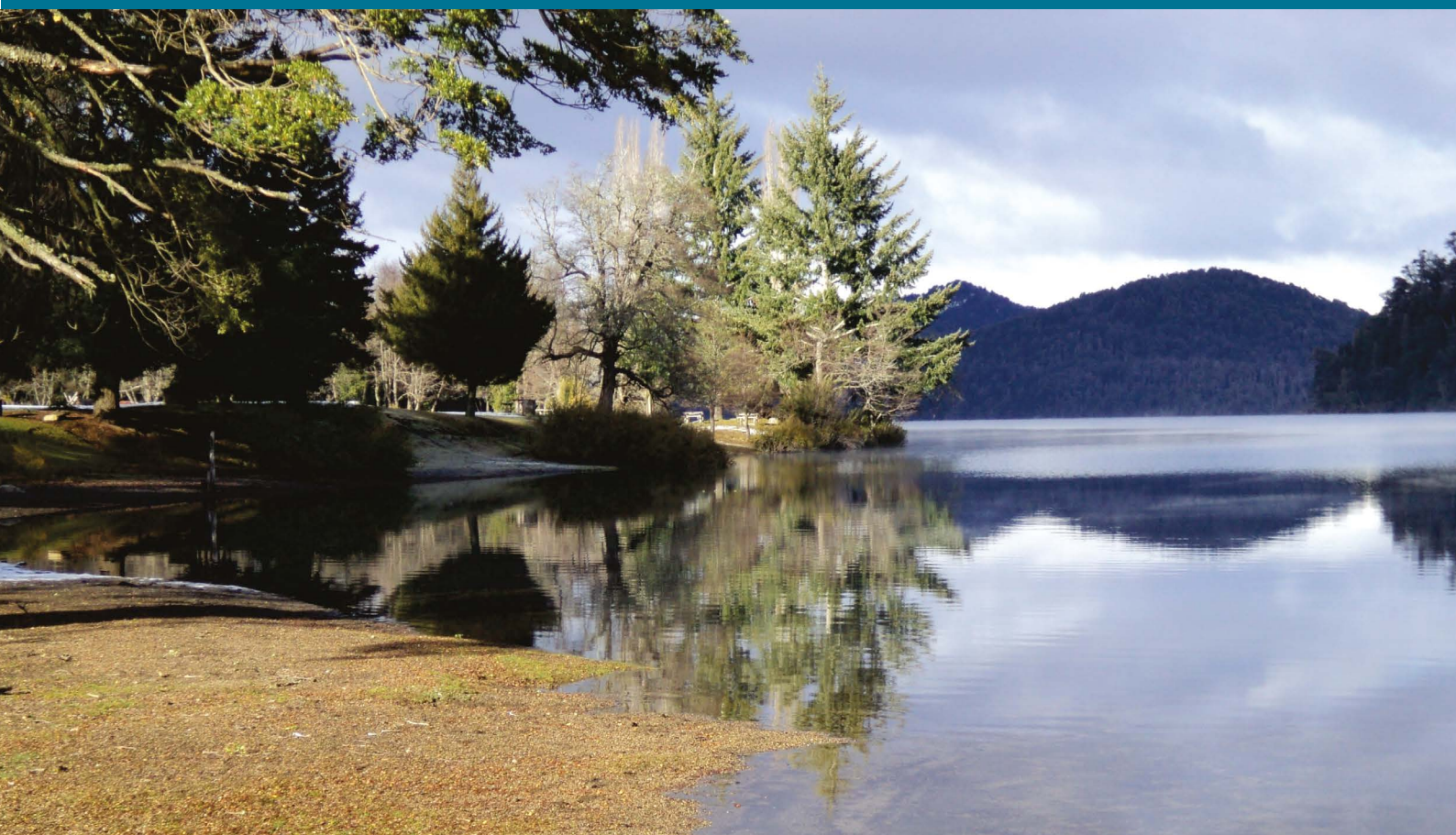


Sitios Demostrativos de Ecohidrología en América Latina y el Caribe

Pasado, presente y futuro



Publicado en 2024 por la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura, 7, place de Fontenoy, 75352 París 07 SP, Francia y la Oficina Regional de UNESCO en Montevideo, Luis Piera 1992, Edificio Mercosur, 2.º piso, Montevideo 11200, Uruguay.

© UNESCO 2024

DOI 10.54677/FIAF3444



Esta publicación está disponible en acceso abierto bajo la licencia Attribution-ShareAlike 3.0 IGO (CC-BY-SA 3.0 IGO) (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/igo/>). Al utilizar el contenido de la presente publicación, los usuarios aceptan las condiciones de utilización del Repositorio UNESCO de acceso abierto (<https://www.unesco.org/es/open-access/cc-sa>)

Los términos empleados en esta publicación y la presentación de los datos que en ella aparecen no implican toma alguna de posición de parte de la UNESCO en cuanto al estatuto jurídico de los países, territorios, ciudades o regiones ni respecto de sus autoridades, fronteras o límites.

Las ideas y opiniones expresadas en esta obra son las de los autores y no reflejan necesariamente el punto de vista de la UNESCO ni comprometen a la Organización.

Fotografía de cubierta: Lago Lácar, Marcelo Gaviño Novillo, Prof.

Diseño gráfico: editaonline

Diseño de cubierta: UNESCO

Maquetación: Editaonline

Asistentes de edición: Florencia de León, Sabrina Cupeiro, Camila Tori, Natalia Lázaro, Mathilde Maurice, Sofía Moreira.

SC-2024/PHI-LAC/48

R E S U M E N

Innovación y sustentabilidad: El impacto de la ecohidrología en América Latina y el Caribe

La implementación de la ecohidrología como una nueva ciencia de enfoque para apoyar la gestión de los recursos hídricos mediante una mejor comprensión de la relación entre procesos hidrológicos y biológicos a diferentes escalas de una cuenca, planteó la conveniencia de proporcionar evidencias y validación concreta de sus principios fundacionales. Durante la Conferencia Internacional “Ecohidrología: de la teoría a la acción” celebrada en Wierzba, Polonia, en 2004, como parte de las actividades del Programa Hidrológico Intergubernamental de la UNESCO, se planteó la creación de una red global de proyectos demostrativos.

Veinte años después, la Red Mundial de Sitios Demostrativos cuenta a la fecha de la presente publicación un total de 51 sitios demostrativos en 32 países en todos los continentes y en pleno crecimiento.

En estos sitios se aplican principios para enfrentar la pérdida de los servicios ecosistémicos a escala de cuenca, implementando soluciones basadas en la naturaleza, combinadas de manera inteligente con soluciones hidrotécnicas convencionales, logrando soluciones innovadoras desde una visión transdisciplinaria en beneficio de las comunidades.

En este marco, se presentan en este Documento Técnico los Sitios Demostrativos y los avances logrados en la región de América Latina hasta el año 2021.

12 de los 51 sitios demostrativos de ecohidrología que existen en el mundo se encuentran en la región de América Latina y el Caribe



"Puesto que las guerras nacen en la mente de las mujeres y de los hombres, es en la mente de las mujeres y de los Hombres donde deben erigirse los baluartes de la paz."



Sitios Demostrativos de Ecohidrología en América Latina y el Caribe Pasado, presente y futuro

EDITORES

Marcelo Gaviño Novillo

Profesor

Universidad Nacional de La Plata, Facultad de Ingeniería,
Departamento de Hidráulica La Plata - Argentina
Cátedra UNESCO en Ecohidrología y Aguas para Ecosistemas y Sociedades
Universidad de Algarve, Faro – Portugal
magavino@gmail.com

Miguel de França Doria

Hidrólogo Regional

Programa Hidrológico Intergubernamental para América Latina y el Caribe
Oficina UNESCO Montevideo
m.doria@unesco.org

Prólogo	
Lidia Brito	7
Presentación	
Marcelo Gaviño Novillo, Miguel Doria	9
Capítulo 1	
Los sitios demostrativos en ecohidrología de UNESCO/PHI: estado actual de la red con énfasis en América Latina y el Caribe	
Marcelo Gaviño Novillo, José Gaona, Giussepe Arduino, Miguel Doria	11
Capítulo 2	
Cuenca Río Reventazón: Seguimiento de aplicación de caudal de compensación y otras medidas ecohidrológicas	
Turrialba (Costa Rica).	
Luz Marina Rodríguez Quirós, Anny Chaves Quirós	29
Capítulo 3	
Sitio Demostrativo Lácar: Dos décadas y media de avances en la implementación de la ecohidrología	
San Martín de Los Andes - Neuquén (Argentina).	
Marcelo Gaviño Novillo, Sara Castañeda, Daniela Muschong, Facundo Ortiz, Ana Díaz Martínez ...	51
Capítulo 4	
Sitio Demostrativo Paltas - Catacocha	
Catacocha (Ecuador).	
Marco Albarracín, Galo Ramón, Jorge Gonzalez, Jorge Celi, José Romero, Fabián Rodas, Carlos Iñiguez Armijos	79
Capítulo 5	
Sitio Demostrativo Cuenca del Río Teusacá	
Cuenca Río Bogotá (Colombia).	
José Gaona, Claudia Ramírez, Lina Zuluaga	101
Capítulo 6	
Modelación e implementación de alternativas de restauración ecohidrológica en el Complejo Cenagoso Zapatosa	
Cuenca del Río Magdalena (Colombia).	
Beatriz Hernández, Jeffer Cañón, Martha Díaz, Carlos A. Fuentes, Ángela Gutiérrez, Iván Reina, Juan Carlos Alonso	123
Capítulo 7	
Sitio Demostrativo Pelican Bay - Galápagos	
Santa Cruz - Galápagos (Ecuador).	
Marco Albarracín, Erika Lascano, Christian Domínguez, Henry Bayas, Sandra García, Noemí d'Ozouville, Patricia Jaramillo	141

Capítulo 8

Humedales costeros tropicales y desarrollo costero: Estanque Victoria

Exuma (The Bahamas)

Kathleen Sullivan-Sealey, Jacob Patus, John A. Bowleg 157

Capítulo 9

Esteros de Farrapos

Río Negro (Uruguay)

Lucía Samaniego, Alfonso Flaquer, Walter Regueiro, Mario Batallés, Manuel Giménez,

Agustín Menta, Alberto Manganelli 181

Capítulo 10

Conclusiones

Marcelo Gaviño Novillo, Miguel Doria, Beatriz Hernández 199

La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, en sus metas 6.3 y 6.6, busca mejorar la calidad del agua, reduciendo la contaminación y el porcentaje de aguas residuales sin tratar, así como proteger y restablecer los ecosistemas relacionados con el agua. Estas metas tienen particular relevancia en América Latina y el Caribe, una región caracterizada por la riqueza de la biodiversidad acuática, pero donde apenas un tercio de las aguas servidas son tratadas.

En el Pacto para el Futuro, adoptado en septiembre de 2024 por la Asamblea General de Naciones Unidas, los países se comprometieron a acelerar los esfuerzos relacionados con la sostenibilidad del medio ambiente y recursos hídricos (acción 10), y también en fortalecer las capacidades científicas, tecnológicas y de innovación de los países en desarrollo (acción 29). En particular, este último compromiso busca garantizar que la ciencia, la tecnología y la innovación contribuyan a los esfuerzos en distintas áreas, especialmente en temas relacionados al agua, el ambiente y la sociedad.

Es evidente que la Ciencia desempeña un rol fundamental en el avance hacia el futuro que queremos. La ecohidrología, en particular, proporciona alternativas de base científica que contemplan las relaciones entre los procesos hidrológicos y biológicos a diferentes escalas, ofreciendo soluciones innovadoras para mejorar la seguridad hídrica, potenciar la biodiversidad y fomentar el desarrollo sostenible. El concepto de ecohidrología se centra en la integración de la investigación social, ecológica e hidrológica, generando resultados que faciliten la formulación de políticas y la adopción de prácticas efectivas para la gestión integrada de los recursos hídricos. Su objetivo es mitigar impactos y aumentar el potencial ecológico de las cuencas hidrográficas, considerando múltiples dimensiones, como los servicios ecosistémicos, la resiliencia al cambio climático y el patrimonio cultural, entre otras. En definitiva, busca armonizar el potencial ecosistémico con las necesidades de la sociedad, contribuyendo de forma transversal al desarrollo sostenible.

El Programa Hidrológico Intergubernamental de la UNESCO (PHI), actualmente en su novena fase, se enfoca en la promoción de la Ciencia para un mundo con seguridad hídrica en un entorno cambiante. A través del PHI, la UNESCO apoya la investigación, la innovación, la creación de redes científicas, y el fortalecimiento de capacidades para mejorar la comprensión de procesos ecohidrológicos a distintos niveles. En América Latina y el Caribe, la UNESCO cuenta con un dinámico grupo de trabajo dedicado al fomento y divulgación de la Ecohidrología, promoviendo sinergias con las redes UNESCO del Hombre y la Biosfera (MAB) y de Patrimonio Mundial, así como con otros grupos de trabajo del PHI, especialmente en el área de hidrología de sistemas forestales. En 2024 se estableció en la Universidad Mayor de San Andrés, en Bolivia, una Catedra UNESCO exclusivamente dedicada a la ecohidrología, un aporte significativo para su desarrollo científico en la región. Además, desde 2006 los sitios demostrativos han colocado en evidencia la relevancia práctica de la ecohidrología en la resolución de distintos desafíos, incluyendo concentraciones de nutrientes, floraciones de cianobacterias y escasez del agua.

En este contexto, la presente publicación tiene como objetivo compartir las experiencias de los primeros Sitios Demostrativos de Ecohidrología en América Latina y el Caribe. Cada año, esta red se enriquece, incorporando nuevos sitios y nuevas formas de implementar herramientas científicas a nivel local, con resultados tangibles a nivel social, económico y ambiental. Esperamos que estas experiencias brinden un aporte técnico de utilidad, para inspirar tomadores de decisiones y otras partes interesadas en adoptar nuevas soluciones basadas en la Ciencia, contribuyendo a la seguridad hídrica y al avance hacia las grandes metas que aspiramos alcanzar.



Lidia Brito

Directora General Adjunta de Ciencias Naturales



La seguridad hídrica y la ecohidrología

Ante el aumento de la inestabilidad climática, el crecimiento demográfico y las migraciones humanas, la aparición de desafíos a la salud humana y los cambios globales en general, existe una necesidad urgente de revertir la degradación de los recursos hídricos y naturales asociados, limitando al máximo la disminución de la biodiversidad como base para una seguridad hídrica. La valoración y optimización de los servicios provistos por los ecosistemas a la sociedad, así como la amplificación de la resiliencia de las cuencas fluviales frente al estrés climático y antropogénico, sin duda podrá contribuir en gran medida a alcanzar este objetivo.

Con ciertas excepciones, como en los desiertos, las altas montañas y las zonas boreales y australes, la mayor parte del paisaje mundial en esta era del Antropoceno se ha convertido en tierras agrícolas, áreas urbanas en expansión o altamente modificadas, dando lugar a una sensible reducción de la biomasa y la materia orgánica, lo que lleva a una modificación del ciclo hidrológico natural a escala planetaria.

En este contexto, y con objeto de brindar una nueva metodología de enfoque para abordar estos desafíos, surgió la ecohidrología, en tanto una nueva ciencia que se funda en la aplicación de tres principios: i) Restablecer y mantener los procesos evolutivos de circulación del agua, nutrientes y energía en una cuenca, ii) amplificar la capacidad de carga (resiliencia) de los ecosistemas frente a la presión antrópica, y iii) usar las propiedades de los ecosistemas como herramientas de gestión del agua (ingeniería ecológica). Este enfoque fue adoptado por el Programa Hidrológico Intergubernamental (PHI) de la UNESCO a partir de la Quinta Fase de su Plan Estratégico en 1996, y desde entonces se ha difundido tanto a nivel mundial como en América Latina y el Caribe, promoviendo actividades que tratan de incidir en la aplicación de estos tres principios en la práctica.

Los Sitios Demostrativos

Con objeto de demostrar la implementación de la ecohidrología, en tanto una ciencia transdisciplinaria, el PHI decidió en el año 2001 apoyar proyectos en los cuales se haya logrado un avance científico, la transferencia de conocimientos, la calibración de métodos, la educación y el desarrollo de capacidades. Para ello, se han desarrollado criterios que permiten reconocer sitios en los cuales se implementan prácticas sostenibles, innovadoras y transdisciplinarias de gestión del agua basadas en las bases de la ecohidrología.

Estos proyectos han sido seleccionados en diferentes continentes, cubriendo el amplio alcance de los desafíos actuales para la gestión del agua, los ecosistemas y la sociedad en sistemas ecológicos tales como cuencas hidrográficas, humedales, llanuras de inundación, ciudades, lagos y embalses así como estuarios y zonas costeras, conformando en la actualidad una Red de Sitios Demostrativos. La región de América Latina y el Caribe contribuyó desde su conformación con tres de los ocho sitios iniciales en el año 2005, momento a partir del cual se han venido haciendo esfuerzos para difundir la aplicación de la ecohidrología en la práctica y consecuentemente implementar nuevos Sitios Demostrativos en la región.

La situación de los Sitios Demostrativos en América Latina y el Caribe

Con objeto de contar con un estado de la situación en la región y promover nuevas incorporaciones, las Oficinas de la UNESCO en Montevideo y Quito organizaron el **Taller Regional para América Latina y el Caribe de Sitios Demostrativos de Ecohidrología** que tuvo lugar en la Isla de Santa Cruz (Galápagos-Ecuador) entre los días 18 y 20 de septiembre de 2019, contando con la participación de los líderes y lideresas de los sitios y proyectos demostrativos, miembros del Comité Científico Mundial del Programa de Ecohidrología y especialistas de la UNESCO, así como invitados locales.

El presente Documento Técnico resume los avances presentados durante dicho evento en los cuatro sitios preexistentes (Argentina, Bahamas, Costa Rica y Ecuador), así como de aquellos candidatos que fueran finalmente incorporados a la Red (uno en Ecuador y dos en Colombia), y una nueva iniciativa en proceso de incorporación (Uruguay). Desde el desarrollo del Taller se ha producido recientemente la incorporación de cinco nuevos Sitios Demostrativos, uno en Chile, dos en Brasil y dos en Perú que no son incluidos en la presente publicación. Al momento de esta publicación, América Latina y el Caribe cuenta con 12 Sitios Demostrativos de Ecohidrología.

Módulo del Curso en Línea Masivo y Abierto de Ecohidrología (MOOC)

Complementariamente al presente Documento Técnico, se ha organizado un **Módulo del Curso en Línea Masivo y Abierto de Ecohidrología (MOOC)** del PHI/UNESCO centrado en los Sitios Demostrativos en América Latina y el Caribe (<https://hidroinformatica.itaipu.gov.py/aulavirtual/>) con la activa participación de los diversos coautores de este documento, desarrollando adicionalmente elementos multimedia actualizados. Este recurso está disponible tanto en idioma castellano como inglés para ampliar la difusión a escala mundial de los avances regionales.

Este conjunto único de iniciativas innovadoras, que conmemoran los 20 años del Programa Regional de Ecohidrología en la Región creado oportunamente el 5 de septiembre de 2003 durante la Reunión de Buenos Aires, se convierte no solo en un testimonio de la implementación de la ecohidrología, sino también en un punto de partida para la promoción de una gestión inteligente del agua basada en soluciones basadas en la naturaleza, esperando que tanto la presente publicación como el curso en línea contribuyan a la difusión y aplicación de esta nueva ciencia en el futuro.

Prof. Marcelo Gaviño Novillo
Universidad Nacional de La Plata (Argentina)
Cátedra UNESCO en Ecohidrología y
Aguas para Ecosistemas y Sociedades
Universidad de Algarve, Faro (Portugal)
Coordinador Regional y Miembro de Comité Científico
del Programa de Ecohidrología/UNESCO-PHI
(2005-2020)

Miguel de França Doria, PhD
Hidrólogo Regional
Programa Hidrológico Intergubernamental
para América Latina y el Caribe

Capítulo 1

Los Sitios Demostrativos en Ecohidrología de UNESCO/PHI: Estado actual de la Red con énfasis en América Latina y el Caribe

Marcelo Gaviño Novillo ⁽¹⁾, José Gaona ⁽²⁾, Giuseppe Arduino ⁽³⁾, Miguel Doria ⁽⁴⁾

1. Introducción

Desde hace 23 años se ha asumido que la Tierra ha entrado en la era del Antropoceno en la cual la humanidad constituye una fuerza de cambio a escala planetaria, confirmada con evidencia empírica como resultado del crecimiento exponencial de los impactos ambientales globales que tienen lugar desde el advenimiento de la Revolución Industrial, especialmente desde mediados del siglo XX (Crutzen *et al.*, 2000). Ello se traduce en una preocupación creciente sobre la estrecha relación existente entre los sistemas naturales y los recursos hídricos que requiere estrategias de manejo y gestión centradas en la mitigación de los impactos y tensiones crecientes a fin de preservar la provisión de los servicios ecosistémicos que se ven afectados por el cambio climático de origen antropogénico (MEA, 2005; Falkenmark, 2003; IPCC, 2021).

Para ello, es imprescindible abandonar un pensamiento y gestión sectorial, abordando la gestión de los recursos hídricos y los ecosistemas asociados desde una visión más integrada y sistémica (GWP, 2000) frente a lo cual la comunidad científica ha respondido mediante una nueva ciencia que combina múltiples disciplinas en la búsqueda de una comprensión nueva y transformadora sobre el planeta cambiante, y sobre todo de las interrelaciones entre el ciclo del agua, los demás ciclos biogeoquímicos y los ecosistemas: la ecohidrología.

En este marco, para la preparación de la Novena Fase de su Programa Estratégico 2022-2029, el Programa Hidrológico Intergubernamental de la UNESCO (PHI) ha definido a la ecohidrología como: “una rama de la hidrología, que destaca las relaciones entre los procesos hidrológicos, biológicos y ecológicos a diferentes escalas y las traduce en soluciones basadas en la naturaleza para mejorar la seguridad hídrica, mejorar la biodiversidad y crear oportunidades para el desarrollo sostenible armonizando las necesidades socioeconómicas y el potencial ambiental” (UNESCO, 2020).

