada, vegetación secundaria baja y bosque alto andino denso) determinó que la calidad del agua proveniente de la escorrentía superficial se ve afectada principalmente por las características físicas del suelo, además también este estudio indica que la cobertura del bosque aporta mejor calidad y cantidad de agua debido a la alta interceptación de la precipitación por las coberturas, estos mismos efectos podrían evidenciarse en los sistemas estudiados.

Referente a escenarios de cambio de uso de suelo

A causa de que las condiciones actuales de los sistemas de bosque, plantación establecida y reforestación son consideradas buenas debido a las condiciones de cobertura de suelo y forestal se establecieron las coberturas forestales de matorral, pastizal y suelo desnudo como los escenarios de degradación de cada uno de los sistemas. Los resultados muestran una tendencia positiva de percolación en el suelo que es facilitada por el tipo de suelo y condiciones geológicas (Madrigal-Solís et al. 2017, Rawls et al. 2003). Estos cambios de cobertura forestal conllevarían a una disminución de la evapotranspiración y aumento de la escorrentía (Marhaento et al. 2017).

La eliminación total de las coberturas forestales conllevaría a un alto aporte de sedimentos a los afluentes cercanos a los sistemas. El cambio de uso de suelo de bosque a suelo desnudo aportaría un total anual de 2 320,02 t debido principalmente a la influencia de la pendiente según Liu et al. (2001), en este mismo escenario, el sistema de plantación establecida pasaría de aportar 8,37 t a 453,74 t y hasta 512,98 t aportaría el sistema de reforestación por la eliminación de toda la cobertura forestal.

Las observaciones en los escenarios coinciden con los resultados de Bruijnzeel (2004) en donde con más de 80 estudios de tasa de erosión superficial en bosques tropicales y sistemas de cultivo de árboles, aunque con condiciones variables de tipo de suelo, se reporta que la

erosión aumenta cuando disminuye la cobertura vegetal, pero aumenta drásticamente con la eliminación total de la cobertura.

Aun cuando los resultados muestren alta disponibilidad de agua total (Q+p) en los escenarios, la calidad del agua se vería afectada por la disminución, eliminación de las coberturas y en un incremento considerable en la generación de sedimentos. Esto indica que las coberturas forestales tienen un efecto positivo en la calidad de agua (Hilary et al. 2021, Franco y Pascual 2020).

Referente al análisis de costo de los sistemas bosques, plantación establecida y reforestación

Los montos pagados por hectárea varían de acuerdo con el tipo de sistema ya sea bosque, plantación establecida o reforestación y estos montos son ajustados anualmente considerando la tasa de inflación del Banco Central de Costa Rica, esto indica que los pagos van en aumento hasta finalizar el contrato. El periodo de contrato para reforestación y conservación de bosques son de 10 años cada uno, para plantaciones establecidas la vigencia de contrato es de 5 años, según el Reglamento para el pago por Servicio Ambiental Hídrico Empresa de Servicios Públicos de Heredia S.A (2009). Cabe mencionar que los pagos se realizan anualmente según la vigencia de los contratos para bosques y plantación establecida, a diferencia de reforestación que los montos son pagados los primeros 5 años, pese a que la vigencia es de 10 años.

El impacto del sistema de bosque en el área de estudio mostró una reducción total de sedimentos en 17,08 t/ha esto es aproximadamente 26,24% de la producción total de sedimentos de los tres sistemas. Por otro lado, los resultados del sistema de plantación establecida indicaron una reducción total de 41,72 t/ha y el sistema de reforestación de 6,29 t/ha que en relación con la producción total de sedimentos de los tres sistemas son alrededor de 64,09% y 9,67% respectivamente. Estos resultados indican que existe un mayor pago de compensación en sistemas que aportan menos sedimentos hacia los afluentes de las microcuencas del río Segundo y río Ciruelas.

Los efectos de reducción total de sedimentos por cada sistema también son evidenciados en estudio realizado en el lago Jebba, Nigeria donde la aplicación de estrategias de manejo de sedimentos como barreras de piedras, reforestación y barreras naturales con vegetación autóctona, estas dos últimas estrategias redujeron en 63,4% y 65,6% respectivamente la producción de sedimentos en áreas críticas de erosión aguas arriba al lago. Por otro lado, el análisis de costos realizado en el mismo estudio determinó que la implementación de las estrategias de manejo de sedimentos es rentables y sostenible en comparación con los costos incurridos para afrontar el efecto por la sedimentación en el embalse (Adeogun et al. 2018).

Sobre la utilidad y limitaciones de CUBHIC

La herramienta CUBHIC permite separar los efectos hidrológicos a nivel local en diferentes tipos de cobertura forestal, dificultad que se presenta a niveles de cuencas según metaanálisis realizado por (Locatelli y Vignola 2009). También permite vincular el conocimiento hidrológico con iniciativas nacionales relacionadas a la compensación por conservación como el PSAH como apoyo a los marcos políticos que según Ellison et al. (2017) no suelen estar disponibles.