Desde este enfoque, y a lo largo de diversos capítulos, se presentan avances logrados en la región de América Latina y el Caribe en la implementación de proyectos e iniciativas basadas en la ecohidrología, los cuales forman parte de la red de Sitios Demostrativos a escala mundial promovida desde el Programa Hidrológico Intergubernamental (PHI) de UNESCO en correspondencia de su Octavo Plan Estratégico (PHI - VIII).

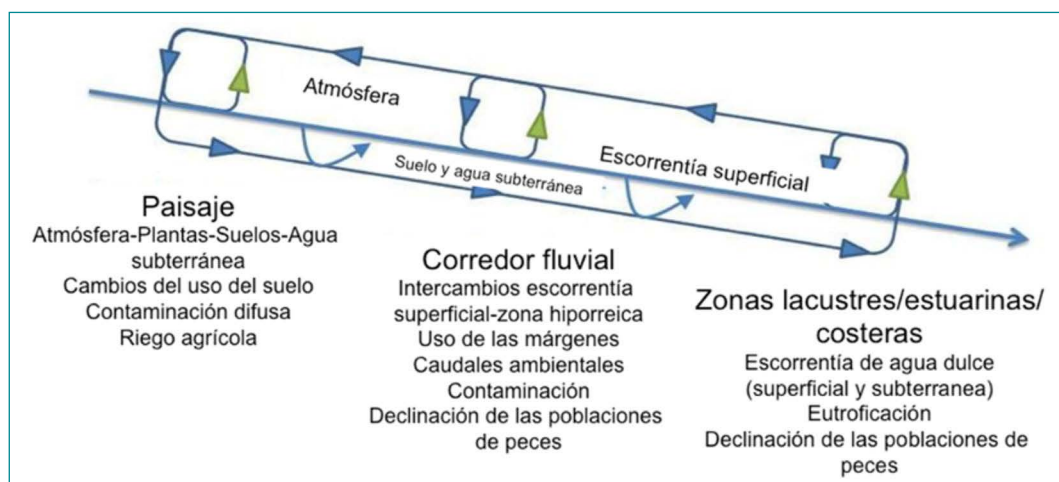
(1) Universidad Nacional de La Plata, Argentina; Maestría en Ecohidrología ERASMUS MUNDUS, Portugal, (2) Consultor del Programa Hidrológico Intergubernamental, UNESCO, Colombia, (3) Programa Hidrológico Intergubernamental, UNESCO, París (4) Hidrólogo Regional para América Latina y El Caribe, Programa Hidrológico Intergubernamental, UNESCO, Montevideo
(1) magavino@gmail.com, (2) jagc3020@gmail.com (3) g.arduino@unesco.org (4) m.doria@unesco.org

2. Las esferas de la ecohidrología

Los casos de estudio han sido organizados desde la perspectiva de las esferas de la ecohidrología entendidos como ámbitos de interacción entre la vegetación y la escorrentía, incluyendo la atmósfera, el suelo y el agua subterránea (Figura 1), adoptando las definiciones planteadas por los miembros del Comité Científico del Programa de Ecohidrología de la UNESCO/PHI (McClain *et al.*, 2011).

El establecimiento inicial y la aparición a gran escala (tiempo y espacio) de la vegetación depende del clima y la disponibilidad del agua, pero en escalas pequeñas a intermedias y en ausencia de eventos climáticos extremos, la vegetación puede ejercer una influencia controladora sobre los movimientos del agua e incluso el clima local (Osborne *et al.*, 2004). Una segunda esfera importante de los procesos ecohidrológicos se encuentra en los corredores fluviales, donde la vegetación terrestre continúa ejerciendo una influencia importante en la generación de escorrentía y, en consecuencia, el régimen de caudales se convierte en la variable maestra que controla la estructura y función de los ecosistemas acuáticos, incluidos los humedales fluviales (Poff *et al.*, 1997). Una tercera esfera de procesos ecohidrológicos abarca a los lagos, embalses, estuarios y zonas costeras, donde los aportes de agua y las cargas de partículas disueltas ejercen fuertes controles sobre la estructura y función del ecosistema (Livingston *et al.*, 1997). Estas tres esferas están interconectadas en el continuo del ciclo hidrológico e incluyen las interacciones de los procesos físicos, biológicos y biogeoquímicos (Figura 1).

Figura 1: Las esferas de la ecohidrología



Fuente: Adaptado de McClain, Chicharo, Fohrer, Gaviño Novillo, Winworst, Zalewski, 2011.

2.1. Ecohidrología del paisaje: conservación de la tierra y producción de alimentos

Las principales interacciones de la hidrología y la ecología en la superficie terrestre involucran los procesos hidrológicos de precipitación, infiltración y evapotranspiración cuya influencia por lo general controla a los procesos biológicos que comúnmente se excluyen de las ecuaciones del balance hídrico, siendo representada mediante variables o parámetros puramente físicos (Monteith, 1965; Priestly y Taylor, 1972). La investigación ecohidrológica, sin embargo, reconoce la complejidad de las interacciones planta-suelo-agua en múltiples escalas sobre paisajes heterogéneos (Pitman, 2003; Popp *et al.* 2009; Caylor *et al.* 2006). El equilibrio de la humedad del suelo es fundamental así como su influencia espacio-temporal en la estructura de los ecosistemas,

la productividad y la diversidad de especies (Porporato y Rodríguez-Iturbe, 2002). Las principales retroalimentaciones incluyen el control de la vegetación sobre el clima local (Osborne *et al.*, 2004) y la autoorganización de la vegetación en ambientes limitados por el agua mediante el control de las tasas de infiltración (Rietkerk *et al.*, 2002). Gran parte del enfoque de esta esfera ha estado en los ecosistemas áridos y semiáridos donde la humedad del suelo puede ser el factor limitante (Nemani *et al.*, 2003; Newman *et al.*, 2006), pese a que actualmente se está prestando mayor atención a las áreas húmedas (Rodríguez-Iturbe *et al.*, 2007).

Las indicaciones para la gestión ambiental de esta esfera de la ecohidrología buscan mitigar las consecuencias de los cambios del uso de la tierra impulsados por el desarrollo que ha alterado casi la mitad de la superficie de la Tierra, gran parte de la cual está relacionada con el suministro de alimentos para una población humana en crecimiento (Vitousek *et al.*, 1997; Gaviño Novillo, 2000; Foley *et al.*, 2005). Los cambios en la composición y configuración de la vegetación alteran el ciclo hidrológico desde la escala de parcela hasta una continental (Colman, 1953; Likens *et al.*, 1977; Eshleman, 2004), poniendo en marcha una cascada de impactos en cadena. Es clave en esta escala la necesidad de contar con mayores datos de campo y herramientas de modelación para evaluar los impactos en la escala de una cuenca hidrográfica (Fohrer *et al.*, 2005; van Griensven *et al.*, 2006).

2.2. Ecohidrología de los corredores fluviales: usos competitivos, fragmentación y deterioro de la calidad del agua

Las interacciones ecohidrológicas en los corredores fluviales están íntimamente asociadas a la dinámica de los procesos territoriales en el paisaje descritos precedentemente en su relación con los ecosistemas fluviales. La UNESCO ha promovido las investigaciones en las zonas ribereñas y los humedales en tanto ecotonos entre los ecosistemas terrestres y acuáticos (Naiman y Decamps, 1997). La mejora de la biodiversidad y la función ecológica de estos sistemas se atribuye a la extraordinaria heterogeneidad física producida por regímenes variables de inundaciones y procesos geomórficos, cambios climáticos altitudinales e influencias de la escorrentía proveniente de las nacientes de una cuenca (Naiman *et al.*, 1993). Se ha descubierto también que los intercambios de agua superficial y subterránea dentro de la zona hiporreica subyacente a los arroyos y ríos ejerce un importante control hidrológico sobre la ecología de los ríos y arroyos y sobre los procesos ecohidrológicos ribereños, resaltando el control en la regulación de la escorrentía y el transporte de nutrientes desde las nacientes de una cuenca a lo largo de los corredores fluviales (Brunke y Gonser, 1997; Boulton *et al.*, 2010; Wondzell, 2011). El régimen de escorrentía se considera una variable clave en el control de la ecología de los ecosistemas lóticos (Poff y Allan, 1995; Poff *et al.*, 1997; Naiman *et al.*, 2008) lo cual ha llevado a prestar mayor atención a las respuestas ecológicas de los organismos acuáticos y a los cambios relacionados con el régimen de escorrentía (Lytle y Poff, 2004; Poff y Zimmerman, 2010).

Se estima que los servicios ecosistémicos proporcionados por los cursos de agua y humedales son más valiosos por kilómetro cuadrado que los de cualquier otro ecosistema de la Tierra (Costanza *et al.*, 1997). Al mismo tiempo, los ríos y humedales son los más afectados por las intervenciones humanas (Meybeck, 2003; Dudgeon *et al.*, 2006; Vörösmarty *et al.*, 2010), lo que los convierte en el centro de una intensa investigación ecohidrológica para orientar las intervenciones de gestión necesarias. Debido al estado degradado de muchos corredores fluviales, la restauración es un área importante de investigación (Zedler, 2000; Tockner y Stanford, 2002; Wohl *et al.*, 2005). Es clave abordar al respecto las interrelaciones entre el régimen hidrológico y la conectividad hidrológica en la restauración de la función ecológica de los corredores fluviales, aspecto clave considerando los múltiples proyectos de presas con fines multipropósito que se prevén en la región (Richter *et al.*, 1997; Bornette *et al.*, 1998; Ward *et al.*, 2001; Lake *et al.*, 2007). Los caudales asignados para

garantizar las funciones ecológicas se denominan caudales ambientales y representan un área focal clave de la investigación ecohidrológica aplicada (Arthington *et al.*, 2010). Otra área focal son los estudios aplicados y de modelado de los procesos de atenuación natural en la protección y mejora de la calidad del agua, especialmente en áreas sujetas a intensa actividad agrícola pero también en áreas urbanas (Burgin y Hamilton, 2007; McClain, 2008; Wagner y Zalewski, 2009; Gaviño Novillo, 2020).

2.3. Ecohidrología de zonas lacustres, estuarinas y costeras: eutrofización y pesca

La ecohidrología en ecosistemas lacustres y costeros se ha centrado principalmente en el análisis de las influencias ecológicas de los caudales líquidos, sólidos y solutos provenientes de las cuencas hidrográficas sobre los cuerpos receptores del agua. Esta esfera de la ecohidrología, por tanto, se basa en las esferas precedentes, siguiendo la secuencia de la escorrentía desde el paisaje a través de los corredores fluviales. Esto enfatiza nuevamente un principio fundamental de la ecohidrología, que es la consideración de procesos que operan a una escala de cuenca, incluso si la unidad específica bajo estudio es un lago o estuario (Zalewski, 2002; Wolanski *et al.*, 2004). Los caudales líquidos y las aguas subterráneas dominan el equilibrio de los aportes hídricos de la mayoría de los lagos (excluidos los grandes lagos) y controlan los perfiles de salinidad de la mayoría de los estuarios (Hill *et al.*, 1998; Klimmerer, 2002; Robins *et al.*, 2005). Cada uno de estos influye en la disponibilidad espacio-temporal de hábitats específicos que pueden ser importantes durante ciertas etapas de la vida de la fauna y la flora. La carga de nutrientes también ejerce fuertes controles sobre la productividad primaria, que luego afecta la productividad a niveles tróficos más altos en las redes tróficas (Livingston *et al.*, 1997; Chicharo *et al.*, 2006; Marcarelli *et al.*, 2011). Debido a que muchos peces, camarones y otros organismos acuáticos migran a lo largo de su ciclo de vida, la mayor productividad de los ecosistemas lénticos, estuarinos y costeros puede ser importante para los corredores fluviales que se benefician de los subsidios de nutrientes que aportan los organismos migratorios (McDowall, 2008).

Los lagos, embalses, estuarios y zonas costeras son áreas de intensos servicios ecosistémicos, especialmente de provisión como la pesca y el suministro de alimentos. Los lagos y embalses son especialmente vulnerables a las alteraciones en los aportes superficiales y contaminantes. El ejemplo más conocido de alteraciones de los caudales afluentes es la desecación y el desastre ambiental en el Mar de Aral debido a las desviaciones de los ríos Amu Dar'ya y Syr Dar'ya para la agricultura de regadío desde la década de 1960 (Micklin, 1988). Patrones similares de desecación están afectando a otros lagos en la árida Asia central (Bai *et al.*, 2011) y humedales en América Latina (Gaviño Novillo, 2005). También se sabe que la alteración en los aportes de escorrentía superficial a los estuarios reduce la productividad de la pesca y otras funciones ecológicas (Drinkwater y Frank, 1994; Gillanders y Kingsford, 2002; Gillson, 2011). Por tanto, un área importante de la investigación ecohidrológica es la evaluación de los requerimientos mínimos de escorrentía para los estuarios (Alber, 2002; Robins *et al.*, 2005; Sun *et al.*, 2009). No obstante, el problema más crítico en esta esfera es la eutrofización y los innumerables cambios ecológicos y la potencial hipoxia que pueda tener consecuencias graves (Cloern, 2001; Smith, 2003; Vadeboncoeur *et al.*, 2003).

3. Los escenarios de gestión de los recursos hídricos en las esferas de la ecohidrología

El impacto del crecimiento económico y demográfico en esta era del Antropoceno se manifiesta en las tres esferas de la ecohidrología por lo cual es necesario profundizar y ampliar nuestro conocimiento integral no solo entre los expertos, sino también entre todos los usuarios del agua. A estos impactos cabe sumar aquel que surge de la variabilidad y cambio climático que exacerba la gravedad de los desafíos relacionados con la gestión del agua, que no puede abordarse desde un enfoque sectorial. Es por ello que es imprescindible brindar evidencias a través de la investigación científica transdisciplinaria, junto con la educación y capacitación para una gestión sostenible de los recursos hídricos.

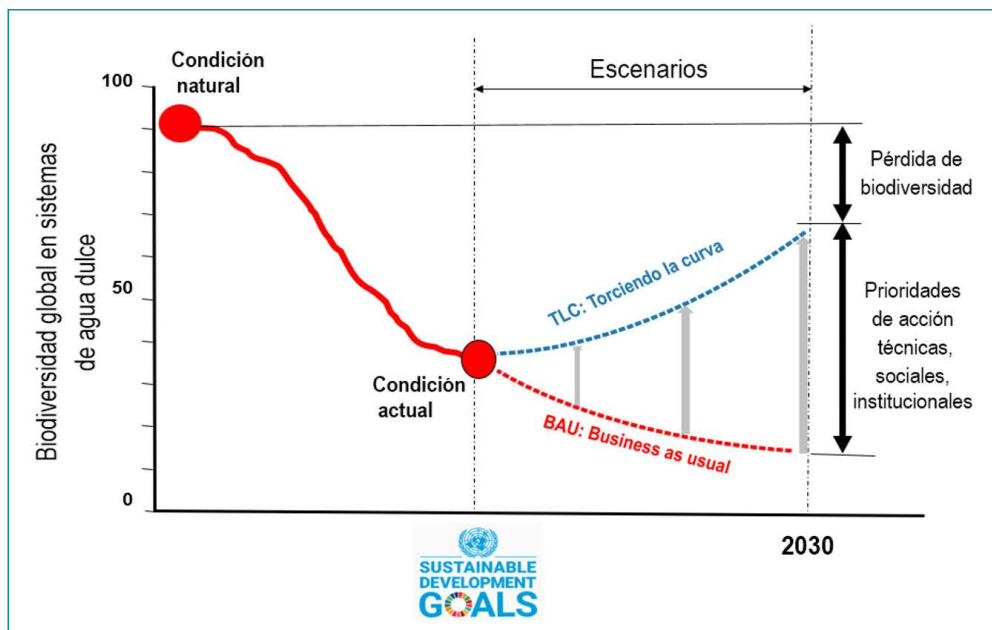
Una de las consecuencias de ese impacto se manifiesta en una reducción de la biodiversidad, principalmente en los ecosistemas terrestres, como los bosques y pastizales, pero lo es mucho más drástico en los ecosistemas de agua dulce, especialmente debido a la pérdida de la conectividad. Al efecto, el Índice Planeta Vivo (Living Planet Index, WWF, 2016) indica que la reducción de su valor para América Latina y el Caribe entre 1970 y 2016 fue del 94 %.

Esta evidencia muestra la urgencia para que los gestores del agua, las partes interesadas y los responsables de la formulación de políticas implementen estrategias que impidan un mayor deterioro de los ecosistemas y hábitats y se promueva una recuperación de la biodiversidad, buscando alcanzar las metas establecidas en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), reconociendo la compleja relación entre los seres humanos y las interacciones con la biosfera y la hidrosfera que son impulsoras de la bioproductividad, la biodiversidad, los ciclos de nutrientes y todos los procesos fundamentales que sustentan la vida.

Uno de los principales desafíos, en consecuencia, es mantener la cantidad y calidad de los recursos hídricos y la biodiversidad, para lo cual es clave la aplicación de un enfoque holístico que incorpore los métodos innovadores de soluciones ecohidrológicas y aquellas basadas en la naturaleza (SbN). Ello debiera ir acompañado de una promoción de la participación de la sociedad a través de una cultura y educación sobre el agua y la sostenibilidad.

En cada sociedad, en consecuencia, a partir del análisis de la pérdida de biodiversidad como indicador de los impactos en los recursos hídricos será posible construir escenarios e inclusive modelarlos. Uno de ellos es el tendencial que surge de no adoptar ninguna medida (escenario Business As Usual, BAU). Otra opción surge del establecimiento de acciones prioritarias que transformen los impulsos socioeconómicos subyacentes que dan lugar a la disminución de la biodiversidad de en los sistemas de agua dulce, como aquellos que surgen de la agricultura, la energía, industria y desarrollo de la infraestructura que requieren una transformación de los paradigmas vigentes de planificación económica, “torciendo la curva” (Gaviño Novillo, 2009; Tickner *et al.*, 2020) de manera de recuperar la biodiversidad en los sistemas de agua dulce a través de mejores prácticas integradas de conservación y gestión de los recursos hídricos en las tres esferas de la ecohidrología indicadas precedentemente (Figura 2).

Figura 2: Escenarios para la gestión de los recursos hídricos



Fuente: Adaptado de Gaviño Novillo, 2009; Tickner *et al.*, 2020.

La ecohidrología brinda un marco y enfoque conceptual a partir del cual es posible desarrollar soluciones con bases ecológicas para los crecientes desafíos en la gestión sostenible de los ecosistemas acuáticos y la recuperación de la biodiversidad por medio de estrategias que mejoren tanto la calidad como la cantidad de agua. La integración y armonización de soluciones basadas en la naturaleza a partir de la aplicación del enfoque ecohidrológico con infraestructuras innovadoras a escala de cuenca, brindan oportunidades para mejorar la eficiencia de las inversiones, con menores costos y la ventaja adicional de minimizar los conflictos por la asignación de recursos hídricos.

Bajo estas premisas, considerando la experiencia adquirida en diversas experiencias concurrentes a nivel mundial surgió la iniciativa de implementar desde el Programa Hidrológico Intergubernamental de la UNESCO una red de Sitios Demostrativos en todo el mundo a partir del año 2001 en los cuales se cuenta con casos de estudio de aplicación de la ecohidrología en la práctica con objeto de demostrar opciones sustentables de gestión de los recursos hídricos, buscando cerrar la brecha entre la ciencia y la toma de decisión. En consecuencia, un sitio demostrativo muestra una aplicación de la ecohidrología en su objetivo de tratar problemas que impactan al ambiente en sus diversas esferas.

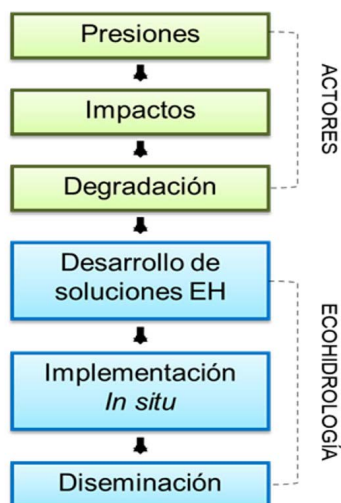
4. La Red de Sitios Demostrativos de la UNESCO

4.1. Ecohidrología y los objetivos de la Red de Sitios Demostrativos

La red cuenta con 28 Sitios Demostrativos ubicados en 19 países en los cuales se ha desarrollado la comprensión entre las interacciones agua-ecosistemas-sociedad llevando a la implementación de soluciones ecohidrológicas innovadoras, utilizando a las cuencas y los sistemas hídricos como laboratorios alrededor del mundo, promoviendo la formación de profesionales y la difusión de experiencias prácticas ecohidrológicas entre la sociedad. La educación y participación de diferentes actores involucrados en la gestión de las cuencas es clave para identificar presiones,

impactos y niveles de degradación a partir de los cuales es posible el desarrollo de soluciones ecohidrológicas que son implementadas *in situ*, permitiendo posteriormente la educación y la difusión. La clave es comprender en cada caso las múltiples dimensiones relacionadas con el agua-biodiversidad-servicios ecosistémicos-resiliencia a impactos-sociedad-educación y cultura (principio WBSRCE) en tanto elementos cruciales de sostenibilidad que deben identificarse en cada caso para la definición de acciones orientadas a brindar soluciones ecohidrológicas (Figura 3).

Figura 3: Bases conceptuales de los sitios demostrativos



Fuente: UNESCO/PHI, 2013.

4.2. La Red de Sitios Demostrativos a nivel mundial

El desarrollo dinámico de la ecohidrología como ciencia planteó la necesidad de proporcionar evidencia de su implementación y su idoneidad para lo cual se decidió constituir una red mundial de proyectos demostrativos durante la Conferencia internacional “Ecohidrología de la teoría a la acción” desarrollada en la ciudad de Wierzba, Polonia (Zalewski, 2004). La red se desarrolló en el marco del Programa de Ecohidrología del PHI-VI de la UNESCO, como parte de la línea principal de acción conjunta del PHI-MAB. El establecimiento de la red global de Sitios y Proyectos Demostrativos permitió la validación del concepto en múltiples zonas geográficas, climas y ecosistemas en las tres esferas de la ecohidrología, considerando también diversos contextos sociales (Figura 5). Su objeto es:

- Promover el avance de la ciencia
- Favorecer la transferencia de conocimientos
- Validar métodos, modelos, herramientas
- Educar y desarrollar capacidades

A continuación, se indican los nombres de los sitios demostrativos en todo el mundo, el país en el que se encuentran, los desafíos que abordan mediante soluciones ecohidrológicas y los objetivos a demostrar (Figura 4).

Figura 4: Red de Sitios Demostrativos de UNESCO/PHI a diciembre de 2021



Fuente: UNESCO/PHI VIII, 2021.

Los detalles de la red se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Resumen de los objetivos, desafíos y ubicación de los sitios demostrativos de ecohidrología de la red global del Programa Hidrológico Intergubernamental de la UNESCO

Nombre sitio demostrativo	País	Desafíos	Objetivo
1. Desarrollo de capacidades en ecohidrología y promoción de prácticas de sitios de demostración de ecohidrología en la cuenca Ribb y la orilla del Lago Tana	Etiopía	Contaminantes y nutrientes; Uso intensivo del suelo	Reducir la invasión de la agricultura a la orilla del lago Tana. Reducir la degradación del suelo y las inundaciones en la cuenca.
2. Solución sistémica de ecohidrología para la restauración del embalse de Burkitu como fuente alternativa de abastecimiento de agua para la población de la ciudad de Asella	Etiopía	Contaminantes y nutrientes; Uso intensivo del suelo	Restaurar la calidad del agua del embalse de Burkitu a partir de una solución sistémica llamada Asella Sequential Biofiltering System (ASBS) ecohidrológica para el uso del suministro de agua para la ciudad de Asella. Mejorar las capacidades del embalse de Burkitu para proporcionar valor recreativo y estético a los servicios de los ecosistemas culturales. Promover e implementar la acuicultura y la pesca de captura para proporcionar servicios ecosistémicos de aprovisionamiento mediante la reducción de contaminantes que ingresan al lago. Rehabilitación de suelos degradados alrededor del lago mediante geotextil biodegradable.

<p>3. La ecohidrología como marco para la utilización sostenible del agua en la cuenca de Naivasha</p>	<p>Kenia</p>	<p>Contaminantes y nutrientes; Uso intensivo del suelo; Sobreexplotación del recurso hídrico; Especies Invasoras; Sequías; Pérdida de capacidad de retención de la vegetación.</p>	<p>Aplicar los principios de EH para devolver los ecosistemas de la cuenca del lago Naivasha a un uso sostenible, inculcando una comprensión del papel del ciclo del agua en el apoyo a la existencia humana y el contexto de los servicios ecosistémicos sostenibles dentro del marco de la culturas religiosas locales, fundamental para la gran mayoría de la población de la cuenca.</p>
<p>4. Desarrollo de herramientas adecuadas para abordar temas sociales, ecológicos y económicos complejos en la planificación hídrica</p>	<p>Australia</p>	<p>Contaminantes y nutrientes; Sobreexplotación del recurso hídrico; Sequías; Pérdida de hábitat.</p>	<p>Objetivo estatutario para lograr un equilibrio equitativo entre las necesidades ambientales, sociales y económicas y que la tasa de extracción y uso del agua sea sostenible.</p>
<p>5. Desarrollo de soluciones para una gestión ambiental del agua en paisajes periurbanos</p>	<p>Australia</p>	<p>Contaminantes y nutrientes; Uso intensivo del suelo; Sequías; Pérdida de capacidad de retención de la vegetación.</p>	<p>Evaluar los efectos de los cambios de uso del suelo y la urbanización sobre la calidad del agua y el microclima. Monitorear los cambios ecohidrológicos en la cuenca. Desarrollar y aplicar herramientas y nuevas tecnologías para mejorar la habitabilidad de las áreas urbanas locales.</p>
<p>6. Ciudad esponja Fengxi</p>	<p>China</p>	<p>Contaminantes y nutrientes; Inundaciones; Sequías; Pérdida de hábitat; Pérdida de capacidad de retención de la vegetación.</p>	<p>Mejorar el entorno de vida. Disfruta el cuerpo y la mente. Construir un sistema socio-ecohidrológico sano y armonioso.</p>
<p>7. Vínculo de la ecología de humedales y la hidrología con el apoyo de técnicas de información para evaluar el hábitat degradado de las aguas de humedal en la llanura de Sanjiang</p>	<p>China</p>	<p>Sobreexplotación del recurso hídrico; Pérdida de hábitat; Pérdida de hábitat.</p>	<p>Política científica para equilibrar el desarrollo sostenible y el ecosistema saludable en el tema del agua. Predecir cuantitativamente la respuesta del ecosistema vegetativo de los humedales al cambio de régimen hidrológico.</p>
<p>8. Gestión de los recursos hídricos regionales vinculados con el mantenimiento de la biodiversidad de los humedales en el área suburbana de Pekín (metropolitano)</p>	<p>China</p>	<p>Contaminantes y nutrientes; Sobreexplotación del recurso hídrico; Pérdida de hábitat.</p>	<p>Presentar las políticas de agua vinculadas con la protección de la biodiversidad de los humedales cercanos al área metropolitana. Cuantificación de los usos del suelo y el cambio climático en los últimos 50 años para la fijación de fuerzas impulsoras en humedales</p>
<p>9. Reservorio de Saguling, en la cuenca superior del Río Citarum</p>	<p>Indonesia</p>	<p>Contaminantes y nutrientes; Uso intensivo del suelo; Erosión y sedimentación</p>	<p>Establecer un programa integrador de actividades para la reducción de la contaminación de fuentes puntuales y difusas, así como un concepto para el control de la escorrentía superficial y la erosión del suelo mediante métodos de ecohidrología.</p>
<p>10. Gestión integrada de la cuenca del lago y humedal Putrajaya</p>	<p>Malasia</p>	<p>Contaminantes y nutrientes.</p>	<p>Aumentar el compromiso de las partes interesadas y la participación comunitaria en Putrajaya. Sensibilizar a las comunidades. Educar a las personas para que sean más responsables en el cuidado del medio ambiente.</p>

<p>11. Comprender la conectividad ecohidrológica en múltiples cuencas para conservar el agua subterránea, proteger el agua superficial y contener los riesgos en una ciudad globalizada, la ciudad de Davao</p>	<p>Filipinas</p>	<p>Contaminantes y nutrientes; Uso intensivo del suelo; Sobreexplotación del recurso hídrico.</p>	<p>Transformar el alto nivel de conciencia actual en políticas y programas cohesionados y de alto impacto (tanto en el gobierno como en la sociedad civil).</p>
<p>12. Gestión sostenible de zonas estuarinas para el control de la eutrofización, floraciones tóxicas y conservación de la biodiversidad en la Bahía de Kaštela</p>	<p>Croacia</p>	<p>Contaminantes y nutrientes; Uso intensivo del suelo.</p>	<p>Protección de la calidad del agua Creación de condiciones para el desarrollo seguro de la economía. Mantenimiento del nivel alcanzado de calidad del agua</p>
<p>13. Rápido poroso construido en la periferia urbana de Lyon</p>	<p>Francia</p>	<p>Contaminantes y nutrientes; Sequías.</p>	<p>A partir de varios años de experimentos de campo con un enorme conjunto de datos de registro, podemos confirmar que una secuencia de 3 pequeñas presas porosas que sirven para disminuir la velocidad del agua, instalados en un pequeño curso de agua estacional puede atrapar y procesar completamente la contaminación orgánica que se introduce durante los eventos lluviosos. Este sistema es automantenido por aguas de alto flujo que regeneran el biofiltro en su lugar. El principio está en curso de replicación en otro pequeño curso de agua donde debería ayudar al arroyo principal receptor a recuperar su buen estado ecológico.</p>
<p>14. Análisis ecohidrológicos en la cuenca del Río Lowlander Kielstau, para la gestión sostenible de los recursos hídricos y la educación en paisajes rurales</p>	<p>Alemania</p>	<p>Contaminantes y nutrientes; Pérdida de capacidad de retención de la vegetación.</p>	<p>Discutir el estado actual Cooperación entre la investigación, la administración y las partes interesadas locales para resolver problemas. Implementar enfoques ecohidrológicos Educar a los estudiantes</p>
<p>15. Planes de gestión sostenible de los recursos hídricos en la cuenca del Río Tíber para la protección del medio ambiente, la regulación de los flujos mínimos de instalación y la preservación del ecosistema del lago Trasimeno</p>	<p>Italia</p>	<p>Contaminantes y nutrientes; Sobreexplotación del recurso hídrico; Pérdida de hábitat.</p>	<p>Armonizar la protección de la biodiversidad, las expectativas de las partes interesadas y las limitaciones administrativas para lograr una gestión integrada de la cuenca.</p>
<p>16. Desarrollo e implementación del concepto de ecohidrología para la reducción de las floraciones de cianobacterianas en un embalse artificial (cuenca del Río Pilica)</p>	<p>Polonia</p>	<p>Contaminantes y nutrientes.</p>	<p>Establecer una plataforma de múltiples partes interesadas. Transferencia de conocimiento, tecnología y experiencia a otros sitios. Sensibilización ecológica y activación de la comunidad local.</p>
<p>17. Gestión de aguas urbanas y planificación urbana para la salud humana y el desarrollo sostenible basado en la ecohidrología (ciudad de Lodz, Río Ner)</p>	<p>Polonia</p>	<p>Contaminantes y nutrientes; Pérdida de capacidad de retención de la vegetación.</p>	<p>Cooperación entre las PTAR y los investigadores Implicación de las PTAR en la plataforma de partes interesadas (Learning Alliance), transferencia de conocimientos y conocimientos a otras PTAR de la región. Cooperación con empresas.</p>

18. Gestión de aguas urbanas y planificación urbana para la salud humana y el desarrollo sostenible basado en ecohidrología (ciudad de Lodz, Río Sokolowka)	Polonia	Contaminantes y nutrientes; Pérdida de capacidad de retención de la vegetación.	Establecimiento de una plataforma de partes interesadas (Learning Alliance). Transferencia de conocimiento, tecnología y experiencia a otros sitios. Formulación de documentos estratégicos basados en la experiencia de Sokolowka.
19. Gestión sostenible de zonas estuarinas para el control de eutroficación, floraciones tóxicas, especies invasoras y conservación de la biodiversidad (estuario Guadiana)	Portugal	Contaminantes y nutrientes; Especies Invasoras; Pérdida de hábitat; Pérdida de capacidad de retención de la vegetación.	Discutir el equilibrio entre la asignación de agua para la agricultura y la producción de energía hidroeléctrica y la sostenibilidad de los ecosistemas estuarinos y los servicios costeros.
20. Gestión adaptativa del agua en respuesta a los efectos del cambio hidroclimático en los servicios ecosistémicos y la biodiversidad de la cuenca Norrström	Suecia	Contaminantes y nutrientes; Uso intensivo del suelo.	Reducir de manera eficiente los impactos de la eutrofización de las presiones demográficas, agrícolas e industriales. Comprender y mitigar y adaptarse eficientemente a los impactos de los cambios hidroclimáticos y de uso de la tierra.
21. Lago Lácar: mejora de las políticas de uso de la tierra con un enfoque ecohidrológico San Martín de los Andes	Argentina	Contaminantes y nutrientes; Uso intensivo del suelo; Inundaciones; Pérdida de capacidad de retención de la vegetación.	Formulación de políticas basada en evidencias. Participación de las autoridades locales / partes interesadas en la implementación de estrategias de gestión de SE. Formación in situ para jóvenes científicos y responsables de la toma de decisiones. Difusión de información sobre enfoque ecohidrológico para la gestión del agua.
22. Restauración del hábitat de los humedales de Victoria Pond en la ciudad histórica de George Town, Great Exuma para el manejo sostenible para controlar la contaminación y mejorar el hábitat de los peces de la costa	Bahamas	Contaminantes y nutrientes; Sobreexplotación del recurso hídrico; Especies invasoras; Pérdida de hábitat.	Crear una reserva de manglares local dentro de George Town para proteger los humedales. Ayudar a mantener y financiar la reserva.
23. Una metodología para estimar la escorrentía compensatoria en Costa Rica, estudio Rana-ICE	Costa Rica	Sobreexplotación del recurso hídrico; Inundaciones.	Reventazón es un sistema regulado desde los años 60, Savegre se mantiene como una condición prístina y ha sido reservado como río sin represas, Térraba está diseñado para uso futuro en energía.
24. Recuperación del ancestral sistema hídrico de Los Paltas con enfoque ecohidrológico para abastecimiento de agua a la ciudad de Catacocha	Ecuador	Sobreexplotación del recurso hídrico; Sequías; Pérdida de capacidad de retención de la vegetación; Recarga de acuíferos limitada.	Crear áreas de vegetación para protección de fuentes y turismo. Para mantener nuevas condiciones de EH restauradas. Incrementar la recarga de acuíferos. Recuperar servicios ambientales de áreas conservadas y restauradas.
25. Galápagos	Ecuador	Contaminantes y nutrientes; Especies invasoras; Sequías; Sobreexplotación del recurso hídrico; Inundaciones; Pérdida de capacidad de retención de la vegetación.	Adoptar la ecohidrología como una herramienta para la gestión Integrada del Recurso Hídrico. Educar y entrenar la población. Reducir la contaminación del acuífero.

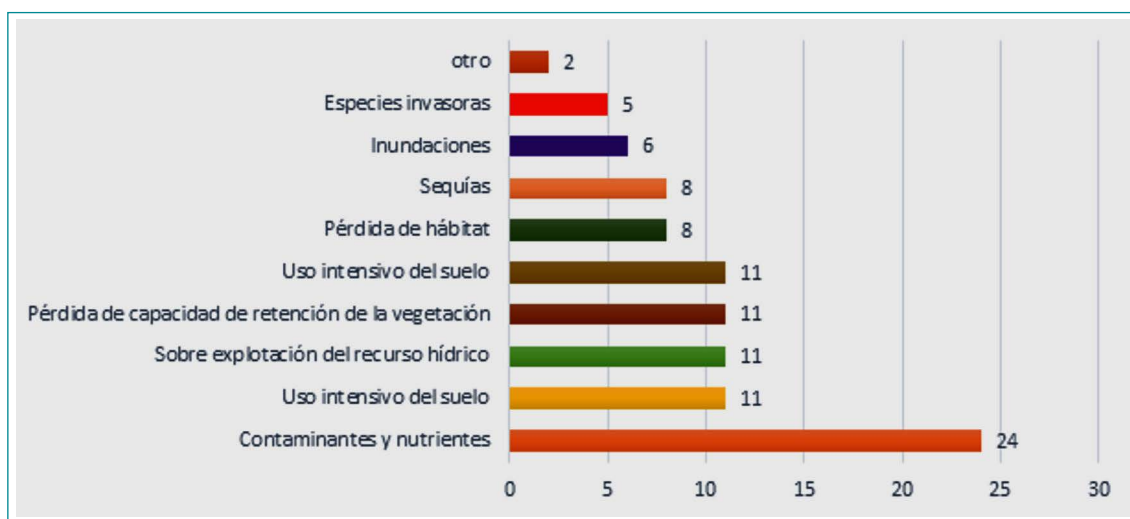
26. Complejo cenagoso Zapatosa	Colombia	Uso Intensivo del suelo; Contaminantes y nutrientes; Pérdida de capacidad de retención de la vegetación; Sobreexplotación del recurso hídrico; Inundaciones; Pérdida de hábitat.	Restablecer el diálogo entre los sistemas naturales, las comunidades y las instituciones para lograr un realce de la riqueza ecosistema de la región buscando mejorar la calidad de vida de la población.
27. Cuenca del Río Teusacá	Colombia	Pérdida de capacidad de retención de la vegetación; Contaminantes y nutrientes; Inundaciones; Sequías; Uso Intensivo del suelo.	Mejorar la calidad del agua para generar espacio de apropiación para la población y un modelo replicable bajo diferentes condiciones. Construir un espacio de aprendizaje donde diferentes actores involucrados puedan interactuar para ayudar al manejo integrado de la cuenca.

Fuente: UNESCO, PHI, 2021; Ecohydrology-ihp.org.

4.3. Desafíos abordados en los Sitios Demostrativos

Un análisis de 27 Sitios Demostrativos en 19 países muestra que el mayor desafío abordado corresponde a problemas de contaminantes y el exceso de nutrientes (Figura 5).

Figura 5. Frecuencia de los desafíos abordados por los sitios demostrativos a nivel mundial



Fuente: UNESCO, PHI, 2021.

En segundo lugar, se ubica el uso intensivo del suelo en al menos 11 sitios, así como otros desafíos vinculados a la gestión de los recursos hídricos en desmedro de la biodiversidad y mantenimiento en la provisión de los bienes y servicios ecosistémicos. En cada uno de los capítulos de la presente publicación centrada en los Sitios Demostrativos de América Latina y el Caribe se plantean los mayores desafíos para cada uno de ellos. La información también se encuentra disponible en la plataforma web: Ecohydrology-ihp.org diseñada entre UNESCO/PHI y el Centro Internacional de Hidroinformática (CIH) Binacional de Paraguay y Brasil y que se encuentra operativa desde 2016.

5. Conclusiones

La Red de Sitios y Proyectos Demostrativos en ecohidrología de la UNESCO/PHI conforma un selecto grupo de iniciativas alrededor del mundo donde ha sido posible demostrar el uso sostenible de los recursos hídricos por parte de las sociedades en beneficio de la restauración de la biodiversidad (Zalewski *et al.*):

- Conforman casos de estudio en los cuales se ha aplicado el enfoque ecohidrológico mediante la integración del conocimiento proveniente de diferentes disciplinas científicas en escalas que van desde el nivel molecular hasta una cuenca en su conjunto.
- Son ‘laboratorios a cielo abierto’ donde se llevan adelante investigaciones integradas en base a la cooperación mutua, el intercambio de información y la identificación de sinergias logrando una mejor comprensión de los patrones de interacción agua / biota y su importancia para las sociedades.
- Permiten la comparación de resultados a partir de patrones de interacción entre el agua y la biota en diferentes zonas geográficas buscando fortalecer la resiliencia de los sistemas acuáticos al impacto humano por medio del incremento de la capacidad de carga de los sistemas ecológicos.
- Promueven la comprensión de la interacción entre la hidrología y la biota y las soluciones basadas en la naturaleza con efecto educativo y formativo para ser difundidas entre los tomadores de decisión.

Los avances en la implementación de la ecohidrología en los Sitios y Proyectos Demostrativos que conforman la red mundial de UNESCO/PHI permiten en la actualidad demostrar alternativas de gestión “inteligente” de los recursos hídricos y los ecosistemas asociados con objeto de mitigar los impactos sobre la biodiversidad, “torciendo la curva” del deterioro al que se encuentran sometidos. No obstante, sigue siendo un gran desafío la multiplicación de experiencias en América Latina y el Caribe. Se espera que este Documento Técnico inspire a otros investigadores, profesionales libres, y autoridades con responsabilidades en la gestión del agua a que promuevan y lleven a cabo la implementación del enfoque de la ecohidrología en la práctica.

Nota

La segunda sección del Capítulo 1 incluye una traducción y adaptación al castellano del trabajo en inglés “Training hydrologists to be ecohydrologists and play a leading role in environmental problem solving” del cual el autor principal es coautor. Resume las experiencias recogidas por los Prof. Michael McClain (Instituto para la Educación sobre el Agua, IHE Delft, Países Bajos), Prof. Luis Chicharo (Universidad de Algarve / Portugal), Wilhelm Windhorst (Universidad Christian-Albrechts-Kiel / Alemania); Prof. Maciej Zalewski (Universidad de Lodz / Poland), Prof. Marcelo Gaviño Novillo (Universidad Nacional de La Plata / Argentina), en su calidad de Coordinadores del Consorcio de la Maestría ERASMUS MUNDUS en Ecohidrología desarrollada en el período 2010-2017. (https://antigo.ualg.pt/sites/ualg.pt/files/fct/apresentacao_the_ecohyd_programme_fct_ualg_30.05.2013_-_luis_chicharo_30.05.2013.pdf).

Referencias bibliográficas

- Alber, M. (2002). A conceptual model of estuarine freshwater inflow management, *Estuaries*, 25, 1246-1261, 10.1007/bf02692222.
- Arthington, A. H.; Naiman, R. J.; McClain, M. E.; Nilsson, C. (2010). Preserving the biodiversity and ecological services of rivers: new challenges and research opportunities, *Freshwater Biology*, 55, 1-16, 10.1111/j.1365-2427.2009.02340.x.
- Bai, J.; Chen, X.; Li, J.; Yang, L.; Fang, H. (2011). Changes in the area of inland lakes in arid regions of central Asia during the past 30 years, *Environmental Monitoring and Assessment*, 178, 247-256.
- Bornette, G.; Amoros, C.; Lamouroux, N. L. (1998). Aquatic plant diversity in riverine wetlands: The role of connectivity, *Freshwater Biology*, 39, 267-283, 10.1046/j.1365-2427.1998.00273.x.
- Boulton, A. J.; Datry, T.; Kasahara, T.; Mutz, M.; Stanford, J. A. (2010). Ecology and management of the hyporheic zone: stream-groundwater interactions of running waters and their floodplains, *Journal of the North American Benthological Society*, 29, 26-40.
- Brunke, M.; Gonser, T. (1997). The ecological significance of exchange processes between rivers and groundwater, *Freshwater Biology*, 37, 1-33, 10.1046/j.1365-2427.1997.00143.x.
- Burgin, A. J.; Hamilton, S. K. (2007). Have we overemphasized the role of denitrification in aquatic ecosystems? A review of nitrate removal pathways, *Frontiers in Ecology and the Environment*, 5, 89-96, 10.1890/1540-9295(2007)5[89:hwotro]2.0.co;2.
- Caylor, K. K.; D'Odorico, P.; Rodríguez-Iturbe, I. (2006). On the ecohydrology of structurally heterogeneous semiarid landscapes, *Water Resources Research*, 42, W07424 10.1029/2005wr004683.
- Chemers, M. M. (1997). *An integrative theory of leadership*, Lawrence Elbaum Associates, Inc., Publishers, Mahwah.
- Chícharo, L.; Chícharo, M. A.; Ben-Hamadou, R. (2006). Use of a hydrotechnical infrastructure (Alqueva Dam) to regulate planktonic assemblages in the Guadiana estuary: Basis for sustainable water and ecosystem services management, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 70, 3-18.
- Cloern, J. E. (2001). Our evolving conceptual model of the coastal eutrophication problem, *Marine Ecology-Progress Series*, 210, 223-253, 10.3354/meps210223.
- Colman, E. A. (1953). *Vegetation and Watershed Management: An Appraisal of Vegetation Management in Relation to Water Supply, Flood Control, and Soil Erosion*, Ronald Press Co., New York, 412 pages.
- Costanza, R.; d'Arge, R.; de Groot, R.; Farber, S.; Grasso, M.; Hannon, B.; Limburg, K.; Naeem, S.; Oneill, R. V.; Paruelo, J.; Raskin, R. G.; Sutton, P.; van den Belt, M. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital, *Nature*, 387, 253-260, 10.1038/387253a0.
- Crutzen, P. J.; Stoermer, E. F. (2000). The Anthropocene. *Global Change Newsl*, 41, 17-18.
- Drinkwater, K. F.; Frank, K. T. (1994). Effects of river regulation and diversion on marine fish and invertebrates, *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 4, 135-151.
- Dudgeon, D.; Arthington, A. H.; Gessner, M. O.; Kawabata, Z. I.; Knowler, D. J.; Leveque, C.; Naiman, R. J.; Prieur-Richard, A. H.; Soto, D.; Stiassny, M. L. J.; Sullivan, C. A. (2006). Freshwater biodiversity: importance, threats, status and conservation challenges, *Biological Reviews*, 81, 163-182, 10.1017/s1464793105006950.
- Eshleman, K. N. (2004). Hydrological consequences of land use change: A state-of-the-science review, in: *Ecosystems and Land Use Change*, edited by: DeFries, R. S.; Asner, G. P.; Houghton, R. A.; American Geophysical Union, Washington, DC, 13-30.
- Falkenmark, M. (2003). *Water Management and Ecosystems: Living with Change*, Stockholm.