En el funcionamiento interno de CUBHIC, es de considerar que la herramienta es sensible a subestimar o sobre estimar el cálculo de la percolación y el cálculo de la pérdida de sedimentos debido a los valores de las constantes de radiación de onda corta entrante (Hsw C) y ajuste

del factor de erodabilidad del suelo (K). Para un mejor ajuste de las constantes se recomienda evaluar los valores reales de la fracción de cobertura nubosa y diámetro medio de las partículas del suelo, sin embargo, fue de utilidad para los fines de comparar diferentes alternativas de manejo de cuencas.

La relación costo – eficiencia implementada por CUBHIC donde considera la inversión de implementación de la práctica de conservación, resulta poco factible de analizar en esta investigación, dado que, a diferencia de la lógica de comparación de escenarios de CUBHIC, en este estudio se parte de escenarios que representan una condición positiva que requirió compararla con condiciones negativas (escenarios de degradación) para evidenciar los efectos de la infraestructura verde como medidas de conservación de suelos y agua.

Se consideró inicialmente basarse en la inversión del PSAH y la cuantificación de los aportes actuales de agua y suelo como cambios biofísicos de los servicios ecosistémicos provistos por estos sistemas. Sin embargo, esta interpretación, implicaría conceptualizar los PSA como unidades de servicio que según Lima et al. (2017) no es realista dadas las complejidades del esquema de PSA y donde el monitoreo biofísico es solo uno de los múltiples componentes, además que el pago que reciben podría medirse en otro bien que importa al individuo en este caso de los dueños de fincas que voluntariamente forman parte del programa de PSAH (Freeman 1997). No fue posible construir una estructura de costos realista con los dueños de finca durante la fase de campo del presente estudio, particularmente para determinar el escenario comparativo que simula la degradación del suelo.

Sobre los actores y la sostenibilidad del recurso hídrico

El desempeño en las funciones específicas de los diversos actores identificados, ya sea por mandato o interés y el cumplimiento de las responsabilidades entre sí, facilitarían el proceso de avanzar efectivamente hacia la seguridad hídrica en especial con el mecanismo de financiamiento para la protección y conservación del recurso hídrico como lo es la TPRH, ya que esta estrategia se encuentra dentro de los lineamientos que guían la conservación de los recursos naturales en Costa Rica de acuerdo con MINAE et al. (2022) y es impulsada por actores como MINAE-SINAC-DA, ARESEP, además de ser implementada por la ESPH, AyA y la ASADA de río Blanco.

Se identificaron otras actividades además de las ya implementadas en la parte alta de las microcuencas del río Ciruelas y río Segundo tales como prácticas agrosilvopastoriles, agro silviculturales, agroforestales, silvopastoriles, prácticas productivas sostenibles. Estas infraestructuras facilitan la infiltración, promoción de la nueva cultura del agua y que se encuentran como opciones de proyectos a implementar con la TPRH (CEDARENA y ARESEP 2017, Prins et al. 2017). Algunas de ellas donde se combinan los cultivos agrícolas con árboles están siendo desarrolladas en otras regiones tropicales y cuentan con mayor aprobación de implementación (Malmer et al. 2010). Otros beneficios aparte de los cuantificados en esta investigación relacionados a la calidad y cantidad del recurso hídrico podrían evidenciarse según resultados de la experiencia desarrollada en la cuenca de Jesús María, donde además de los beneficios a nivel de sitio, se identificaron beneficios paisajísticos, la resiliencia en actividades productivas antes fenómenos naturales y la mejora de los medios de vida (Prins et al. 2017).

La implementación de proyectos relacionados con la protección del recurso hídrico por las ASADAS son pocos, además que se encuentran limitadas a la fuente de financiamiento de la TPRH. Según González Quesada y Ramírez Valverde (2022), esto obedece a factores administrativos, de mercado, calidad e infraestructura. Este condicionamiento podría no ser determinante con el desarrollo de alianzas exitosas entre ONG y entes gubernamentales como

es el caso de ALIARSE-ASADA Río Blanco-ARESEP-AyA incentivados y apoyados por GIZ, Fundecooperación, PNUD y CEDARENA, que de manera sinérgica dan el paso a que más ASADAS puedan optar por la implementación de la THPR.

Existen factores limitantes a nivel de los cantones de Barva, San Rafael, Heredia, Santa Bárbara que impiden una mayor seguridad hídrica como los altos costos de la tierra en la zona, la expansión urbana y la posibilidad de aumentar o no la participación de los propietarios de fincas en el programa de PSAH en los cantones de San Rafael, Barva (Solano 2010, ACCVC y Onca Natural 2005).

También existen algunas barreras ilegales para las Federaciones de ASADAS, que limitan la generación de fondos y solo se limitan a establecer enlace de buenas experiencias de algunas ASADAS con aquellas que necesitan mejorar en distintos aspectos. Otros factores limitantes para el desarrollo acciones de conservación y protección del recurso hídrico es la actitud de generar sinergia de proyectos entre operadores de agua, la intermitente comunicación entre entes públicos y entes públicos no estatales, y la ausencia de iniciativas por autoridades municipales sobre planes de ordenamiento territorial.

Referentes a las acciones de escalamiento para la seguridad hídrica

Existe un horizonte compartido entre los diferentes tipos de actores en búsqueda de una mayor seguridad hídrica con relación a la disponibilidad y calidad del agua. Siendo la tarifa de protección del recurso hídrico la principal estrategia impulsada por las instituciones gubernamentales e implementada por varios proveedores de agua en Costa Rica.

Para fortalecer la implementación de las prácticas de conservación de suelos y agua en las microcuencas del Río Segundo y Río Ciruelas se recomiendan acciones direccionadas a:

- a) Implementar herramientas de cuantificación como CUBHIC en la estimación de beneficios hidrológicos de las prácticas existentes y aquellas por desarrollar.
- b) La creación de alianzas de cooperación entre la ESPH, ASADAS en Barva, San Rafael, Heredia y Santa Bárbara para la implementación de proyectos de conservación en áreas donde varios operadores coinciden.
- c) El intercambio de experiencias y lecciones aprendidas de los programas desarrollados por los operadores de aguas como la ESPH, AyA y ASADAS en sus áreas de influencia.
- d) El acompañamiento institucional y comunicación efectiva entre la ARESEP, AyA y ASADAS en el área de estudio para la implementación de mecanismos económicos como la tarifa de protección del recurso hídrico en sus áreas de influencia.
- e) Implementación de otros tipos de prácticas de conservación de suelos y agua adecuadas a diferentes terrenos y tipos de actores.
- f) Desarrollo de estrategias para incrementar el existente potencial en la gestión de la seguridad hídrica en búsqueda de superar los factores limitantes identificados.
- g) Desarrollo de planes de ordenamiento territorial en los municipios ubicados dentro de los límites del acuífero Barva.

Conclusiones

A continuación, se presentan los principales hallazgos de esta investigación:

1. La herramienta CUBHIC de Forestación y Protección de Bosques permitió la estimación anual de los aportes de agua y sedimentos de los sistemas de bosque, plantación establecida, reforestación y escenarios de degradación entre 2017 - 2021 en el área de recarga acuífera de las microcuencas del río Segundo y río Ciruelas.
2. Los aportes hídricos como escorrentía, percolación y la generación de sedimentos de los sistemas se ven influenciados por factores como la estructura de suelo, el alto contenido de materia orgánica, pendiente y estado de la cobertura forestal, las cuales crean diferentes condiciones hidrológicas.
3. El orden de suelo de tipo andisoles, de alta permeabilidad, con su respectiva textura y contenido de materia orgánica influyen en el almacenamiento y transporte del agua en el suelo.
4. El cambio de uso de suelo hacia la degradación de los sistemas podría producir un deterioro de la calidad del agua en las fuentes de captación principalmente por el aumento en el aporte de sedimentos afectando los procesos de potabilización del agua.
5. Existe una relación entre el pago por compensación del PSAH y la reducción de sedimentos por cada sistema donde actualmente se destina una mayor compensación al sistema que aporta menos sedimentos hacia los afluentes.
6. La Tarifa de Protección del Recurso Hídrico, como fuente de financiamiento para la protección y conservación del recurso hídrico, contribuye a la sostenibilidad del servicio de agua potable en las microcuencas del río Segundo y río Ciruelas.
7. Existe un horizonte sólido con el estímulo que realizan actores con poder de planificación en relación con la gestión de los recursos naturales en especial con la implementación de la tarifa de protección del recurso hídrico por los proveedores de agua en Costa Rica en búsqueda de la sostenibilidad en cantidad y calidad del agua.
8. Los actores claves reconocen que la sinergia entre ellos es indispensable para el cumplimiento de los objetivos en la sostenibilidad del recurso hídrico por lo que se debe fortalecer aspectos como la comunicación, cambio de actitudes y generación de alianzas en la implementación de proyectos e intercambio de experiencias.
9. Investigaciones donde se integran prácticas de conservación de suelos y agua para entender el comportamiento hidrológico y los costos de inversión versus los beneficios obtenidos, son insumos fundamentales para la toma de decisiones en procesos de la gestión sostenible del recurso hídrico en Costa Rica.