- Fohrer, N.; Haverkamp, S.; Frede, H. G. (2005). Assessment of the effects of land use patterns on hydrologic landscape functions: development of sustainable land use concepts for low mountain range areas, *Hydrological Processes*, 19, 659-672, 10.1002/hyp.5623.
- Foley, J. A.; DeFries, R.; Asner, G. P.; Barford, C.; Bonan, G.; Carpenter, S. R.; Chapin, F. S.; Coe, M. T.; Daily, G. C.; Gibbs, H. K.; Helkowski, J. H.; Holloway, T.; Howard, E. A.; Kucharik, C. J.; Monfreda, C.; Patz, J. A.; Prentice, I. C.; Ramankutty, N.; Snyder, P. K. (2005). Global consequences of land use, *Science*, 309, 570-574, 10.1126/science.1111772.
- Gaviño Novillo, M.; Mendiburo, N (2000). *World water vision: South America*, GWP, Stockholm/Buenos Aires.
- Gaviño Novillo, M. (2005). *Scenarios for environmental flow: The Atuel River and Wetlands case study (Argentina)*, National University of La Pampa, Santa Rosa, Argentina (in spanish).
- Gaviño Novillo, M.; Bereciartua, P. (2009). *Lectures on IWRM*, International Postgraduate Course, University of Buenos Aires, Argentine Water Resources Institute, UNDP, UNESCO, GWP.
- Gaviño Novillo, M. (2020). *Urban ecohydrology and biophilia*, Lecture on Ecohydrology, ERASMUS MUNDUS MScCourse, Algarve University, Portugal.
- Gillanders, B. M.; Kingsford, M. J. (2002). Impact of changes in flow of freshwater on estuarine and open coastal habitats and the associated organisms, in: *Oceanography and Marine Biology*, Vol 40, Oceanography and Marine Biology, Taylor & Francis Ltd, London, 233-309.
- Gillson, J. (2011). Freshwater Flow and Fisheries Production in Estuarine and Coastal Systems: Where a Drop of Rain Is Not Lost, *Reviews in Fisheries Science*, 19, 168-186, 10.1080/10641262.2011.560690.
- Hill, N. M.; Keddy, P. A.; Wisheu, I. C. (1998). A hydrological model for predicting the effects of dams on the shoreline vegetation of lakes and reservoirs, *Environmental Management*, 22, 723-736, 10.1007/s002679900142.
- IPCC (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Summary for policy makers*, WGI, WMO, UNEP.
- Kimmerer, W. J. (2002). Effects of freshwater flow on abundance of estuarine organisms: physical effects or trophic linkages?, *Marine Ecology-Progress Series*, 243, 39-55, 10.3354/meps243039.
- Lake, P. S.; Bond, N.; Reich, P. (2007). Linking ecological theory with stream restoration, *Freshwater Biology*, 52, 597-615, 10.1111/j.1365-2427.2006.01709.x.
- Likens, G. E.; Bormann, F. H.; Pierce, R. S.; Eaton, J. S. Johnson, N. M. (1977). *Biogeochemistry of a Forested Ecosystem*, Springer-Verlag, New York, 153 pages.
- Livingston, R. J.; Niu, X.; Lewis, F. G.; Woodsum, G. C. (1997). Freshwater Input to a Gulf Estuary: Long-Term Control of Trophic Organization, *Ecological Applications*, 7, 277-299.
- Lytle, D. A.; Poff, N. L. (2004). Adaptation to natural flow regimes, *Trends in Ecology & Evolution*, 19, 94-100, 10.1016/j.tree.2003.10.002.
- Marcarelli, A. M.; Baxter, C. V.; Mineau, M. M.; Hall, R. O. (2011). Quantity and quality: unifying food web and ecosystem perspectives on the role of resource subsidies in freshwaters, *Ecology*, 92, 1215-1225.
- McClain, M.; Chícharo, L.; Fohrer, N.; Gaviño-Novillo, M.; Windhorst, W.; Zalewski, M. (2012). Training hydrologists to be ecohydrologists and play a leading role in environmental problem solving. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*. 9. 1481-1514. 10.5194/hessd-9-1481-2012.
- McDowall, R. (2008). Diadromy, history and ecology: a question of scale, *Hydrobiologia*, 602, 5-14.
- MEA (Millennium Ecosystem Assessment) (2005). *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis* Island Press, Washington, DC.

- Meybeck, M. (2003). Global analysis of river systems: from Earth system controls to Anthropocene syndromes, *Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences*, 358, 1935-1955, 10.1098/rstb.2003.1379.
- Micklin, P. P. (1988). Desiccation of the Aral Sea - a Water Management Disaster in the Soviet-Union, *Science*, 241, 1170-1175, 10.1126/science.241.4870.1170.
- Monteith, J. L. (1965). Evaporation and environment, in: *Symposium of the Society for Experimental Biology, The State and Movement of Water in Living Organisms*, edited by: Fagg, G. E.; Academic Press, New York, 205-234.
- Naiman, R. J.; Decamps, H.; Pollock, M. (1993). The Role of Riparian Corridors in Maintaining Regional Biodiversity, *Ecological Applications*, 3, 209-212, 10.2307/1941822.
- Naiman, R. J.; and Decamps, H. (1997). The ecology of interfaces: Riparian zones, *Annual Review of Ecology and Systematics*, 28, 621-658, 10.1146/annurev.ecolsys.28.1.621.
- Naiman, R. J.; Latterell, J. J.; Pettit, N. E.; Olden, J. D. (2008). Flow variability and the biophysical vitality of river systems, *Comptes Rendus Geoscience*, 340, 629-643, 10.1016/j.crte.2008.01.002.
- Osborne, T. M.; Lawrence, D. M.; Slingo, J. M.; Challinor, A. J.; Wheeler, T. R. (2004). Influence of vegetation on the local climate and hydrology in the tropics: sensitivity to soil parameters, *Climate Dynamics*, 23, 45-61, 10.1007/s00382-004-0421-1.
- Pitman, A. J. (2003). The evolution of, and revolution in, land surface schemes designed for climate models, *International Journal of Climatology*, 23, 479-510, 10.1002/joc.893.
- Poff, N. L.; Allan, J. D. (1995). Functional-Organization of Stream Fish Assemblages in Relation to Hydrological Variability, *Ecology*, 76, 606-627, 10.2307/1941217.
- Poff, N. L.; Allan, J. D.; Bain, M. B.; Karr, J. R.; Prestegard, K. L.; Richter, B. D.; Sparks, R. E.; Stromberg, J. C. (1997). The natural flow regime, *Bioscience*, 47, 769-784, 10.2307/1313099.
- Poff, N. L.; Zimmerman, J. K. H. (2010). Ecological responses to altered flow regimes: a literature review to inform the science and management of environmental flows, *Freshwater Biology*, 55, 194-205, 10.1111/j.1365-2427.2009.02272.x.
- Popp, A.; Vogel, M.; Blaum, N.; Jeltsch, F. (2009). Scaling up ecohydrological processes: Role of surface water flow in water-limited landscapes, *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences*, 114, 10.1029/2008jg000910.
- Porporato, A.; Rodriguez-Iturbe, I. (2002). Ecohydrology - a challenging multidisciplinary research perspective, *Hydrological Sciences Journal*, 47, 811-821, 10.1080/02626660209492985.
- Priestly, C. H. B.; Taylor, R. J. (1972). On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters, *Monthly Weather Review*, 10080-91.
- Richter, B. D.; Baumgartner, J. V.; Wigington, R.; Braun, D. P. (1997). How much water does a river need?, *Freshwater Biology*, 37, 231-249, 10.1046/j.1365-2427.1997.00153.x.
- Rietkerk, M.; Boerlijst, M. C.; van Langevelde, F.; HilleRisLambers, R.; van de Koppel, J.; Kumar, L.; Prins, H. H. T.; de Roos, A. M. (2002). Self-organization of vegetation in arid ecosystems, *American Naturalist*, 160, 524-530, 10.1086/342078.
- Robins, J. B.; Halliday, I. A.; Staunton-Smith, J.; Mayer, D. G.; Sellin, M. J. (2005). Freshwater-flow requirements of estuarine fisheries in tropical Australia: a review of the state of knowledge and application of a suggested approach, *Marine and Freshwater Research*, 56, 343-360, 10.1071/mf04087.
- Rodriguez-Iturbe, I.; D'Odorico, P.; Laio, F.; Ridolfi, L.; Tamea, S. (2007). Challenges in humid land ecohydrology: Interactions of water table and unsaturated zone with climate, soil, and vegetation, *Water Resources Research*, 43, 10.1029/2007wr006073.

- Smith, V. (2003). Eutrophication of freshwater and coastal marine ecosystems a global problem, *Environmental Science and Pollution Research*, 10, 126-139.
- Sun, T.; Yang, Z. F.; Cui, B. S. (2008). Critical Environmental Flows to Support Integrated Ecological Objectives for the Yellow River Estuary, China, *Water Resources Management*, 22, 973-989.
- Tickner, D.; Opperman, J.; Abell, R.; Acreman, M.; Arthington, A.; Bunn, S.; Cooke, S.; Dalton, J.; Darwall, W.; Edwards, G.; Harrison, I.; Hughes, K.; Jones, T.; Leclère, D.; Lynch, A.; Leonard, P.; McClain, Muruven, D.; Olden, J.; Ormerod, S.; Robinson, J. Tharme, R.; Thieme, M.; Tockner, K.; Wright, M.; Young, M. (2020). Bending the Curve of Global Freshwater Biodiversity Loss: An Emergency Recovery Plan, *BioScience*, Volume 70, Issue 4, April, Pages 330-342, <https://doi.org/10.1093/biosci/biaa002>
- Tockner, K.; Stanford, J. A. (2002). Riverine flood plains: present state and future trends, *Environmental Conservation*, 29, 308-330, 10.1017/s037689290200022x.
- UNESCO/PHI (2010). La ecohidrología como desafío: experiencias y estudios de caso. Documentos Técnicos del PHI-LAC, N.º 23.
- UNESCO/IHP (2020). Second-order draft of the strategic plan of the 9th Phase of IHP (IHP-IX, 2022-2029), IHP/IC-XXIV/Ref. 1, Paris, 29/X/2020.
- Vadeboncoeur, Y.; Jeppesen, E.; Vander Zanden, M. J.; Schierup, H. H.; Christoffersen, K.; Lodge, D. M. (2003). From Greenland to green lakes: Cultural eutrophication and the loss of benthic pathways in lakes, *Limnology and Oceanography*, 48, 1408-1418.
- van Griensven, A.; Meixner, T.; Grunwald, S.; Bishop, T.; Diluzio, A.; and Srinivasan, R. (2006). A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models, *Journal of Hydrology*, 324, 10-23, 10.1016/j.jhydrol.2005.09.008.
- Vitousek, P. M.; Mooney, H. A.; Lubchenco, J.; and Melillo, J. M. (1997). Human domination of Earth's ecosystems, *Science*, 277, 494-499, 10.1126/science.277.5325.494.
- Vorosmarty, C. J.; McIntyre, P. B.; Gessner, M. O.; Dudgeon, D.; Prusevich, A.; Green, P.; Glidden, S.; Bunn, S. E.; Sullivan, C. A.; Liermann, C. R.; Davies, P. M. (2010). Global threats to human water security and river biodiversity, *Nature*, 467, 555-561, 10.1038/nature09440.
- Wagner, I.; Zalewski, M. (2009). Ecohydrology as a basis for the sustainable city strategic planning: focus on Lodz, Poland, *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 8, 209-217.
- Ward, J. V.; Tockner, K.; Uehlinger, U.; Malard, F. (2001). Understanding natural patterns and processes in river corridors as the basis for effective river restoration, *Regulated Rivers-Research & Management*, 17, 311, 10.1002/rrr.646.abs.
- Wohl, E.; Angermeier, P. L.; Bledsoe, B.; Kondolf, G. M.; MacDonnell, L.; Merritt, D. M.; Palmer, M. A.; Poff, N. L.; Tarboton, D. (2005). River restoration, *Water Resources Research*, 41, 10.1029/2005wr003985.
- Wolanski, E.; Boorman, L. A.; Chícharo, L.; Langlois-Saliou, E.; Lara, R.; Plater, A. J.; Uncles, R. J.; Zalewski, M. (2004). Ecohydrology as a new tool for sustainable management of estuaries and coastal waters, *Wetlands Ecology and Management*, 12, 235-276.
- Wondzell, S. M. (2011). The role of the hyporheic zone across stream networks, *Hydrological Processes*, 25, 3525-3532, 10.1002/hyp.8119.
- WWF (2016). Living Planet Report 2016. Risk and resilience in a new era. WWF International, Gland, Switzerland.
- Zalewski, M. (2002). Ecohydrology - the use of ecological and hydrological processes for sustainable management of water resources, *Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques*, 47, 823-832, 10.1080/02626660209492986.

Zalewski, M.; Harper, D.; Wagner, I. (2009). Ecohydrology –why Demonstration Projects throughout the world?, *Ecohydrology & Hydrobiology*, 9, 1, 3-11.

Zalewski, M. (2011). Ecohydrology for implementation of the EU water framework directive, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management*, 164, 375-385, 10.1680/wama.1000030.

Zalewski, M. (2011). Ecohydrology. In: Gliński J.; Horabik J.; Lipiec J. (eds.) *Encyclopedia of Agrophysics. Encyclopedia of Earth Sciences Series*. Springer, Dordrecht. <https://doi-org.ezproxy.javeriana.edu.co/10.1007/978-90-481-3585-146>

Zalewski, M. (2021). Ecohydrology. An Integrative Sustainability Science. In *Hydrology*. IntechOpen.

Zedler, J. B. (2000). Progress in wetland restoration ecology, *Trends in Ecology & Evolution*, 15, 402-407, 10.1016/s0169-5347(00)01959-5.

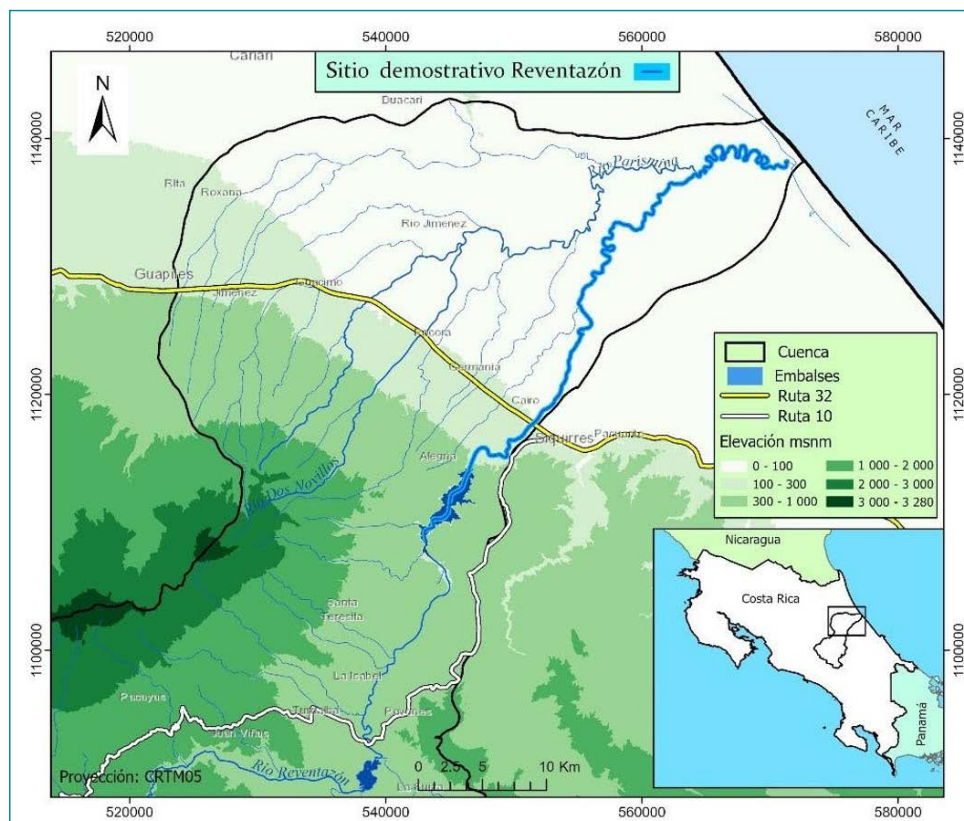
Cuenca Río Reventazón: Seguimiento de aplicación de caudal de compensación y otras medidas ecohidrológicas (Costa Rica)

Luz Marina Rodríguez Quirós ⁽¹⁾, Anny Chaves Quirós ⁽²⁾

1. Ubicación del Sitio Demostrativo

El sitio demostrativo Río Reventazón se asocia actualmente al área de influencia de la Planta Hidroeléctrica Reventazón. Se ubica en la vertiente Caribe en el cantón de Siquirres de la provincia de Limón de Costa Rica, incluye la parte media y baja de la cuenca del Río Reventazón (Figura 1).

Figura 1. Ubicación del Sitio demostrativo Río Reventazón.



Fuente: Instituto Costarricense de Electricidad (ICE).

(1) Área Socioambiental de la Región Huetar, División Generación, Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) (2) Consultora Independiente, Miembro del equipo Ecohidrología, PHI UNESCO

(1) LRodriguezQ@ice.go.cr, (2) anny.chaves13@gmail.com

2. Organización formal a cargo

El Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) es una institución autónoma del Gobierno de Costa Rica que es responsable de la planificación, construcción, operación de la infraestructura y producción de electricidad en el país.

La División Generación, Región Huetar, es la unidad encargada del mantenimiento y operación de la Planta Hidroeléctrica Reventazón, dentro del Sistema Integrado de Gestión se lleva un control estricto sobre el cumplimiento de la legislación ambiental nacional y, entre otros múltiples aspectos, se cumple con las normas de Calidad ISO 9001, Ambiente ISO 14001 y Riesgo ISO 45001.

Con una visión de futuro, el Río Reventazón fue declarado reserva nacional de energía por ley en el año 1953 (ley 1.657). Desde entonces se han construido seis plantas productoras de energía en un sistema encadenado. La primera planta (Río Macho) se construyó en 1963 captando las aguas de los tributarios de la cuenca alta en un pequeño embalse, en 1966 se construyó la Planta Cachí, con una presa y un embalse, con lo que se produjo la primera intervención de regulación del Río Reventazón, la tercera obra fue la planta de Angostura, que empezó a generar en el año 2002, también cuenta con una presa y un embalse en el cauce principal del río. Otro proyecto, La Joya, asociado a utilizar las aguas de desfogue de Cachí y por lo tanto ubicado aguas arriba de Angostura, entró en operación en 2005. Asimismo, el Proyecto Torito, que aprovecha las aguas de desfogue de Angostura, entró en operación en 2015. Estos dos proyectos fueron construidos por empresas privadas, pero entregan la energía al sistema nacional operado por el ICE. Finalmente, la Planta Hidroeléctrica Reventazón ingresó en operación en 2016.

En el año 2019 el ICE recibió el reconocimiento “Blue Planet Prize” de la Asociación Internacional de Hidroelectricidad (IHA), resaltando las buenas prácticas de sostenibilidad en el proceso de construcción del Proyecto Hidroeléctrico Reventazón, con el que se reconoce los resultados obtenidos en la aplicación del Protocolo de Evaluación de la Sostenibilidad, desarrollado en Costa Rica con apoyo financiero y técnico del Banco Mundial (BM).

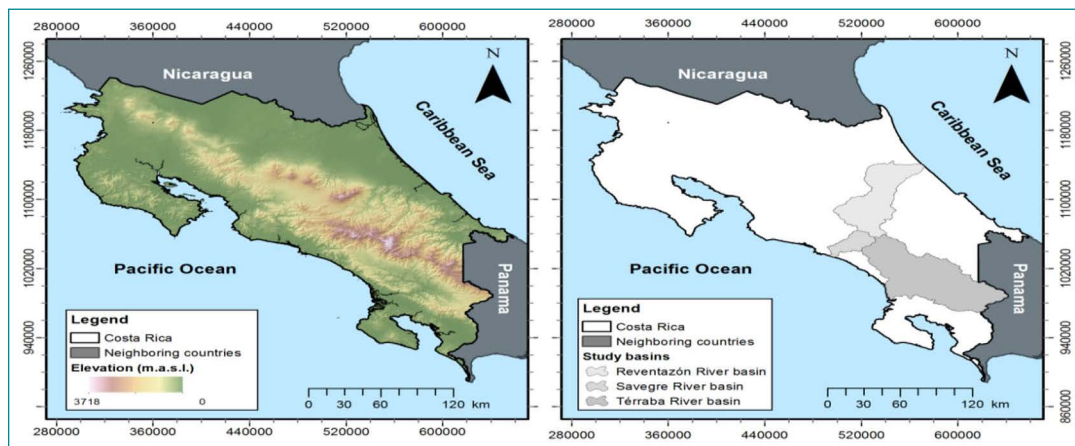
3. Características generales del sitio demostrativo

El sitio demostrativo se presentó originalmente al Programa de Ecohidrología en el año 2007 como una prueba de campo de la aplicación de la metodología RANA, para definir los caudales ambientales asociados a los aprovechamientos hidroeléctricos en tres diferentes cuencas de Costa Rica llamados proyectos en ese momento por estar en etapa constructiva: el Proyecto Hidroeléctrico Reventazón en el río con el mismo nombre; los proyectos Brujo 1, Brujo 2 y Savegre en el Río Savegre y el Proyecto Hidroeléctrico El Diquis en el Río Térraba (Figura 2). La metodología RANA se aplicó para todos los casos, dando la oportunidad de ponerla a prueba en condiciones muy diversas desde el punto de vista hidrológico, ambiental y socioeconómico.