Recomendaciones

A continuación, se presentan algunas recomendaciones:

1. Utilizar la calculadora de beneficios hídricos CUBHIC como herramienta de apoyo a la gestión de los recursos hídricos en las microcuencas del río Ciruelas y río Segundo y su potencialidad de réplica en otras zonas de implementación de proyectos de conservación.
2. Promover el monitoreo para conocer la evolución en el tiempo de los aportes de agua y suelo generados por los bosques, plantaciones forestales establecidas y áreas reforestadas en las microcuencas del río Ciruelas y río Segundo.
3. Implementar en evaluaciones futuras un diseño de muestreo estratificado a lo largo de toposecuencias dentro de las fincas como alternativa para aumentar la precisión de los análisis de suelo con este tipo de muestreo; siempre que la distribución en la cuenca de las infraestructuras verdes de interés así lo permitan.
4. Generar sinergia entre actores que coinciden en las microcuencas del río Ciruelas y río Segundo estableciendo una comunicación efectiva entre actores, compartiendo experiencias de los proyectos implementados, implementar proyectos en conjunto, todo esto en búsqueda de la disponibilidad en el tiempo del recurso hídrico.

Bibliografía

- ACCV; Onca Natural. (2005). Plan de Manejo del Parque Nacional Braulio Carrillo. San José, s.e.
- Adeogun, AG; Sule, BF; Salami, AW. 2018. Cost effectiveness of sediment management strategies for mitigation of sedimentation at Jebba Hydropower reservoir, Nigeria (en línea). *Journal of King Saud University - Engineering Sciences* 30(2):141-149. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jksues.2016.01.003>.
- Ait-Kadi, M. (2013). Aumentar la seguridad hídrica - un imperativo para el desarrollo. Estocolmo, Suecia, s.e.
- Bruijnzeel, LA. 2004. Hydrological functions of tropical forests: Not seeing the soil for the trees? In *Agriculture, Ecosystems and Environment*. s.l., s.e. p. 185-228 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2004.01.015>.
- CEDARENA; ARESEP. (2017). Guía para el desarrollo de estrategias quinquenales de los operadores del servicio de acueducto. San José, Costa Rica, s.e.
- CEDARENA; ARESEP. (2019). Guía para la formulación de estudios tarifarios que promueven la Protección del Recurso Hídrico. San José, Costa Rica, s.e.
- CIA-UCR. 2013. Mapa digital de Suelos de Costa Rica (en línea). s.l., s.e. Consultado 25 sep. 2022. Disponible en <http://www.cia.ucr.ac.cr/es/mapa-de-suelos-de-costa-rica>.
- Decreto Ejecutivo N. 32868. 2005. Canon por Concepto de Aprovechamiento de Aguas. Costa Rica, http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=56341&nValor3=83806¶m2=1&strTipM=TC&lResultado=2&strSim=simp.
- Dobos, E. 2020. Albedo. In Wang, Y (ed.). s.l., CRC Press, Taylor & Francis Group, vol.6. p. 1-407.
- Ellison, D; Morris, CE; Locatelli, B; Sheil, D; Cohen, J; Murdiyarsa, D; Gutierrez, V; Noordwijk, M van; Creed, IF; Pokorny, J; Gaveau, D; Spracklen, D v.; Tobella, AB; Ilstedt, U; Teuling, AJ; Gebrehiwot, SG; Sands, DC; Muys, B; Verbist, B; Springgay, E; Sugandi, Y; Sullivan, CA. 2017. Trees, forests and water: Cool insights for a hot world. *Global Environmental Change* 43:51-61. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.01.002>.
- ESPH. (2020). Informe de Sostenibilidad 2020 (en línea). Heredia, Costa Rica, s.e. Consultado 12 ago. 2021. Disponible en <https://www.esph-sa.com/sites/default/files/2021-04/informe-de-sostenibilidad-2020.pdf>.
- FAO. (2009). Guía para la descripción de suelos. Roma, s.e.
- Foster, ME; Chen, D; Kieser, MS. (2020). Forestación y Protección de Bosques: Cuantificación de beneficios potenciales en el caudal base y reducción de sedimentos. Documento metodológico (en línea). Lima, Perú, s.e. Consultado 1 dic. 2021. Disponible en <https://forest-trends.org/infraestructura-natural-en-peru/#chad-tab25>.
- Franco, AR; Pascual, DA. 2020. Interception and runoff of the high andean forest in the “El Malmo” Protective Forest Reserve. *Natural Resources Conservation and Research* 3(2). DOI: <https://doi.org/10.24294/nrcr.v3i2.1546>.

- Freeman, AM. 1997. On Valuing the Services and Functions of Ecosystems (en línea). In Simpson, RD; Christensen, NL (eds.). Boston, MA, Springer US. p. 241-254 DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4615-6049-4_11.
- González Quesada, C; Ramírez Valverde, D. 2022. Análisis de Clúster en Asadas (en línea). Regulación y Sociedad, Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos :1-36. Disponible en <https://aresep.go.cr/aresep/publicaciones>.
- Grey, D; Sadoff, CW. 2007. Sink or Swim? Water security for growth and development. *Water Policy* 9(6):545-571. DOI: <https://doi.org/10.2166/wp.2007.021>.
- GWP, C. (2013). Guía para la aplicación de la Gestión Integrada del Recurso Hídrico (GIRH) a nivel municipal. Tegucigalpa, Honduras, s.e.
- Hospital Villacorta, JM; de Azagra Paredes, AM; Rivas González, JC. 2006. Determinación de números de curva: Programa de apoyo a MODIPÉ (NumCurv). Valladolid, Universidad de Valladolid.
- Lemmon, PE. (1957). A New Instrument for Measuring Forest Overstory Density 1. 55. s.l., s.e.
- Lima, LS de; Krueger, T; García-Marquez, J. 2017. Uncertainties in demonstrating environmental benefits of payments for ecosystem services (en línea). *Ecosystem Services* 27:139-149. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.09.005>.
- Linares, E; Marchamalo, M; Roldán, M. 2009. Evaluación del factor C de la RUSLE para el manejo de coberturas vegetales en el control de la erosión en la cuenca del río Birris, Costa Rica (en línea). *Agronomía Costarricense* 33(2):1-20. Consultado 16 ago. 2022. Disponible en <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/agrocost/article/view/6722>.
- Liu, Q; Chen, L; Li, J. 2001. Influences of Slope Gradient on Soil Erosion (en línea). *Applied Mathematics and Mechanics* 22(5):510-519. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1016303213326>.
- Locatelli, B; Vignola, R. 2009. Managing watershed services of tropical forests and plantations: Can meta-analyses help? *Forest Ecology and Management* 258(9):1864-1870. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.01.015>.
- Madrigal-Solís, H; Fonseca-Sánchez, A; Reynolds-Vargas, J; Madrigal-Solís, H; Fonseca-Sánchez, A; Reynolds-Vargas, J. 2017. Caracterización hidrogeoquímica de los acuíferos volcánicos Barva y Colima en el Valle Central de Costa Rica (en línea). *Tecnología y ciencias del agua* 08(1):115-132. DOI: <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-01-09>.
- Malmer, A; Murdiyarto, D; Sampurno Bruijnzeel, LA; Ilstedt, U. 2010. Carbon sequestration in tropical forests and water: A critical look at the basis for commonly used generalizations. *Global Change Biology* 16(2):599-604. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.01984.x>.
- Marhaento, H; Booij, MJ; Rientjes, THM; Hoekstra, AY. 2017. Attribution of changes in the water balance of a tropical catchment to land use change using the SWAT model. *Hydrological Processes* 31(11):2029-2040. DOI: <https://doi.org/10.1002/hyp.11167>.
- Mata-Chinchilla, R; Castro-Chinchilla, J. 2019. Geoportal de suelos de Costa Rica como Bien Público al servicio del país (en línea). *Revista Tecnología en Marcha* 32(7): Pág. 51-56. DOI: <https://doi.org/10.18845/tm.v32i7.4259>.
- MINAE; SINAC; FUNBAM; GEF; BID. (2022). Estrategia del SINAC para la conservación y uso sostenible del recurso hídrico. San José, Costa Rica, s.e.

- Mohammad, AG; Adam, MA. 2010. The impact of vegetative cover type on runoff and soil erosion under different land uses (en línea). CATENA 81(2):97-103. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.catena.2010.01.008>.
- OECD. (2013). Water security for better lives: A summary for policymakers (en línea). s.l., s.e. Consultado 11 dic. 2021. Disponible en <https://www.oecd.org/env/resources/Water%20Security%20for%20Better%20Lives-%20brochure.pdf>.
- Ortiz, M de los Á; Matamoro, V; Psathakis, J. (2016). Guía para confeccionar un mapeo de actores: Bases conceptuales y metodológicas (en línea). Buenos Aires, s.e. Disponible en www.cambiodemocratico.org.
- Pérez de Madrid, M; Navarro, M; Saborío, M del M. (2019). Protección, conservación y gestión de las zonas de recarga hídrica. Caja de herramientas de AbE - versión abreviada (en línea). s.l., s.e. Consultado 11 dic. 2021. Disponible en https://www.iucn.org/sites/dev/files/content/documents/serie_1_03_proteccion_zonas_de_recarga_hidrica.pdf.
- Piaggio, M; Siikamäki, J. 2021. The value of forest water purification ecosystem services in Costa Rica. Science of the Total Environment 789. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147952>.
- Pozo Solís, A. (2007). Mapeo de actores sociales. Lima, Perú, s.e.
- Prins, C; Vega, D; Watler, W; Mata, E; Barboza, C; Zúñiga, P; Benegas, L. 2017. Acciones conjuntas y buenas prácticas para la implementación de actividades de restauración, manejo de cuencas y resiliencia de fincas y paisajes ante el cambio climático (en línea). Síntesis para Decisores - Policy Brief (PB) (CATIE) 24:1-6. Consultado 15 sep. 2022. Disponible en <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/8540>.
- Ramírez Chavarría, R. 2014. Recarga Potencial de los Acuífero Colima y barva, Valle Central, Costa Rica (en línea). Repertorio Científico 17(2):51-59. Consultado 30 nov. 2021. Disponible en <https://revistas.uned.ac.cr/index.php/repertorio/article/view/2567>.
- Rawls, WJ; Pachepsky, YA; Ritchie, JC; Sobecki, TM; Bloodworth, H. 2003. Effect of soil organic carbon on soil water retention. Geoderma 116(1-2):61-76. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00094-6](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00094-6).
- Reglamento para el pago por Servicio Ambiental Hídrico Empresa de Servicios Públicos de Heredia S.A. 2009. Sistema Costarricense de Información Jurídica. Costa Rica, Sistema Costarricense de Información Jurídica. Consultado 22 ago. 2022. Disponible en http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=65722&nValor3=108189&strTipM=TC.
- Rojas, N. 2011. Estudio de las cuencas hidrográficas de Costa Rica: Análisis biofísico, climatológico y socioeconómico (en línea). 1(1):1-728. Consultado 25 sep. 2022. Disponible en <http://cglobal.imn.ac.cr/index.php/publications/estudio-de-las-cuencas-hidrograficas-de-costa-rica/>.
- Saxton, KE; Rawls, W. 2022. Soil Water Characteristics: Hydraulic Properties Calculator. s.l., USDA.
- Solano, V. 2010. Evolución y desafíos del programa de pago por servicios ambientales implementado por la Empresa de Servicios Públicos de Heredia S.A. (en línea). Revista de Ciencias Ambientales 40(1). DOI: <https://doi.org/10.15359/rca.40-2.2>.