La propuesta y puesta en prueba de una metodología basada en la mejor información hidrológica, ecológica y social es una demostración del aporte del conocimiento ecohidrológico para resolver situaciones que se presentan a la hora de construir grandes obras de ingeniería

La metodología fue desarrollada por el ICE y tuvo dos fases. En una primera fase, realizada entre 2003 y 2005 en el contexto de una cooperación con el Gobierno de Suecia, participaron seis expertos de la consultora AB Hydroconsult y 11 profesionales del Instituto Costarricense de Electricidad con especialidades en hidrología, hidráulica, ecología, socioeconomía, informática y cartografía.

Figura 2. Modelo de elevación digital de Costa Rica (mapa de la izquierda) y las tres cuencas hidrográficas que formaron parte del sitio demostrativo inicial (mapa de la derecha).



Fuente: Instituto Costarricense de Electricidad (ICE).

El principal objetivo de la Fase 1 del proyecto fue desarrollar una metodología para la estimación del “caudal de compensación”, definida como “caudal mínimo aceptable” para el período más importante de menor caudal, para la optimización del uso de los recursos hídricos en Costa Rica. La metodología desarrollada RANA es de carácter holístico e implica el análisis de la información hidrológica, hidráulica, biológica y socioeconómica (Figura 3). Ofrece la posibilidad de analizar el impacto de las diferentes alternativas de regulación en las condiciones biológicas y socioeconómicas en cualquier sector del río estudiado, o en el río como un todo durante los diferentes meses del período de menor caudal (diciembre-abril).

Figura 3. Modelo del desarrollo de la primera fase de la Metodología Rana ICE.



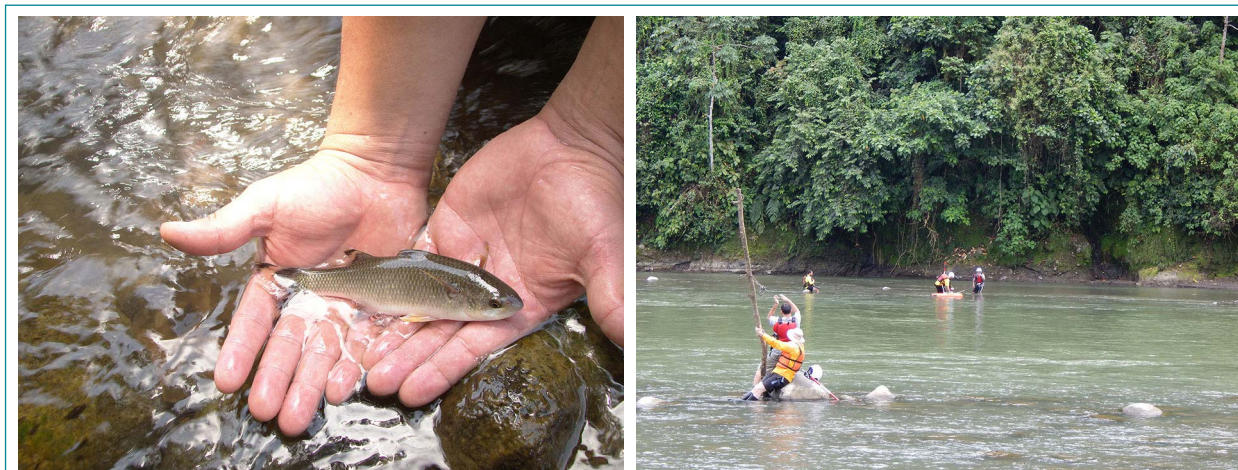
Fuente: Instituto Costarricense de Electricidad (ICE).

El proyecto incluyó un control exhaustivo de los datos de caudal disponibles, incluyendo las curvas de duración, descarga e inspecciones de campo, después de lo cual las estaciones indicadoras se clasificaron de acuerdo con su fiabilidad. Se utilizaron los datos diarios de 79 estaciones hidrológicas y 235 estaciones de precipitación para el período 1979-2003 y cuyo periodo de registro superara 10 años. Para la identificación de la red del río, se utilizó un modelo de elevación digital con una resolución de 500x500 m (plataforma IDRISI) y mapas hidrográficos digitalizados, aplicando el *software* HydroDem.

Se aplicaron métodos de interpolación hidroestocástica para el análisis y la estimación de los diferentes descriptores de caudal (media anual, varianza y curvas de duración) en cualquier punto a lo largo del río. Se utilizaron restricciones de balance hídrico para asegurar la consistencia de los valores interpolados a lo largo del río. El caudal mínimo fue regionalizado aplicando el enfoque de distribución derivada, lo que permitió la estimación de estos valores en cualquier punto a lo largo de los ríos.

Las demandas biológicas de hábitat se establecieron con la ayuda de un panel de expertos y estudios de campo extensivos. Los expertos proporcionaron una lista de las especies indicadoras y sus demandas de hábitat, mientras que el trabajo de campo se utilizó para la validación (Figura 4).

Figura 4. especie indicadora (*Joturus pichardí*) y comprobación de condiciones de caudal en Río Reventazón



© Anny Chaves Quirós

Se elaboró una metodología especial para la investigación de las preferencias de hábitat en el campo como un esfuerzo conjunto entre los biólogos y los hidrólogos. Se vincularon las preferencias de hábitat de las especies indicadoras a la velocidad del flujo y la profundidad utilizando reglas difusas.

La información sobre las demandas socioeconómicas de la corriente del río se obtuvo por medio de inventarios de campo y talleres con los actores. Todos los usos del agua de cada sector fueron clasificados de acuerdo con su importancia y un rango de criterios múltiples. La lógica difusa se utilizó para vincular las demandas socioeconómicas y los descriptores del caudal del río en una forma similar a las preferencias de hábitat.

El modelado hidráulico permitió estimar las velocidades de flujo y las profundidades para un caudal dado en los sitios específicos a lo largo del río. La vinculación de estos a las demandas de hábitat permitió estimar el área útil en condiciones de flujo natural y de regulación.

El *software* y la base de datos creados ofrecen una plataforma fácil de usar para probar diferentes escenarios de regulación en condiciones de caudales mínimos. El enfoque se demostró tomando como ejemplo los ríos Savegre, Reventazón y Térraba.

En la segunda fase, se realizó en 2013-2014, se contó con el apoyo financiero del Banco Interamericano de Desarrollo y participaron expertos de Suecia y Francia y el equipo ICE formado por siete profesionales en hidrología, ecología, socioeconomía, geografía social e informática.

El objetivo del estudio en esta segunda fase fue desarrollar una metodología para la determinación de lo que se denomina “el caudal adaptativo”. Más precisamente, y para un nivel de riesgo definido, se trata de desarrollar una herramienta para la evaluación de los posibles impactos de los diferentes escenarios de regulación del río con todos los actores reconocidos en la búsqueda de la mejor solución, para los espacios ecológicos, sociales y económicos que figuran en el proceso de intercambio. El caudal adaptativo se aplica a todo el año y el producto final no es un valor único de diseño, sino un marco de escenarios de prueba con el fin de llegar, a través de la negociación, a un compromiso aceptable entre las necesidades que históricamente fueron vistas como conflictivas.

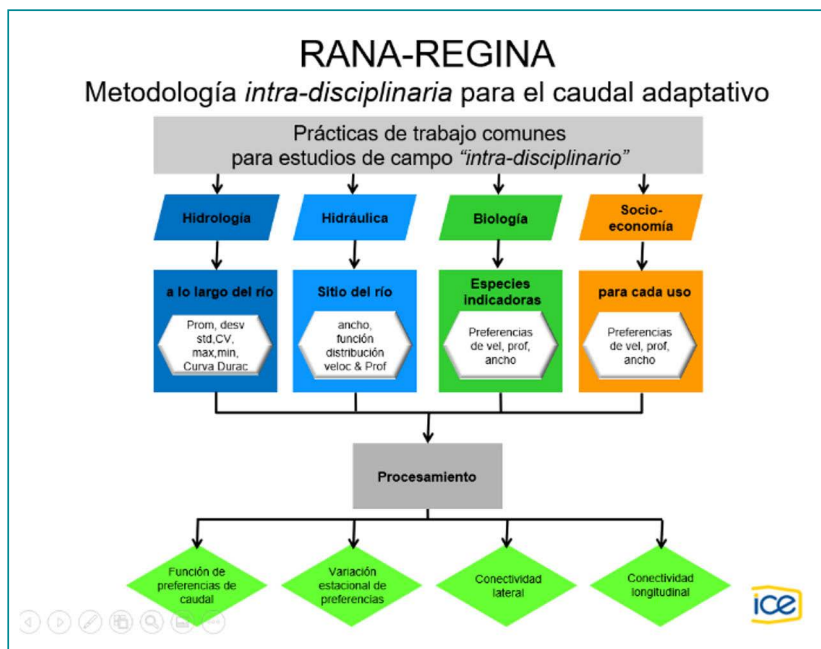
La metodología desarrollada consta de dos partes – REGINA y RANA. La parte REGINA incluye los métodos para la regionalización de los caudales mínimos y altos, así como las curvas de duración, los cuales se utilizan en combinación con los resultados de la parte RANA. La estimación de los caudales altos y mínimos es un complemento y un mayor desarrollo de los métodos de regionalización aplicados en la Fase 1 del proyecto. Particularmente fue necesario caracterizar las tres categorías de crecientes (llenas) importantes en la evaluación de los caudales ambientales, a saber: activación, mantenimiento y reconfiguración. Esta metodología, basada en métodos de interpolación hidroestocástica, se aplica a Costa Rica como un todo.

El objetivo de RANA es identificar las demandas ecológicas y socioeconómicas a lo largo del año, en contraste con REGINA que específicamente necesita estudios de campo y teóricos dirigidos para cada aplicación en el propio sitio.

En la segunda fase, se utilizó la información de estudios realizados en varios lugares a lo largo de los ríos Reventazón, Savegre y Térraba en el marco de los procesos de factibilidad de los proyectos hidroeléctricos propuestos. Estos tres ríos también se utilizaron para la demostración del enfoque REGINA. La vulnerabilidad de los sectores en los ríos igualmente es evaluada desde la perspectiva socioeconómica de RANA.

RANA-REGINA vincula los resultados de la parte REGINA con los de la parte RANA para evaluar la variación estacional del área útil para las especies acuáticas y los usos del agua condicionados a los caudales naturales o regulados (Figura 5).

Figura 5. Modelo de aplicación de la fase 2 en la Metodología RANA



Fuente: Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), Krasovskaia *et al.*, 2014.

Las conectividades entre las pozas y rápidos a lo largo del río y la del río y la llanura de inundación bajo diferentes escenarios de regulación son también analizados en esta sección. La comparación de la relación entre el área útil y la conectividad en cada sector del río con las demandas identificadas en la parte RANA, permite comparar el impacto de los diferentes escenarios de regulación.

Para la parte RANA se utilizó información recolectada en las investigaciones de campo biológicas y socioeconómicas, así como los registros de caudales disponibles en la parte REGINA. El panel de expertos se utilizó como otra herramienta de adquisición de información. Se llevaron a cabo

estudios hidráulicos en varios sectores de las tres cuencas de estudio, seleccionados con base en su importancia para el régimen hidrológico, aspectos ecológicos y socioeconómicos. El impacto de la regulación de caudal para las especies acuáticas fue investigado con base en las preferencias de hábitat de tres grupos indicadores: peces, anfibios y macroinvertebrados, según fue sugerido por expertos durante la Fase 1 del Proyecto.

El estudio presenta un enfoque completo para evaluar los efectos de las diferentes alternativas de regulación de caudal en la vida acuática y las actividades socioeconómicas de la población ribereña a lo largo del año, para facilitar la elección del esquema de regulación a un nivel de menor riesgo. Esto complementa la Fase 1, la cual abordó solo el período de caudales mínimos. La metodología sigue el concepto de gestión del caudal adaptativo, el cual prevé un seguimiento continuo de los resultados de la decisión elegida y lo aprendido de los nuevos conocimientos. Se elaboraron recomendaciones especiales para asegurar que las investigaciones de campo proporcionen datos adecuados y fiables para utilizar RANA - REGINA, así mismo, el personal del ICE recibió capacitación en los métodos aplicados incluyendo sus fundamentos teóricos. (Krasovskaia *et al.*, 2014).

Las condiciones ambientales de la cuenca del Río Savegre orientaron al país de desistir de la construcción de obras hidroeléctricas y destinar la cuenca del Río Savegre como parrea protegida al incorporarlo en la declaratoria de Reserva de la Biosfera UNESCO (2017). El proyecto Diquís ha sido aplazado indefinidamente por circunstancias sociopolíticas y de conveniencia nacional, mientras que la Planta Hidroeléctrica Reventazón se construyó con éxito y entró en operación en el año 2016. La casa de máquinas de esta planta fue modificada en su propuesta original para cumplir con el caudal ambiental resultante de la aplicación de la metodología RANA y además la operación de la planta se ajustó a las condiciones definidas en la propuesta de caudal ambiental, el proyecto en general se construyó en el contexto de la aplicación de medidas ambientales rigurosas, lo que llevó al otorgamiento de reconocimientos a nivel mundial como un proyecto sostenible.

Estas circunstancias han orientado a un replanteamiento del sitio demostrativo según su evolución, definiendo los límites del sitio al área de influencia de la Planta Hidroeléctrica Reventazón y a las condiciones hidroecológicas que lo caracterizan actualmente.

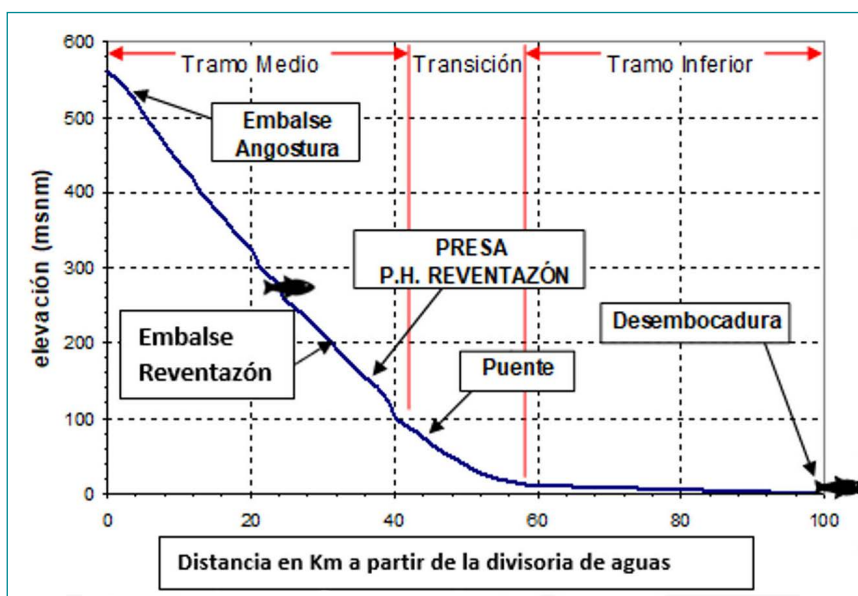
4. Caracterización de la Cuenca del Río Reventazón

4.1. Aspectos generales

La cuenca del Río Reventazón tiene un área total de 2.950 km² y realiza un recorrido de 180 km desde su nacimiento hasta la desembocadura (Chaves 2020). El rango altitudinal de la cuenca va de los 0 a los 3.800 msnm (Chaves *et al.*, 2011). El sitio demostrativo incluye parte de la Cuenca media y la Cuenca baja, por lo que cubre un rango desde 0 a 290 msnm (Figura 6), con un recorrido del río de aproximadamente 60 km dentro del actual embalse.

El Río Reventazón presenta una longitud de 125 km, con niveles de altitud que varían desde los 3.800 m.s.n.m. hasta los 0 m.s.n.m., ubicándose su desembocadura en el Mar Caribe. Hasta el nivel de cuenca media, aproximadamente a los 150 m.s.n.m., la cuenca presenta dos áreas topográficas muy diferentes.

Figura 6. Perfil altitudinal del Río Reventazón, tramo del sitio demostrativo indicado entre los íconos



Fuente: Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), Capítulo 7 Esla PH Reventazón (2008).

El sector sur se caracteriza por presentar relieves con pendientes escarpadas, mayores a 50 %, cubiertos por bosque primarios con precipitaciones anuales entre 3.000 y 7.000 mm, una baja densidad de población y muy pocos caminos de penetración. El sector norte, por su parte, presenta una precipitación anual promedio entre 1.500 y 2.500 mm, con un relieve fuertemente ondulado, cubierto de suelos volcánicos, donde se desarrollan una gran diversidad de cultivos. Es precisamente en este sector donde se presenta la mayor densidad de población y las actividades comerciales.

La cuenca media baja o de transición (de los 350 a los 80 m.s.n.m). en ambas márgenes se encuentra una matriz mixta de cultivos y zonas boscosas con una geomorfología predominada por relieves moderadamente ondulados.

En la Cuenca baja, desde el nivel del mar hasta los 80 m.s.n.m., el relieve se caracteriza por presentar llanuras y áreas ligeramente onduladas.

Esta cuenca pertenece a una vertiente de alta magnitud, con poca estacionalidad (dos o cuatro meses de sequía estacional no continua) y cuya precipitación media anual es de 3.600 mm, con una escorrentía de 2.614 mm, que equivalen a 83 l/s-km², lo que permite que algunos de los ríos mantienen un curso de verano suficiente como para sostener los usos de generación hidroeléctrica y consumo humano.

Los suelos son bien distintivos entre la margen derecha y la izquierda del Río Reventazón. En la margen derecha predominan suelos derivados de materiales sedimentarios, que son profundos, rojizos, arcillosos, moderadamente ácidos, en relieve fuertemente ondulado a ondulado, reconocidos como Ultisoles e Inceptisoles. En la margen izquierda, abundan más los suelos volcánicos, identificados como Andisoles. En las llanuras aluviales de la cuenca, predominan suelos aluviales, identificados como Inceptisoles.

Según los estudios la capacidad de uso de la tierra el 14 % del área tiene capacidad de uso agrícola (clases I a IV), pero si se incluye la clase VI (apta para cultivos perennes y reforestación comercial) la cifra sube a un 26 %. El resto del área debería estar bajo cobertura forestal permanente.

4.2. Descripción ecológica

Se presentan cinco zonas de vida y tres transiciones, según el Sistema de Clasificación de Zonas de Vida de Holdridge (Bolaños y Watson 1993), además de cuatro pisos altitudinales: el Premontano con 81.794,2 ha, Basal con 40.918,7 ha, Montano Bajo con 4.983,8 ha y Montano con 626,1 ha.

Se localizan en esta región cuatro corredores biológicos que abarcan 59,045.5 ha, representando un 46 % de la cuenca. Dado que están establecidos sobre propiedades privadas, en ellos se implementan de manera voluntaria, prácticas de producción sostenible y protección de recursos.

La gestión de los recursos naturales y de los espacios naturales corresponden a tres áreas de conservación del Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC): Tortuguero, La Amistad Caribe, Cordillera Volcánica Central. Dentro de estos espacios se cuenta con cinco Áreas Silvestres Protegidas: Parque Nacional Volcán Turrialba, Monumento Nacional Guayabo, Reserva forestal Cordillera Volcánica Central, Humedal Lacustrino Bonilla-Bonillita, Zona Protectora Acuíferos Guácimo-Pococí.

4.3. Biodiversidad

La cuenca se caracteriza por una rica biodiversidad, tanto terrestre como acuática, a través de los años se ha documentado a través de los diferentes estudios realizados para los proyectos del ICE, Se identifica que la biodiversidad de Reventazón representa un 33 % de la biodiversidad terrestre (Chaves *et al.*, 2011). En cuanto a flora se identifican 1541 especies entre las cuales están árboles, arbustos, hierbas (epífitas y terrestres), bejucos, helechos, briofitas, etc., además de 41 especies de hongos.

Para los grupos de fauna, con base en diferentes estudios realizados por más de 15 años en la cuenca, se han identificado 91 especies de peces, de las cuales 22 especies son marinas y solo se les encuentra en la condición del estero, las restantes 69 especies son propias del sistema dulceacuícola. El Río Reventazón es el segundo en número de especies del país (Chaves *et al.*, 2011) y a pesar de la intervención que ha sufrido, mantiene su diversidad, sin embargo, se presentan cambios en la distribución de las especies debido a la presencia de las tres represas que están instaladas en el cauce y que funcionan como barrera para los peces (Chaves *et al.*, 2016).

Se han identificado 198 especies de anfibios, 435 especies de reptiles, 556 especies de aves, 122 especies de mamíferos, 1658 especies de insectos, decápodos dulceacuícolas 10 especies, moluscos 18 taxones (11 sin determinar), insectos acuáticos 176 especies (Rodríguez, 2020 comunicación personal). Se identifica que se protege en esta zona un 33 % de la biodiversidad de vertebrados terrestres de Costa Rica.

La cuenca se encuentra en pleno desarrollo, existe una demanda muy fuerte por los recursos, tanto por la producción industrial como agropecuaria. Esta creciente demanda de recursos, junto con el aumento de la población y el aumento de la generación de desechos sólidos de tipo urbano, industrial y agropecuario han iniciado un proceso de deterioro y presión por los recursos.

4.4. Aspectos hidrológicos

El área de cuenca tributaria hasta el sitio de presa de la PH Reventazón, es de 1.757,2 km² (Chaves y Rodríguez 2008) donde convergen varios comportamientos hidrológicos, los cuales repercuten en los caudales que se observan a lo largo del río, los cuales son impactados por una gran variabilidad climática. Adicionalmente la existencia de 5 aprovechamientos hidroeléctricos aguas arriba del embalse Reventazón (Río Macho, Cachi, La Joya, Angostura y Torito) provocan un nivel de regulación que ha impactado el sistema hídrico desde 1963.

La zona está conformada por 20 microcuencas, que presentan perfiles climáticos diferentes según el sector en la que se ubican.

Los caudales varían según la microcuenca analizada: los valores indicados van desde los 5 hasta los 35 m³/s (ICE, 2015). El cauce principal, al nivel del sitio de presa de la Planta Reventazón, contabiliza un caudal promedio de 150 m³/s (Rodríguez, 2008). En eventos máximos, se han registrado hasta 6.000 m³/s. Se tienen identificados los poblados en un mapa de amenaza por inundación, donde se señalan las zonas con datos históricos de afectación.

Precipitación

El área comprendida entre la cuenca media y baja del Río Reventazón, posee influencia de la vertiente Caribe, presentando lluvias a lo largo de todo del año con un promedio de 232 días con lluvia (Rojas, 2011). La precipitación media anual para la Cuenca media varía desde los 2.000 a los 3.000 mm, mientras que en la cuenca baja va de los 3.000 a los 4.000 mm.

Temperatura

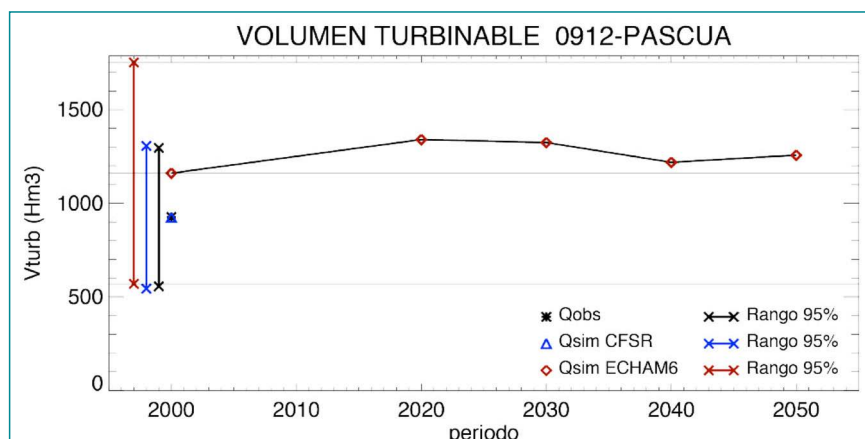
La temperatura media anual para la parte media de la cuenca es de 14 a 18 °C y en la parte baja de 20 a 28 °C. con oscilaciones de hasta 12 °C entre la máxima y la mínima en un día (Rojas, 2011). Los meses en los que se presentan las temperaturas más bajas son diciembre, enero y febrero, con un promedio de 22,5 °C. Entre los diferentes pisos altitudinales se dan pequeñas diferencias de temperatura.

Para la zona se cuenta con basta información complementaria y mapas de la geología, donde se determinan las zonas geológicas vulnerables, la caracterización geomorfológica, la caracterización de potencial erosión y el cálculo del índice de susceptibilidad de erosión.

Impacto de cambio climático

A partir de la información existente para la cuenca se han realizado proyecciones y modelaciones basadas en la precipitación y caudales proponiendo escenarios para 2020 a 2050, en los que se proyecta un comportamiento que concuerda con la variación interanual histórica propia de esta cuenca. El análisis realizado para la Estación Pascua, ubicada en la cola del embalse Reventazón, con los datos de caudal convertidos en volumen turbinable, permite identificar el impacto en el futuro de la Planta Reventazón, presentan escenarios para 2020, 2030, 2040 y 2050 (Figura 7). En estos escenarios no se detecta que el futuro de la Planta Reventazón vaya a estar comprometido por razón del cambio climático (ICE, 2015a).

Figura 7. Escenarios para el volumen turbinable en hm³ para la Estación Hidrológica Pascua, ubicada en la cola del embalse de Reventazón desde año 2000 a 2050



Fuente: Instituto Costarricense de Electricidad (ICE).

Caracterización de la calidad del agua

Calidad bacteriológica: los análisis bacteriológicos realizados entre 1994 y 1996 indican afectación fecal en sus aguas con valores entre 4.500 y 6.200 coliformes fecales/100 mL. Otro análisis realizado entre el 2006 y 2008 evidenció una disminución de los promedios reportados en el primer periodo. Entre 308 y 800, lo cual relacionan a los esfuerzos realizados en la Cuenca por mejorar la calidad ambiental (Mora 2007 y Mora *et al.*, 2011).

Calidad fisicoquímica: De acuerdo con lo que establece el decreto ejecutivo n.º 33.903-MINAE-S (Reglamento para la Evaluación y Clasificación de la Calidad de Cuerpos de Agua Superficiales) se realizan análisis utilizando los índices Holandés y el ICA, (los cuales se solicitan oficialmente) para ambos casos la contaminación reportada varía según los sitios, se reportan aguas desde muy contaminadas, de contaminación insipiente hasta sitios sin contaminación, todo dependiendo al uso del suelo en el sector, la densidad de población y las actividades realizadas cerca de las fuentes.

Análisis de residuos de plaguicidas: Estudios realizados por Echeverría *et al.* (2011), demuestran sitios sin rastro de contaminantes, así como otros sitios donde se reporta Diazinón, Etoprosfos, Bromacil, Carbaril, Triadimefón, entre otros, principalmente en la parte aja de la cuenca.

Calidad biológica: Este análisis se basa en la aplicación del índice BMWP-CR utilizando macro invertebrados acuáticos indicado también en el decreto ejecutivo n.º 33.903-MINAE-S (Reglamento para la Evaluación y Clasificación de la Calidad de Cuerpos de Agua Superficiales). Este monitoreo lleva registro desde 2012 y los sitios han reportado todo tipo de calidades, desde contaminación insipiente, moderada, hasta aguas de muy mala calidad, contaminadas. La calidad del agua varía temporal y espacialmente según las características del sitio y su contexto socioeconómico.

4.5. Contexto socioeconómico

Los poblados de la cuenca media se dedican principalmente a la actividad agrícola como el cultivo de café, caña de azúcar, culantro coyote (especia), plantaciones de banano criollo, plátano, cacao, maracuyá, chayote, maíz, frijol, algunos tubérculos.

Por su parte, las localidades de la cuenca baja se benefician, por su topografía, y se presentan cultivos de banano y piña en grandes extensiones. En dimensiones mucho menores, también se desarrollan plantaciones de palmito, plátano, cacao, yuca, papaya, ornamentales, palma aceitera, etc. También se cuenta con actividad agroindustrial donde se procesan y/o empaquetan los productos de los cultivos extensivos mencionados. Adicionalmente se encuentra la producción pecuaria, ganadería de leche, ganadería de carne.

Para los cultivos anuales se obtiene un valor anual de USD 41,8 millones con una producción de 18.626 toneladas métricas. Un total de USD 215,6 millones anuales por producción de cultivos perennes. Al estar ligada la economía de la cuenca al uso del suelo, se ratifica la importancia de utilizar adecuadamente los recursos, y a tener la responsabilidad de ejercer prácticas acordes a la sostenibilidad de la cuenca.

Otro aspecto fundamental en el eje socioeconómico es el aporte por turismo, el cual puede ser tipo cultural, natural, de aventura, ecológico, rural e investigativo. Se estima que el ingreso anual en la cuenca a raíz de esta actividad, es de USD 2.909.604.

Respecto a la infraestructura, destaca la presencia de represas hidroeléctricas, líneas de transmisión eléctrica, carreteras con grandes sectores importantes pavimentados, y también un alto número de vías de acceso en una red secundaria y terciaria. También existe una línea férrea en uso.

Desde el punto de vista de acceso a agua para consumo humano, Acueductos y Alcantarillados (AyA) es la institución rectora en esa materia a nivel nacional, para la correcta administración de recurso hídrico. Adscritas al AyA se encuentran las Asociaciones Administradoras del sistema de Acueductos y Alcantarillado Comunal (ASADA), en total se contabilizan 93 acueductos rurales.

4.6. Servicios ecosistémicos

Entre los servicios ecosistémicos se tiene como principal riqueza los de aprovisionamiento, destacando la protección del recurso hídrico, dada la presencia de acuíferos protegidos por la masa arbórea de gran importancia por la funcionalidad de la cobertura como hábitat para el sostén de la biodiversidad, asimismo, los recursos genéticos y bioquímicos presentes en la alta biodiversidad que se ha documentado en el territorio del sitio demostrativo.

Entre los servicios de soporte se encuentran el transporte hídrico, la disponibilidad y movilidad de sedimentos y la presencia de especies acuáticas como expresiones de la conectividad entre sitios de la cuenca baja y media del Reventazón y microcuencas que lo conforman.

Entre los servicios culturales está la generación de madera muerta utilizada para diversos propósitos como la cocción de alimentos. La pesca artesanal, la recreación y relajación, el turismo de varios tipos entre los que destacan los paseos en botes inflables, vistas panorámicas con alto valor paisajístico, investigación, zonas para conservación de especies, corredor riveroño para continuidad y traslado genético de flora y fauna.

En esta zona se cuenta con terrenos en propiedades privadas que están sometidas al sistema de Pago por Servicios Ambientales (PSA); donde el propietario recibe una suma de dinero anual por mantener la cobertura del bosque en sus fincas y por la siembra de árboles. Para poder ser parte del programa las fincas deben estar inscritas en Registro Nacional, contar con plano y estar dentro de los sitios prioritarios que el Fondo Nacional de Financiamiento Forestal (FONAFIFO) tiene contemplados; además, el sistema exige la anotación de las propiedades en Registro por la Ley Forestal n.º 7.575, compromiso a no derribar los árboles, el mantenimiento de las colindancias, no realizar cacería ni pesca.

Este método motiva a los propietarios a mantener sus terrenos con cobertura boscosa, contribuyendo en gran medida al mantenimiento y mejora de la conectividad estructural y funcional a través de los corredores biológicos presentes en el sitio demostrativo Reventazón. Para ello se trabaja con el soporte del Estado costarricense a través de un Fondo Nacional llamado FONAFIFO, perteneciente al Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE). Para conseguir estos incentivos económicos el personal de Área Socioambiental de la División Generación, a través de su ingeniero forestal destacado en la zona, negocia la participación de productores, brinda el servicio de regencia gratuito a los propietarios, da seguimiento a los proyectos para que se gestionen los desembolsos correspondientes; además, los representa ante el Colegio de Ingenieros Agrónomos.

Actualmente están vigentes 26 proyectos de bosque (498,2 ha) en PSA y 4 proyectos en Sistemas Agroforestales (SAF), equivalentes a unas 30 ha (26.500 árboles) (Cuadro 1). Existe, además la iniciativa de sumar unas 605 has de bosque para este año. En el pasado se tuvo 750 ha bosque en PSA, y unos 32000 árboles en SAF equivalentes a 32 ha. Se está trabajando en alcanzar unas 605 ha más y que se conserven alrededor de los siguientes 10 años.

Sumado a este esfuerzo, el ICE, por medio de un convenio de cooperación con el FONAFIFO aportó un monto extra igual al pagado por este para un periodo de 5 años; actualmente se está trabajando en un nuevo convenio para poder cubrir los proyectos existentes bajo las mismas condiciones, y hacer aún más atractivo el programa de PSA impulsado por el ICE.

Cuadro 1. Proyectos en el programa de incentivos por pago de servicios ambientales en la Cuenca del Reventazón

Año	N.º proyectos	Has Bosque	SAF	Estado
2016	3	0	16.500	Vigente
2020	30	498,2	10.000	Vigente
2021	15	605	5.000	En trámite

Fuente: Elaboración propia/ ASARH División Generación, 2021, Instituto Costarricense de Electricidad (ICE).

5. Objetivos

El sitio demostrativo Reventazón tiene como objetivos generales:

- Cumplir con el caudal ambiental aprobado como medida ambiental representado en el cumplimiento del régimen de caudal identificado y de las restricciones bióticas y socioeconómicas definidas.
- Implementar medidas ambientales ecohidrológicas que contribuyan a la mejora ecosistémica del cauce y sistema hídrico asociado.

Los objetivos específicos son:

- Realizar mediciones periódicas del caudal que discurre en el tramo crítico y en el tramo de regulación.
- Ejecutar monitoreo de los grupos de peces, aves, calidad del agua para mantener información de su situación y comprobar que se mantiene en el estado según los compromisos adquiridos.
- Continuar con las mediciones de los indicadores bióticos y socioeconómicos y velar la aplicación de las medidas ambientales que aporten mejoras en el cálculo de estos datos.
- Apoyar a las comunidades aledañas con propuestas, técnicas y medidas ambientales con los propósitos de mejora la salud ecosistémica en sus comunidades, mejorar la calidad ambiental, mejora las técnicas productivas y de desarrollo.
- Impulsar iniciativas de mejora de técnicas productivas y de conservación del suelo a través de la reforestación, implementación de biodigestores, técnicas de manejo y conservación del suelo
- Favorecer a través de charlas y visitas guiadas, la defensa y necesidad de gozar de un medio ambiente sano y los beneficios que brinda el sitio demostrativo.

6. Evolución del sitio demostrativo

Como se mencionó en la Introducción, el sitio demostrativo ha evolucionado de una propuesta metodológica para determinar el caudal ambiental, a una demostración de la aplicación de esta metodología en la etapa preconstructiva, impactando sobre la modificación del diseño de la planta y del sistema de operación. Posteriormente, se construyó la planta aplicando las medidas para mantener el caudal acorde a lo establecido y finalmente la operación de la planta respetando el caudal ambiental dispuesto según la aplicación de la metodología de tipo holística RANA-ICE.

La aplicación de la metodología previó un caudal de compensación de 15 m³/s en el tramo crítico con el cumplimiento de las preferencias de hábitat de las especies de peces y la ejecución del rafting. Este caudal es aportado de manera permanente por una casa de máquinas ubicada al pie de la presa (central de compensación ecológica –Figura 8–) y en un 99 % del tiempo se aporta adicionalmente un caudal variable correspondiente a los excedentes que superan el nivel del embalse por un vertedor.

Para el tramo regulado se contempló un caudal de compensación de 45 m³/s para cumplir igualmente con las mismas restricciones ecológicas y socioeconómicas, pero en condiciones morfológicas del cauce muy diferentes a las del tramo crítico, ya que el desfogue de casa de máquinas se realiza en el sector de transición a cuenca baja. Para cumplir con el caudal ambiental recomendado según la metodología RANA-ICE se modificó el diseño de la casa de máquinas, cambiando el diseño original de 3 unidades Francis que al generar aportaban 80 m³/s cada una y un plan de operación de 16 a 21 horas diarias, quedando la posibilidad que algunos días de 6 a 3 horas solo discurriría por el tramo regulado.

Figura 8. Minicentral de Compensación PH Reventazón.
Se observa el vertido del caudal ambiental



© Anny Chaves Quirós

7. Medidas y acciones ecohidrológicas a demostrar

Actividades demostrativas pasadas, actuales y futuras. Mediciones, investigaciones y soluciones implementadas para el monitoreo del cumplimiento se establecieron los protocolos para el control de los parámetros que permiten demostrar el cumplimiento del caudal de compensación a partir de la medición de los caudales en el tramo crítico y en el tramo de regulación, asimismo de la medición de indicadores como el cumplimiento de las restricciones bióticas con la presencia de las especies indicadoras y de las restricciones socioeconómicas con la actividad de balseo.

Cumplimiento del caudal

La Planta Reventazón cuenta con el sistema SCADA desde donde se monitorean las principales variables de la planta, incluidos los caudales que se turbinan. En la imagen del SCADA, en las pantallas de la Sala de Control de Casa de Maquinas, se puede observar en tiempo real el dato de caudal que se restituye al Río Reventazón, en la variable FLUJO. En otra pantalla ubicada en el mismo sitio es posible observar el total del flujo de cada una de las 4 unidades ubicadas en la casa de máquinas. Adicionalmente, se realizan aforos en el tramo crítico para comprobar el caudal en cauce.

El caudal de compensación que se definió para el tramo de regulación es de 45 m³/seg. este caudal se vierte cuando solo una de las unidades opera a media potencia.

Figura 9. Caudal promedio mensual, medido en el tramo regulado durante los años 2016-2020



Fuente: Instituto Costarricense de Electricidad (ICE).

En la Figura 9 se muestra la variación del caudal (promedio mensual) durante los años 2016-2020 el año. Nótese que los mínimos nunca bajan de los 40 m³/s, aún en el período más seco del año, con lo que se cumple con el caudal ambiental comprometido. En la figura 10 se observa en imagen Google Earth, el aporte de agua de una unidad en operación.

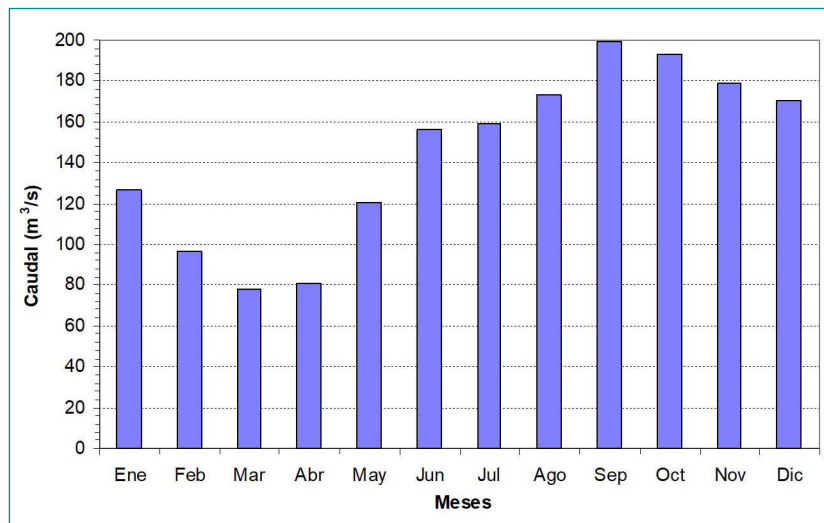
Figura 10. Vertido del caudal de compensación de una de las unidades de la casa de máquinas de la Planta Reventazón



Fuente: Imagen Google Earth, 2019.

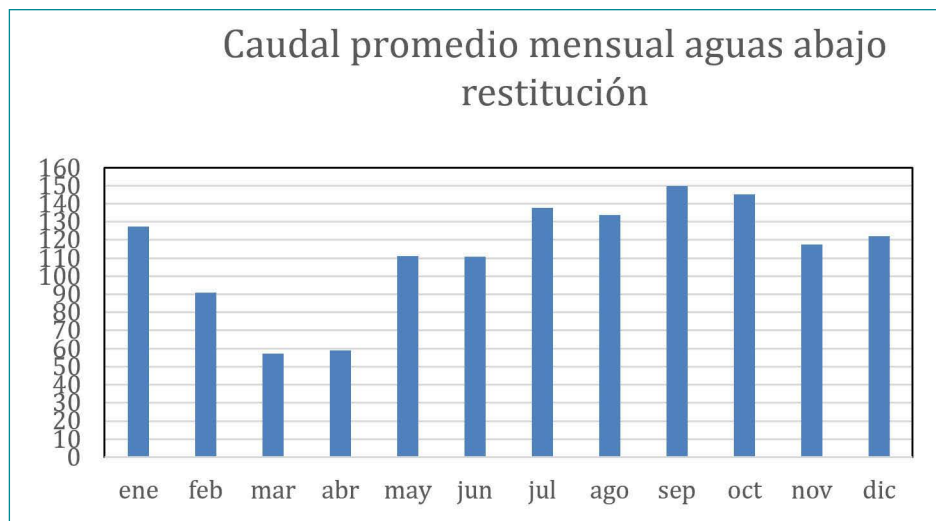
En la Figura 11 se muestra los caudales promedio registrados en la estación Pascua, que se ubicada a 6 km aguas arriba el sitio de presa (en la actual cola del embalse) para el período 1963-2007 previo al inicio de la construcción del PH Reventazón. En la Figura 12 se muestra el caudal promedio mensual, medido aguas abajo de la casa de máquinas, una vez que entró en operación la planta de Reventazón. Se puede observar que el patrón general de los caudales se logra mantener después de iniciada la operación de la Planta y con cumplimiento de lo proyectado en el análisis del caudal ambiental.

Figura 11. Registro de caudales promedio en la estación Pascua (cola del embalse Reventazón), previo a la construcción del PH Reventazón. Período 1963-2007



Fuente: Instituto Costarricense de Electricidad ICE, EsIA para el PH Reventazón.

Figura 12. Registro de caudales durante la operación de la Planta 2016-2020



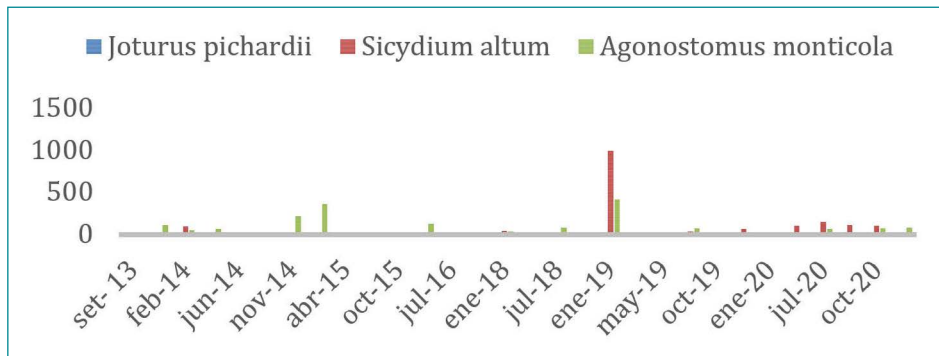
Fuente: Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), EsIA para el PH Reventazón.

Cumplimiento de preferencias de hábitat para las especies de peces tepemechín (*Agonostomus monticola*) y bobo (*Joturus picardii*) y otras especies acuáticas.