- Soneye, OO. 2021. Evaluation of clearness index and cloudiness index using measured global solar radiation data: A case study for a tropical climatic region of Nigeria. *Atmosfera* 34(1):25-39. DOI: <https://doi.org/10.20937/ATM.52796>.
- Thiollay, J-M. 1992. Influence of Selective Logging on Bird Species Diversity in a Guianan Rain Forest (en línea). *Conservation Biology* 6(1):47-63. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.1992.610047.x>.
- USDA. (2007). Chapter 7 Hydrologic Soil Groups (en línea). s.l., s.e. Consultado 11 sep. 2022. Disponible en <https://directives.sc.egov.usda.gov/OpenNonWebContent.aspx?content=17757.wba>.
- Wang, Y. 2020. *The Handbook of Natural Resources: Atmosphere and Climate*. 2 ed. Wang, Y (ed.). s.l., CRC Press, Taylor & Francis Group, vol.6. 1-407 p.
- Wawer, R; Nowocien, E; Podolski, B. 2005. Real and calculated K-USLE erodibility factor for selected Polish soils. *Polish Journal of Environmental Studies* 14:655-658.
- Wheater, HS; Gober, P. 2015. Water security and the science agenda (en línea). *Water Resources Research* 51(7):5406-5424. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/2015WR016892>.

Anexos

Anexo 1 Datos de entradas CUBHIC

A continuación, se muestran los datos de entrada para cada sistema y escenarios de la calculadora de beneficios hídricos CUBHIC.

Datos de entrada para cada sistema			
Parámetros	Bosque	Plantación	Reforestación
Número de curva (sin unidades)	52	60	52
Índice de área foliar LAI (m ² /m ²)	3.80	3.63	3.73
Factor USLE C (sin unidades)	0.006	0.050	0.01
Albedo (fracción)	0.11	0.13	0.12
Factor USLE K	0.142	0.142	0.14
Capacidad de campo (%)	25.1	25.8	24.6
Punto de marchitez (%)	10.3	10.3	10.9
Profundidad del suelo (mm)	1811	1544	1811
Hsw C	0.65	0.65	0.65
Ajuste K	3.4	3.4	3.4
Área (ha)	195.83	41.98	8.37

Datos de entrada para cada escenario			
Parámetros	Matorral	Pastizales	Suelo desnudo
Número de curva (sin unidades)	70	77	82
Índice de área foliar LAI (m ² /m ²)	2	1	0
Factor USLE C (sin unidades)	0.072	0.1	1
Albedo (fracción)	0.2	0.21	0.6
Factor USLE K	0.13	0.13	0.13

Anexo 2 Entrevistas a actores

A continuación, se muestran las entrevistas realizadas a cuatro actores con incidencia en las microcuencas del río Ciruelas y río Segundo.

Entrevista a la Empresa de Servicios Públicos de Heredia S.A.

El 1 de junio 2022, se entrevistó a la Ing. Vivian Solano de la Gestión Integrada y Gestión Ambiente de la ESPH S.A.

Pregunta: ¿Cuál es su involucramiento para la protección del recurso hídrico en su área de influencia? ¿Quiénes son sus socios o aliados?

La ESPH S.A. está involucrada en la protección del recurso hídrico desde la iniciativa de solicitar a la ARESEP la creación de una tarifa hídrica, realizando todos los estudios pertinentes siendo así los pioneros en contar con la tarifa de protección del recurso hídrico en Costa Rica.

Pregunta: ¿Existen proyectos de conservación del recurso hídrico en su área de influencia? ¿Qué tipo de proyectos?

Mediante el cobro de la TPRH a sus abonados, la ESPH S.A. invierte en proyectos de conservación y protección de las microcuencas de río Ciruelas, río Segundo, río Bermúdez, río Tibás, río Pará y río Las Vueltas. Proyectos como el Pago por Servicios Ambientales Hídricos (PSAH), compra de fincas para protección y estudios hidrológicos e hidrogeológicos para la delimitación de zonas de protección y captura de ríos y manantiales.

Pregunta: ¿Cuáles son los impactos que ha generado o considera puede generar proyectos de conservación del recurso hídrico?

El PSAH ha generado la protección áreas de bosques, reforestación y plantaciones establecidas en aquellas fincas donde los dueños voluntariamente han solicitado la inclusión de estas áreas dentro del programa de PSAH, recibiendo así un reconocimiento económico anual.

Pregunta: ¿Cuáles son las barreras que identifican para lograr la disponibilidad del recurso agua en el tiempo?

Algunas limitantes en el desarrollo de los programas es la negativa de dueños de finca de cambiar el uso del suelo, dado a que tiene más valor comercial un potrero que un área en regeneración natural y/o reforestada, por lo que dificulta equiparar el pago dentro del programa de PSA al precio de mercado de la finca. Otro limitante es la posibilidad de seguir comprando fincas para protección esto debido a los altos precios en la zona, además que en comprar tierra se podría ir todo lo recaudado en un año de la TPRH.

Pregunta: ¿Qué tipo de oportunidades creen necesarias para implementar acciones en la conservación del recurso hídrico?

La posibilidad de cooperación entre operadores de agua en proyectos de conservación, esto debido a la estrategia de la nueva metodología de la TPRH de la ARES, sin embargo, en la actualidad esto sigue sin darse.

Entrevista al Inspector de Aguas Cantonal

El 2 de junio 2022 se entrevistó al Ing. Ignacio Sanabria ICA de la municipalidad de Barva.

Pregunta: ¿Cuál es su involucramiento para la protección del recurso hídrico en su área de influencia? ¿Quiénes son sus socios o aliados?

Está involucrado en la resolución de conflictos y diferencias entre habitantes de Barva por motivos de aprovechamiento de las aguas vivas, manantiales y corrientes, también por reclamaciones provenientes del uso de las servidumbres.

Pregunta: ¿Existen proyectos de conservación del recurso hídrico en su área de influencia? ¿Qué tipo de proyectos?

Pregunta: ¿Cuáles son las barreras que identifican para lograr la disponibilidad del recurso agua en el tiempo?

Identifica el poco o nulo trabajo en conjunto entre operadores de agua (ASADAS y ESPH S.A.) que comparten nacientes. Por otro lado, la inexistente coordinación de operadores de agua y municipalidad para el desarrollo de proyectos de protección del recurso hídrico, además de la falta de conocimiento en el tema por parte de las autoridades locales. También el desconocimiento por parte de algunos operadores de las áreas de influencia de las fuentes de agua y la práctica de la ganadería por grandes terratenientes.

Pregunta: ¿Qué tipo de oportunidades creen necesarias para implementar acciones en la conservación del recurso hídrico?

La creación de alianzas estratégicas entre operadores de agua para la implementación de proyectos, compartimiento de conocimientos y experiencia en la protección del recurso hídrico en las áreas comunes de influencia.

Entrevista a la federación de ASADAS de la zona norte de Heredia y Norte y Central de Alajuela (FASHA)

El 13 de julio 2022, se entrevistó al Sr. Juan Luis Céspedes (presidente) y Luis Enrique Solano (vicepresidente) de la federación de ASADAS del norte de Heredia y Alajuela fundada en el año 2018.

Pregunta: ¿Cuál es su involucramiento para la protección del recurso hídrico en su área de influencia? ¿Quiénes son sus socios o aliados?

FASHA se centra en el intercambio y mejoramiento de experiencias entre ASADAS en la administración operativa del agua, como cursos de fontanería, desarrollo de los planes de seguridad del agua, curso de manejo de tuberías, estos esfuerzos con alianzas entre comunidades, ASADAS, y empresas privadas. Las actividades entre ASADAS e instituciones se dan esporádicamente y en eventos como celebraciones de días mundiales (día mundial del agua, reforestación, medioambiente).

Pregunta: ¿Existen proyectos de conservación del recurso hídrico en su área de influencia? ¿Qué tipo de proyectos?

Los proyectos implementados por las ASADAS son los orientados a la educación ambiental como la protección del agua y manejo de desechos sólidos no domiciliarios en las comunidades, escuelas y colegios. Por otro lado, existen proyectos de reforestación en fincas privadas, la compra de terrenos para la protección y recarga del acuífero Barva (ASADA San Rafael de Ojo de Agua), bandera azul y el sello de calidad de agua de la AyA.

Pregunta: ¿Cuáles son las barreras que identifican para lograr la disponibilidad del recurso agua en el tiempo?