El indicador para demostrar el cumplimiento de las restricciones ecológicas es la presencia en el tramo crítico y en el tramo de regulación de las especies de peces indicadoras, a saber: *Joturus picardii* (pez bobo), *Agonostomus monticola* (tepemechín), y *Sicydium altum* (chupapiedras). En los

muestreos realizados (Figura 13) en los sitios casa de máquinas y localidades aguas abajo (tramo de regulación) y sitio de presa (tramo crítico) las tres especies han sido ubicadas. Estas especies además son migratorias y el cumplimiento de las condiciones ecológicas para ellas demuestran que se preservan los elementos necesarios para mantener la conectividad en el cauce.

Figura 13. Presencia de especies indicadoras de caudal ambiental en el tramo crítico y tramo de regulación en muestreos realizados entre 2013-2020



Fuente: Instituto Costarricense de Electricidad (ICE).

La presencia de las especies en el rango de distribución usual en el tramo regulado y el tramo crítico, es un indicador adicional de conectividad dentro de estos tramos. Partiendo de la premisa de que la presa es una barrera que restringe el rango de distribución para todas las especies hasta este punto, la distribución que existía en el Reventazón antes de la construcción de la presa se debe mantener en el tramo crítico y en el tramo de regulación. Lo cual se comprueba con base en los resultados de monitoreo y se representan en la Figura 14. El caudal que se conserva en los tramos crítico y regulado mantiene las características para cumplir con las preferencias de hábitat de esas especies.

En la Figura 14 se presenta la distribución de las especies indicadoras antes de construir el proyecto y la distribución documentada después de la entrada en operación.

Figura 14. Distribución de las especies de peces indicadoras en el Río Reventazón
 En la parte superior se muestra la distribución previa a la construcción de la planta hidroeléctrica (año 2009) y en la sección inferior la distribución de las mismas especies después de puesta en funcionamiento la planta (2016-2020).



Fuente: Anny Chaves Quirós, elaboración propia con base en resultados de monitoreo ICE.

Cumplimiento de restricciones socioeconómicas

Las actividades relacionadas al uso social del río en el tramo crítico y el de regulación están representadas por la práctica de la actividad del balseo (*rafting*) y en la zona baja por la navegación y movimiento en el puerto de embarque de Río Blanco, desde el cual se moviliza turismo hacia Tortuguero y la comunicación con el pueblo de Parismina.

En los compromisos definidos en el Plan de Gestión Ambiental del PH Reventazón, se incluyó una serie de acuerdos con los operadores de turismo entre los cuales se aseguraba el cumplimiento del caudal ambiental que permitía la realización de la actividad de rafting. En el Cuadro 2 se resumen esos acuerdos y el cumplimiento de los mismo para el año 2020.

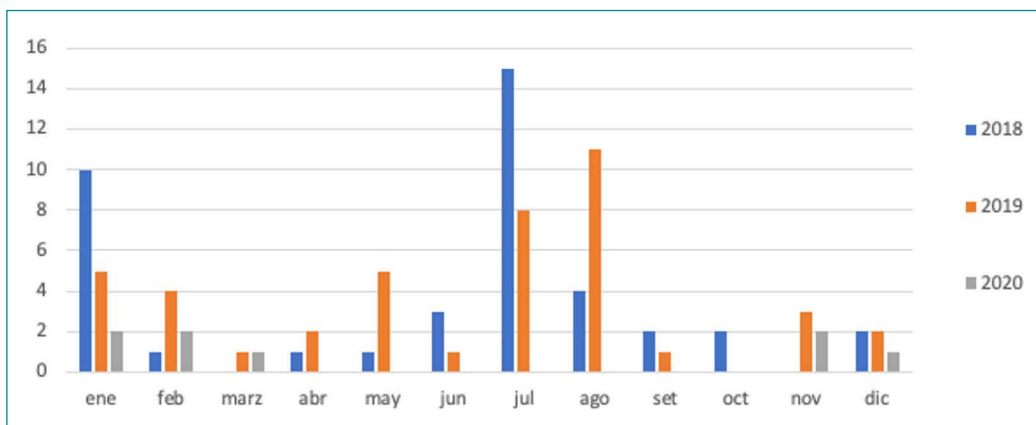
Cuadro 2. Desarrollo del Plan de Mitigación para la operación de Ecoturismo

Acción	Responsable	2020	Referencia
Habilitar un acceso independiente para los operadores de <i>rafting</i> en los terrenos cercanos a la Casa de Máquinas propiedad del ICE, por margen derecha.	PH Reventazón	Se mantiene abierto el acceso para los operadores (ver Figura 1. Ingresos de operadores en 2020).	En la Figura 14 se muestra la ruta de acceso al sitio destinado para embarque de turistas en el sector de casa de máquinas.
Establecer un centro de información en los terrenos cercanos a la Casa de Máquinas, propiedad del ICE.	PH Reventazón	Se estableció antes del llenado del embalse .	
Implementar un canal de información (ya sea un sitio web o línea telefónica dedica y oficial) sobre el estado de los caudales y los pronósticos de operación de la futura planta.	PH Reventazón	Se estableció desde el 10/11/2016 y se mantiene hasta la fecha. En el año 2020, ingresaron 8 veces, un total de 3 operadores.	
Mantener el paso de 15 m ³ /s, como caudal de compensación durante la etapa operativa de la planta, se utilizará como indicador los aforos periódicos del tramo crítico.	PH Reventazón	Se mantiene 15 m ³ /s o más en el tramo crítico.	De acuerdo con lo expuesto en el EsIA, un caudal de 15 m ³ /s cumple adecuadamente con las demandas socioproductivas por lo que recomendó que para los meses de verano el caudal mínimo aceptable para el tramo crítico sea este.

Fuente: Instituto Costarricense de Electricidad ICE.

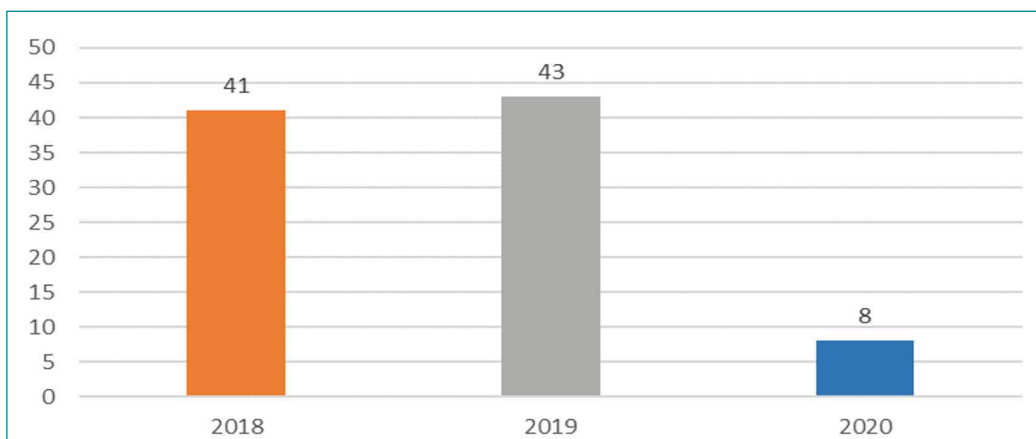
Las actividades de *rafting* se realizaban sin interrupción hasta el inicio de la pandemia en abril 2020. En la figura 15 se observa el cierre de la actividad entre abril y octubre 2020. En la Figura 16 se presentan los totales de ingresos de operadores por año para el mismo período. El transporte cotidiano en bote hacia el pueblo costero de Parismina se sigue dando con el cumplimiento de regulaciones sanitarias y aforo en los botes. Las actividades se han visto afectadas por la pandemia y no por falta de caudal para navegar.

Figura 15. Ingresos de operadores de rafting por mes entre 2018 y 2020 en el tramo crítico PH Reventazón



Fuente: Instituto Costarricense de Electricidad (ICE).

Figura 16. Ingresos de operadores de rafting por año a tramo crítico Reventazón en el período 2018-2020



Fuente: Instituto Costarricense de Electricidad (ICE).

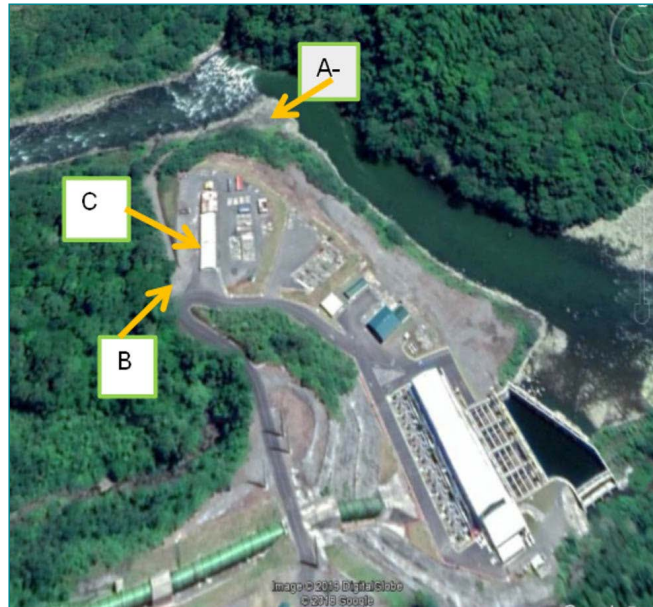
Dimensión ambiental de todos los compromisos ambientales Gestión Ambiental y Social, etapa operativa

El Proyecto Hidroeléctrico Reventazón constituye un proyecto de gran envergadura a nivel nacional, por lo que para obtener la viabilidad socio ambiental fue necesario realizar el Estudio de Impacto Ambiental (EslA), y establecer el correspondiente Plan de Gestión Ambiental (PGA), donde se definieron las acciones necesarias para evitar, disminuir, mitigar o compensar los impactos ambientales producto de la construcción del Proyecto. El EslA se realizó por medio de un proceso participativo con las comunidades del área de influencia directa (AID) y la ejecución de las acciones del PGA contó con la participación y el seguimiento comunal.

Debido a que se trata del cuarto aprovechamiento de las aguas del Río Reventazón para la producción de energía, se acordó con los principales bancos que financiaron el PHR, Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y la Corporación Financiera Internacional (IFC) del Banco Mundial, la realización de una evaluación de los impactos socio-ambientales acumulativos y se definieron acciones para disminuir, mitigar o compensar los impactos residuales. Estas acciones se agruparon dentro del Plan de Acción Ambiental y Social (PAAS) (ICE, 2017).

Durante el proceso constructivo del PHR, las acciones del PGA y el PAAS estuvieron enfocadas a evitar, disminuir, mitigar o compensar los impactos durante la construcción. Ahora, en la etapa operativa del PHR, se reformulan estos compromisos, y otros más, en el Plan de Gestión Ambiental y Social de la etapa Operativa (PGAS-O). Por ejemplo, se construyó un acceso para ser utilizado por los operadores de rafting y un centro de visitantes donde se ubica una maqueta de todo el proyecto (Figura 17).

Figura 17. Ubicación de acceso para operadores de rafting, A- Sitio ingreso balsas. B- Camino de ingreso de operadores, C Centro de Visitantes



Fuente: Imagen Google Earth, 2018.

En la etapa de operación del PHR se está dando seguimiento a varias de las medidas implementadas durante la construcción y que permanecen en el tiempo y se desarrollarán otras actividades propias de esta nueva etapa. Se desarrolla una serie de acciones enfocadas a lograr una autogestión comunal, por medio de una potenciación de capacidades existentes en grupos y representantes comunales.

Para el PGAS-O se identificó un total de 18 asuntos, con sus correspondientes planes, mediante los cuales se busca cubrir todos los compromisos de la Gestión Ambiental y Social de la Planta Hidroeléctrica Reventazón en su etapa operativa. Además se deben satisfacer las Normas de Desempeño sobre sostenibilidad ambiental y social definidas por los Bancos que financiaron el PHR. El cumplimiento del caudal ambiental para asegurar los usos del río fue uno de estos compromisos, por lo que en los informes a los entes financieros se reporta la información relacionada a este tema.

8. Lecciones aprendidas

La elaboración de una metodología de carácter holístico permitió a un equipo interdisciplinario realizar una propuesta predictiva de caudal ambiental, lo suficientemente robusta para lograr simular las restricciones ecológicas y socioeconómicas que se presentaron realmente una vez construido el proyecto. La negociación realizada entre los equipos de trabajo ambiental y el equipo de ingeniería, permitió ajustar y optimizar el diseño del proyecto, en particular la casa de máquinas a la necesidad de cumplir con el caudal de compensación.

La metodología debe aplicarse en las etapas iniciales del ciclo de vida del proyecto para así evitar tener que realizar cambios que conlleven una importante inversión. En el caso de Reventazón existió la apertura y disposición de los altos mandos para autorizar el ajuste del proyecto, sin embargo, no siempre es esto posible.

Se debe valorar la importancia de contar con información suficiente y adecuada para trabajar con datos que soporten con confidencialidad los resultados.

Es necesario visualizar y tratar de resolver de manera anticipada la situación que se presenta al pasar de la etapa constructiva a la operativa, directamente la brecha asociada normalmente a cambio de personal y compromisos presupuestarios, que influyen en el proceso de las tareas, así como el traslado de información.

En la planificación del trabajo de campo se debe contemplar el entorno social y económico de los sitios de estudio, así como valorar los tipos de tecnologías y su aplicación en campo a la hora de realizar monitoreo de los indicadores como los peces y parámetros fisicoquímicos ya que el vandalismo en la región puede imposibilitar las tareas.

La variabilidad climática ejerce presión desde un punto de vista financiero para el cumplimiento de los compromisos generados para la determinación de un caudal ambiental, por lo tanto, el estudio del clima requiere análisis constante. Por ello es necesario evaluar dentro de los programas o modelaciones del caudal ambiental la sensibilidad ante condiciones relacionadas a la variabilidad del cambio climático. En la II Fase del Proyecto RANA se desarrollaron modelajes para visualizar esta situación, aunque cuando estas se presentaron, ya la Planta Reventazón estaba en fase constructiva. Si bien los escenarios para Reventazón no se desvían de la variabilidad histórica, es conveniente aplicar para futuros proyectos los nuevos desarrollos de la metodología RANA Fase II.

La metodología para determinar caudal de compensación en el sitio demostrativo Reventazón ha tenido resultados positivos, tales como lograr la permanencia de las características de hábitat para las especies con requerimientos especiales.

El Plan de Manejo Adaptativo de Sedimentos complementariamente y como medida de control precautorio, permite comparar línea base y la operación de la Planta, para evaluar degradaciones o cambios en cada tramo, alimentando los sistemas de alerta locales.

El ICFSF es una valiosa herramienta para evaluar cambios desde la línea base y su desarrollo en el periodo operativo de la Planta Reventazón, a partir de este índice se generan oportunidades de mejora y atención a sitios clave, comunicación y extensión hacia los productores y habitantes en general de fincas aguas abajo de la represa.

Los equipos interdisciplinarios son esenciales para alcanzar una secuencia sana y lógica del trabajo.

9. Datos de contacto

- Luz Marina Rodríguez Quirós. Área Socio ambiental de la Región Huetar, División Generación, Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), LRodriguezQ@ice.go.cr
- Anny Chaves Quirós. Consultora independiente. Miembro del equipo de Ecohidrología PHI, anny.chaves13@gmail.com

Colaboradores:

Agradecemos la colaboración de personal del ICE que realizan las tareas diarias para el monitoreo de los indicadores establecidos.

- Jorge Leiva y Franklin Zamora por el aporte de información para la comprobación de campo de los estudios biológicos del cumplimiento de indicadores durante la fase operativa.
- Fermín Vargas elaboración de figura de ubicación del sitio demostrativo y coordinación del PMAS.
- Berny Fallas (Estudios básicos y de Hidrología) informe sobre escenarios futuros y afectación por cambio climático.

Referencias

Bolaños, R. y Watson, V. (1993). Mapa Ecológico de Costa Rica. Según el sistema de clasificación de zonas de vida del mundo de L. R. Holdridge. Centro Científico Tropical- Instituto Geográfico de Costa Rica.

Chaves, A. y Rodríguez, C. (2008). Cap. 11 Caudal Ambiental, en Carías, D. (ed.), Estudio de Impacto Ambiental para el Proyecto Hidroeléctrico Reventazón. Expediente 331-2008-SETENA.

Chaves, A.; Gamboa, C.; Rodríguez, L.M.; Leiva, J.; Molina, A.; Arrieta, C. y Segura, S. (2011). Biodiversidad de la Cuenca del Río Reventazón: Conocimiento para la gestión. En: Soto, E. (ed.), Construyendo Caminos de Conocimiento para un futuro con Sostenibilidad Hídrica. UNESCO-PHI 183: 188.

Chaves, A. (2020). Experiencias. El Río Reventazón: producción de energía y gestión ambiental. Revista de Ciencias Ambientales (Trop J Environ Sci), Enero-Junio, 2020, vol. 54(1): 200-214.

Echeverría Sáenz, S.; M. Pinnnock, M. Arias, F. Mena, K. Solano, C. Ruepert (2011). Presencia de residuos de plaguicidas y calidad biológica del agua del Río Jiménez, como representante de los ríos del Caribe de Costa Rica. Estudio realizado para el Observatorio ambiental de la Universidad Nacional de Costa Rica (UNA). [En línea] Consultado el 20 de octubre de 2014. Disponible en http://www.observatorioambiental.una.ac.cr/index.php?option=com_booklibrary&task=view&id=17&catid=43&Itemid=37

Holdridge, L. R. (1982). Ecología basada en zonas de vida. IICA.

Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) (2015). Estudio de vulnerabilidad, adaptación y mitigación al Cambio Climático para proyectos hidroeléctricos. CRAHI-UPC.

Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) (2015b). Plan de Manejo de la cuenca media y baja de Reventazón.

Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) (2017). Plan de Gestión Ambiental y Social Etapa de Operativa (PGAS-O) del PH Reventazón. Calvo, D. G.; Vargas Petersen, M. (ed.), Siquirres, Costa Rica. Documento-PAAS -18-18.1-1-v5. 136 p.

Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) (2021). Plan de Mitigación para los potenciales impactos del PH Reventazón sobre la actividad del Rafting en el Río Reventazón. Informe Anual 2020. Código: PEGASO-AID-17-2021-01-1.

Instituto Meteorológico Nacional (IMN) (2009). Atlas Climatológico de Costa Rica.

Mora, D. (1997). Contaminación fecal del Río Reventazón período 1994-1995. Revista Costarricense de Salud Pública. V. 6 n. 10. San José.

Mora, D. A.; CF. Portuguez; G. Brenes (2011). Evolución de la contaminación fecal de las aguas de la cuenca del Río Reventazón. 1994-2008. Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados, Laboratorio Nacional de Aguas.

Rodríguez, C. R. (2008). Cap. 7 Medio Físico, en Carías, D. (ed.), Estudio de Impacto Ambiental para el Proyecto Hidroeléctrico Reventazón. Expediente 331-2008-SETENA.

Rojas, N. (2011). Estudio de Cuencas Hidrográficas de Costa Rica. PNUD-IMN. MINAE. 728 p.

Rodríguez Quiros, L. M. (2020). Comunicación personal.

Unesco Lista de Reservas de la Biosfera de América Latina y el Caribe. Disponible en <https://en.unesco.org/biosphere/lac>.

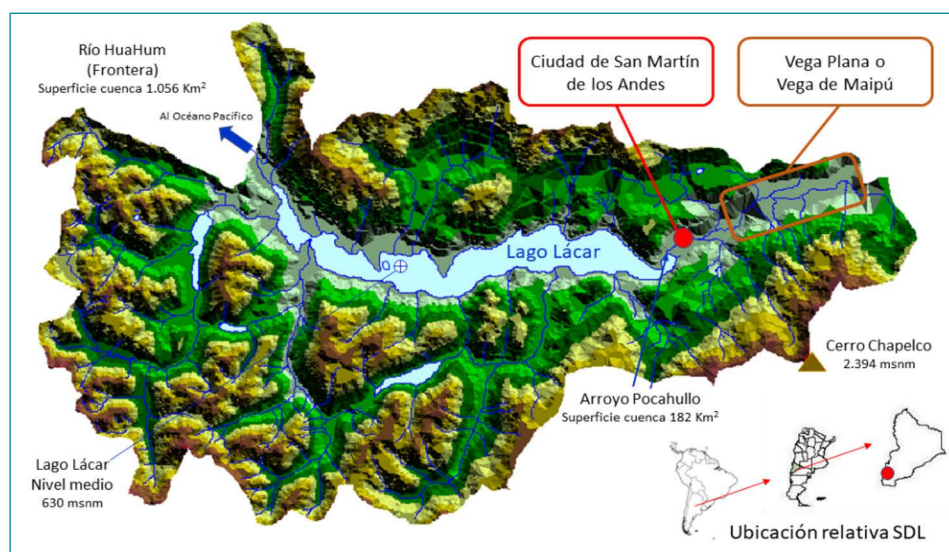
Sitio Demostrativo Lácar: Dos décadas y media de avances en la implementación de la Ecohidrología

Marcelo Gaviño Novillo ⁽¹⁾, Sara Castañeda ⁽²⁾, Daniela Muschong ⁽³⁾,
Facundo Ortiz ⁽⁴⁾, Ana Díaz Martínez ⁽⁵⁾

1. Ubicación del Sitio Demostrativo

El Sitio Demostrativo Lago Lácar (SDL) del Programa Hidrológico Intergubernamental de la UNESCO fue seleccionado en el año 2005 a escala mundial en representación de América Latina y el Caribe por haber contado entonces con experiencias demostrables en la aplicación de los principios del *enfoque ecohidrológico* a nivel de cuenca. El Sitio se ubica en el sector argentino de la cuenca transfronteriza del Río Huahum-Valdivia en la Provincia del Neuquén (R. Argentina) entre los 40°00' - 40°20' S y los 71°11' - 71°50' W (Figura 1).

Figura 1. Cuenca del Río Huahum y el Lago Lácar como núcleo central



Fuente: Elaboración propia en base al Convenio Subsecretaría de Recursos Hídricos-Facultad de Ingeniería UNLP.