Algunas barreras que identifican son la falta de planificación urbanística, la no posibilidad de la Federación para generar fondos dado a la naturaleza de la figura y reglamentación que se

lo prohíbe, la falta de implementación de la tarifa hídrica en las ASADAS, además de desarrollar investigación sobre el recurso hídrico. Por otro lado, mencionan la relación fragmentada entre ASADAS y AyA (según indican, la razón es “por cómo ven a las ASADAS”, la falta de personal de planta que es una realidad de muchas ASADAS, muchas veces los puestos son ad honorem o pequeñas dietas que no cubren el tiempo y trabajo invertido en la administración de las ASADAS) y la dificultad de comprar terrenos para la protección debido a los precios elevados en la zona,

Pregunta: ¿Qué tipo de oportunidades creen necesarias para implementar acciones en la conservación del recurso hídrico?

El acompañamiento de las instituciones correspondiente en el proceso de presentar la propuesta de la Tarifa de Protección Hídrica por parte de la ASADAS. Por otro lado, concretar alianzas estratégicas con otros proveedores de agua (ESPH S.A.) para la implementación de proyectos de conservación del recurso hídrico en áreas de trabajo conjuntos, debido al no interés de algunos proveedores a quien se le ha presentado la propuesta de crear un corredor biológico en el área de recarga acuífera del Barva. También se requiere cambiar la percepción de los habitantes específicamente hacia La Empresa donde perciben que el recurso es trasladado para abastecer otras comunidades, mientras ellos tienen dificultad en el acceso al mismo.

Entrevista a la Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos (ARESEP)

El 14 de julio 2022 se entrevistó la Ing. Daniela Ramírez Valverde de la Intendencia de Agua.

Pregunta: ¿Cuál es su involucramiento para la protección del recurso hídrico en su área de influencia? ¿Quiénes son sus socios o aliados?

En el tema de protección de recursos hídricos, la única herramienta que la ARESEP impulsa en la Tarifa de Protección del Recurso Hídrico (TPRH). La Metodología tarifaria para la protección del recurso hídrico está disponible y aprobada desde el 2018, y en la actualidad tres operadores cobran la TPRH a sus abonados (ESPH, AyA, ASADA de Río Blanco). La ARESEP ha estado desarrollando una serie de estrategias es búsqueda de que más ASADAS presenten la solicitud de TPRH. Una de las estrategias consiste en una nueva guía metodológica sobre la TPRH, esta consta de 20 páginas y de fácil entendimiento. Seguido están desarrollando la estrategia en el establecimiento de protocolo entre la AyA y la ARESEP en el proceso de presentación del proyecto de TPRH por una ASADA. En análisis de clúster en ASADAS, determinan las características particulares por la cual una ASADA tendría dificultad de presentar el proyecto a la TPRH.

Bajo el buen resultado de la aprobación de la TPRH de la ASADA Río Blanco, quien fue guiada en el proceso por la Fundación Banco Ambiental (FUNBAM) se está en proceso de realizar alianzas de cooperación con otras organizaciones que trabajan con ASADAS como Fundación para la Sostenibilidad y la Equidad (ALIARSE), Fundecooperación para el Desarrollo Sostenible, Fundación AVINA, para que estas organizaciones apoyen a las ASADAS.

Pregunta: ¿Cuáles son las barreras que identifican para lograr la disponibilidad del recurso agua en el tiempo?

La barrera que identifican en el proceso de impulsar TPRH es el poco entendimiento de la metodología por ASADAS, por lo que se mantienen atentos a la posibilidad que con los nuevos cambios a la misma. Por otro lado, la aprobación de TPRH a las ASADAS, no ha sido fácil dado a ciertas particularidades de las ASADAS (unas ASADAS son buenas administradoras y otras no tanto) que influyen en el cumplimiento de los requisitos para la tarifa hídrica, por lo que realizan esfuerzo con otras instituciones y organizaciones para identificar las ASADAS

con las mejores características, y apoyándolas en el proceso de presentación del proyecto de TPRH.

Pregunta: ¿Qué tipo de oportunidades creen necesarias para implementar acciones en la conservación del recurso hídrico?

La ARESEP está realizando acciones para el cambio de percepción de los operadores de agua hacia la institución, implementando estrategias de comunicación a través de una alianza de AyA - ARESEP – FUNBAM – SINAC que, desde los departamentos de comunicación de cada parte, se están generando material informativo en tema de protección del recurso hídrico y sanitarios, como herramienta de acercamiento a los operadores especialmente a las ASADAS, reconocen que es un proceso en el tiempo para fortalecer la comunicación y generar un cambio de opinión hacia las instituciones.

Sobre la promoción y esfuerzos que están realizando para mayor implementación de la TPRH en los operadores de agua, esperan que sea sostenible en el tiempo, considerando que cada 5 años se reevalúa y reestructuran los proyectos y tarifa desde que se aprueba por primera vez.