La cuenca hidrográfica del Río Huahum, en la cual domina la presencia del Lago Lácar es de recursos hídricos compartidos entre Chile y Argentina. Tiene sus nacientes en la Provincia del Neuquén y luego de atravesar el límite internacional sus aguas drenan finalmente en el Océano Pacífico en Chile con el nombre de Río Valdivia. Este recurso hídrico compartido es de gran importancia desde un punto de vista socioeconómico de todos los que conforman la Ecorregión

(1) Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata; Consultor, UNESCO

(2) Secretaría de Coordinación del Consejo de Planificación Estratégica y Gestión de Proyectos, Municipalidad de San Martín de los Andes, (3) Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata, (4) Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, (5) Consultora independiente

(1) magavino@gmail.com, (2) charito@smandes.com.ar (3) danimuschong@gmail.com (4) ortizfacundo@hotmail.com.ar

(5) anadiazmartinez90@gmail.com

Andino Patagónica (Burkart *et al.*, 1999), siendo un buen ejemplo de las condiciones naturales y socioeconómicas de la misma, lo que ha llevado a seleccionarla como prioritaria para una gestión integrada por parte de ambos países en el marco del Protocolo Adicional de Recursos Hídricos Compartidos al Tratado de Medio Ambiente vigente entre la República Argentina y la República de Chile desde 1991 (DNRH-UNLP 1997; Gaviño Novillo, Cielli 1997; Gaviño Novillo, 1999; Sarandon *et al.*, 2006).

El mayor desafío del SDL es el logro de un manejo integrado e inteligente apoyado en evidencia científica aplicando el *enfoque ecohidrológico* (Zalewski *et al.*, 1997); los principios de la gestión integrada de cuencas y la aplicación de la teoría de la ecología del paisaje; todo ello aplicando herramientas tecnológicas innovadoras combinadas con una planificación regional participativa (Sarandon *et al.*, 2006).

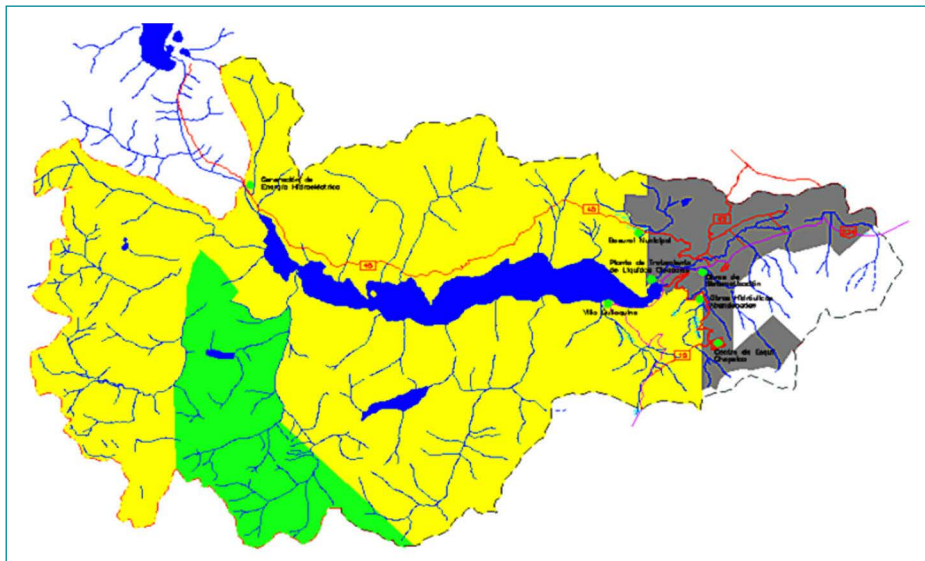
El enfoque ecohidrológico asume que el control de los procesos biocenóticos es posible a través de la regulación de la hidrología por la biota y viceversa, complementadas con medidas de ingeniería innovadoras basadas en soluciones naturales (SbN) (Zalewski 2000). En el caso del SDL el control de los procesos de erosión y transporte de sedimentos ha logrado mejorar la calidad del agua en la red de drenaje y en el propio Lago Lácar como resultado de una menor carga sedimentaria aportada, así como también, mediante la reducción del aporte de nutrientes arrastrados hacia los ríos y el lago empleando fitotecnologías (biofiltros) combinadas con plantas de tratamiento convencionales, permitiendo la reversión de los procesos de eutrofización que se verificaron como resultado de las medidas del proyecto. Por otra parte, se logró la mitigación de los peligros geohidrológicos frente a la elevada dinámica torrencial de la alta cuenca mediante obras de ingeniería innovadoras en América Latina que fueron integradas con estrategias de gestión distribuida de la cobertura forestal, reduciendo los riesgos para las poblaciones, la propiedad y la infraestructura aguas abajo, contribuyendo a garantizar la seguridad, mejorando a simultáneamente la calidad estética del paisaje y consecuentemente mejorando el desarrollo económico asociado al turismo, principal fuente de ingresos de la población.

El territorio de la cuenca está sometido a diferentes regímenes de manejo. La mayor parte se encuentra en jurisdicción de la Administración de Parques Nacionales (Parque Nacional Lanín y Reserva Parque Nacional Nahuel Huapi), estando su manejo regulado por la Ley Nacional n.º 22.351 y los reglamentos dictados por dicha autoridad de aplicación. Así también cuenta con zonas pobladas, como la ciudad de San Martín de los Andes, cuya jurisdicción municipal está regida por las Ordenanzas n.º 2.210/96 y n.º 8.390/09, existiendo otras normas concurrentes como la Ordenanza de Evaluación Ambiental n.º 1.584/94. En materia forestal la provincia adhiere a la ley 13.273 de Defensa de la Riqueza Forestal a través de la Ley Provincial n.º 1.890 (Figura 2).

En las áreas rurales del sector oeste se desarrolla una actividad agrícola-ganadera menor, de subsistencia, que genera impacto dando lugar a procesos de erosión y deterioro del suelo por sobrepastoreo. A ello se suman aprovechamientos forestales a partir de una importante superficie de plantaciones industriales combinadas con actividades turísticas intensivas en el Centro de Ski Chapelco, así como otras extensivas en la localidad de San Martín de los Andes y alrededores. En dicho asentamiento urbano, el más importante de la cuenca, se desarrollan importantes actividades de servicios y de construcción de viviendas.

En este trabajo, con objeto de brindar un contexto, se presenta una actualización sintética de las principales características, actividades e intervenciones llevadas a cabo en el SDL a lo largo de dos ciclos de planificación durante casi treinta años de actividades a partir de evidencia científica. En el primer ciclo se implementaron múltiples ejemplos de soluciones basadas en la naturaleza, mientras que en el segundo se llevaron a cabo actividades de apoyo al ordenamiento territorial de la Vega Plana o Vega de Maipú (ver Figura 1) a partir de un análisis de la capacidad de carga del sistema ambiental de la subcuenca del arroyo Calbuco que se sintetizó en un mapa de uso de suelo sustentable que se mantiene vigente desde el año 2009.

Figura 2. Jurisdicciones que regulan el uso del suelo: (i) en color amarillo área del Parque Nacional Lanin, (ii) en color verde área de la Reserva del Parque Nacional Nahuel Huapi) (iii) en color gris el ejido municipal de San Martín de los Andes (iv) en color blanco el sector rural de la Provincia del Neuquén



Fuente: Elaboración propia en base al Convenio Subsecretaría de Recursos Hídricos - Facultad de Ingeniería UNLP.

2. Organización formal a cargo del Sitio Demostrativo

El proyecto SDL fue diseñado e implementado inicialmente de manera conjunta por la entonces Dirección Nacional de Recursos Hídricos del Gobierno Nacional argentino y la Municipalidad de San Martín de los Andes para contribuir a la mitigación de inundaciones en el área urbana de la cabecera municipal, la reducción de la erosión en la cuenca alta y la restauración de algunos servicios ecosistémicos (calidad del agua y el paisaje), a partir de la implementación de los principios de la ecohidrología y el uso de soluciones experimentales basadas en la naturaleza (Gaviño Novillo 2003; Sarandon *et al.*, 2006; Gaviño Novillo, 2010).

En dichas actividades participaron numerosos profesionales e investigadores provenientes de varias instituciones a lo largo de los últimos 20 años, incluyendo autoridades gubernamentales, instituciones académicas y actores locales (stakeholders) (Gaviño Novillo, 2003; Sarandon *et al.*, 2006). Entre los primeros cabe citar a las autoridades municipales; las Direcciones Provinciales de Recursos Hídricos, Minería y Medio Ambiente; y a escala nacional la Administración de Parques Nacionales (Delegación Técnica e Intendencia del Parque Nacional Lanín), la ex Subsecretaría Nacional de Recursos Hídricos y el Comité Nacional para el Programa Hidrológico Intergubernamental de la Argentina (CONAPHI). Entre los actores no gubernamentales se pueden mencionar a los habitantes de San Martín de los Andes (propietarios, turistas, pescadores); comunidades de pueblos indígenas; la Universidad Nacional de La Plata (Facultad de Ingeniería y Facultad de Ciencias Naturales y Museo) así como la Universidad Nacional del Comahue por medio del Centro Regional Universitario Bariloche (CRUB, Bariloche; Río Negro, R. Argentina) y el Agrupamiento Universitario San Martín de los Andes (AUSMA). Al momento de la elaboración de este trabajo la gestión de la cuenca sigue contando con la participación de las diversas instituciones indicadas con mayor o menor intensidad en base a los diversos proyectos que se llevan adelante, parte de los cuales se apoyan en el enfoque ecohidrológico. En los últimos años, como consecuencia de la pandemia, la tercera etapa de las actividades está concentrada en la Estación de Captura y Reproducción de Peces ubicada sobre el Lago Lácar cuya administración actualmente depende

de la Dirección General de Biología Acuática de la Subsecretaría de Ambiente de la provincia del Neuquén aplicando técnicas ecohidrológicas basadas en la faunatecnología.

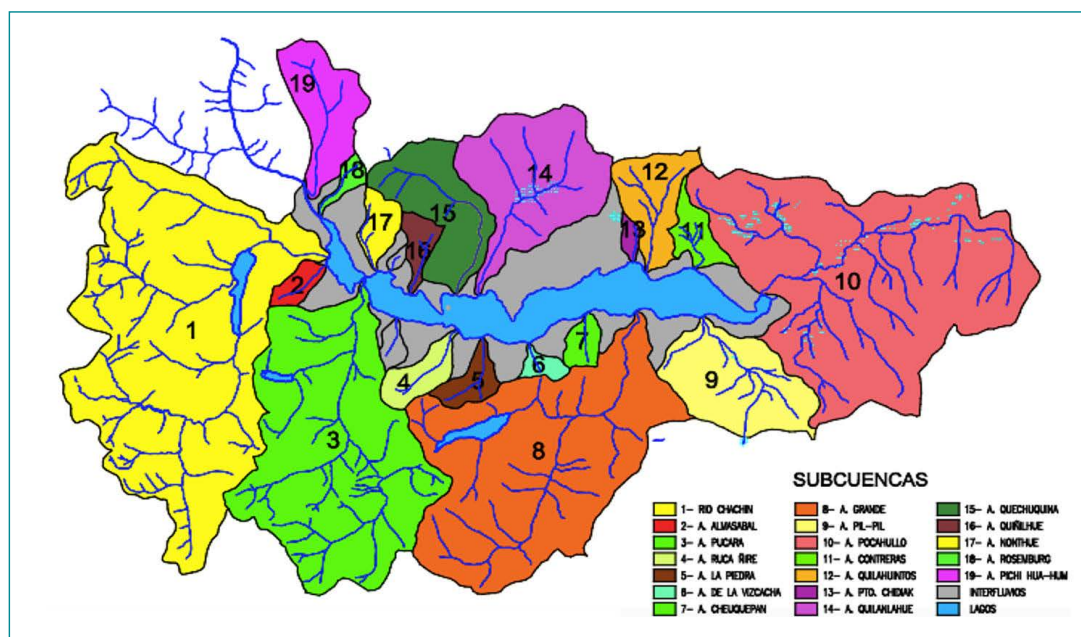
3. Características generales

3.1. Contexto geográfico e hidrográfico

El rasgo distintivo del paisaje de la cuenca del Río Hua-Hum debe su modelado principalmente a la acción de la glaciación del pleistoceno, muy poco modificada por la dinámica fluvial, eólica y de remoción en masa modernas. Se asienta en una depresión de forma alargada en dirección este-oeste rodeada por cordones montañosos cuyas alturas superan los 2.000 m. Los picos más importantes son los cerros Malo, Quilanlahué y Colorado, al norte; Chapelco Chico, Negro y Chapelco (su pico más alto, con una altura de 2.394 m) al este; Tres Dientes, Escondido, Pirámide, Punta Negra, Punta Blanca y Cerro Camello al sur, y el Cordón de Ipela al oeste.

En el fondo de dicha depresión se encuentra el Lago Lácar a la cota de 630 m IGM, presentando un largo aproximado de 22 km y un ancho de 3,5 km. Hacia el oeste se conecta con el lago Nonthué conformando una prolongación natural del Lago Lácar, con un espejo de agua de 5.314 Ha que recibe en forma radial las aguas de 19 subcuencas según la información topográfica oficial del IGN a escala 1:50.000 (ver Figura 3).

Figura 3. Subcuencas de aporte al Lago Lácar



Fuente: Elaboración propia en base al Convenio Subsecretaría de Recursos Hídricos-Facultad de Ingeniería UNLP.

Desde el extremo occidental del lago Nonthué nace el Río Hua-Hum que lleva sus aguas hacia el Océano Pacífico a través del sistema del Río Valdivia. Hasta el límite con Chile la superficie de la cuenca es de 1.056 km².

Por el sector norte aportan los arroyos Quiñilhue, Quechuquina, Quilanlahué y Quilahuintos, entre los de mayor superficie. Por el este, escurriendo por la vega Maipú, el arroyo Calbuco y sus afluentes, los arroyos que bajan de los faldeos septentrionales del cordón de Chapelco, Chacay o del Molino (donde se encuentra el área del proyecto en el primer ciclo), Pichi Chacay, La Escuela y Chapelco

Chico. De la unión del arroyo Calbuco con el emisario de los arroyos Trabunco y Quitrahue, que bajan por la vertiente noroccidental del cordón de Chapelco, se forma el arroyo Pocahullo. Este último, atraviesa la ciudad de San Martín de los Andes antes de desembocar en el Lago Lácar.

Por el sur aportan, entre otros, el arroyo PilPil, que nace en el Bajo Los Leones donde llegan las aguas del arroyo Partido; el arroyo Grande, uno de los de mayor extensión en la cuenca, que recibe por la margen izquierda las aguas provenientes del Lago Escondido (298 Ha) y desarrolla su desembocadura en forma de abanico aluvial. El Río Nonthué, que nace en el Lago Venados (71 Ha), recibe por la margen derecha las aguas del arroyo Pucará, desembocando en la angostura que separa al Lago Lácar del lago Nonthué. Este último lago es el receptor de los arroyos que bajan del sector cordillerano limítrofe. El principal tributario es el Río Chachín, que atraviesa el Lago Queñi (317 Ha), emisario del Arroyo Queñi, y recibe por la margen izquierda al arroyo Acol, Las superficies de las subcuencas se indican en la Tabla 1.

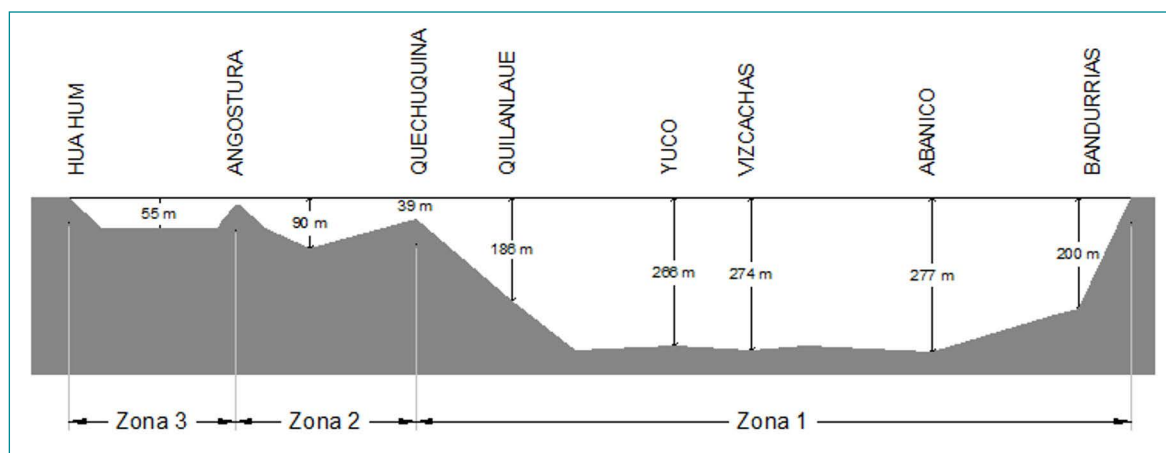
Tabla 1: Superficies de las subcuencas del Lago Lácar

SUBCUENCA		SUPERFICIE [km²]
1	RÍO CHACHÍN	214,0
2	ARROYO ALMASABAL	4,9
3	RÍO NONTHUÉ	138,7
4	ARROYO RUCA ÑIRE	9,9
5	ARROYO DE LA PIEDRA	7,5
6	ARROYO DE LA VIZCACHA	3,4
7	ARROYO CHEUQUEPAN	5,2
8	ARROYO GRANDE	143,8
9	ARROYO PIL PIL	41,0
10	ARROYO POCAHULLO	180,0
11	ARROYO CONTRERAS	8,6
12	ARROYO QUILAHUINTOS	20,3
13	ARROYO PUESTO CHIDIAK	2,2
14	ARROYO QUITANTAHUE	55,5
15	ARROYO QUECHUQUINA	34,0
16	ARROYO QUIÑILHUE	5,9
17	ARROYO VAN DORSSER	7,6
18	ARROYO ROSENBURG	3,4
19	ARROYO PICHÍ HUA HUM	26,1
	CUENCA TOTAL	1.055,6

Fuente: Elaboración propia en base al Convenio Subsecretaría de Recursos Hídricos - Facultad de Ingeniería UNLP.

En relación al sistema Lago Lácar-Nonthué, en base a los estudios llevados a cabo por la Administración de Parques Nacionales (Cordini, 1964) y distintos sondeos efectuados en el Lago en el marco del SDL, se obtuvo un mapa batimétrico del sistema (Figura 4). De un análisis de la distribución de isobatas del mismo pueden identificarse claramente tres zonas:

Figura 4. Perfil longitudinal del Lago Lácar-Nonthué a lo largo de su eje mayor



Fuente: Adaptado por Gaviño Novillo de Cordini, Administración Nacional de Parques, 1964.

- **Zona 1:** correspondiente a la zona Este de la cubeta del lago que se extiende desde la costa en coincidencia con San Martín de los Andes hasta una línea que une Punta Peligro (en la península Quechuquina) con Punta Rucañire en la costa Sud (profundidad aproximada 39 m). Es la de mayor superficie, donde se ubican las mayores profundidades, dado que la isobata 250 la recorre en toda su extensión.
- **Zona 2:** corresponde al sector intermedio del Lago, entre el límite con la zona 1 y La Angostura (profundidad aproximada 3 m). Es una zona pequeña y poca profunda, con 90 m de profundidad máxima.
- **Zona 3:** corresponde al sector occidental, abarcando la totalidad del lago Nonthué. Es una zona menos profunda aunque solo admite la isobata de 50 m.

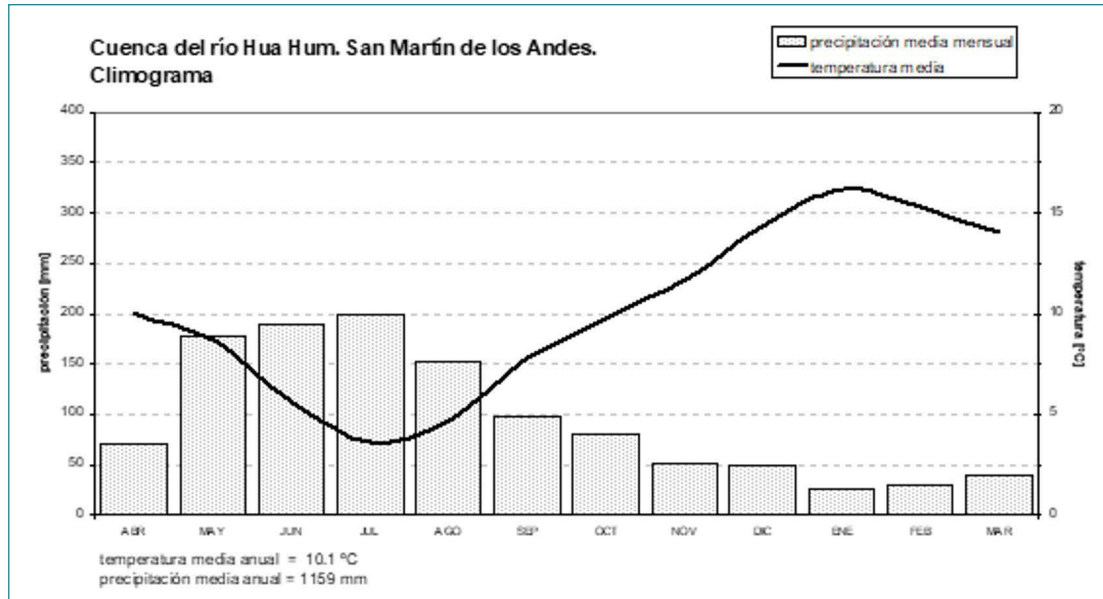
Durante el período de crecidas (desde septiembre a diciembre), el nivel del Lago puede alcanzar niveles de 2 m por encima del nivel medio, lo cual representa un incremento de volumen de 107 hm³, según observaciones directas realizadas (Cordini, 1964).

De acuerdo con los datos obtenidos del Catálogo de Lagos y Embalses de la Argentina (MEyOSP, 1995), en verano la temperatura del lago oscila entre 14 °C en la superficie y 4.4 °C a 70 m de profundidad. Es un lago monomítico, templado. Su estado trófico global es ultraoligotrófico, pero cambia a oligomesotrófico en la Bahía de San Martín de los Andes. El tiempo de residencia es de 5,8 años.

3.2. Aspectos climáticos e hidrológicos

La temperatura media anual en San Martín de los Andes (cota 647 m IGM) es de 10,1 °C. El menor valor de temperatura media mensual corresponde al mes de julio, siendo de 3,6 °C. El mayor valor corresponde a enero y es de 16,2 °C. A continuación, se muestra el climograma en San Martín de los Andes (Figura 5).

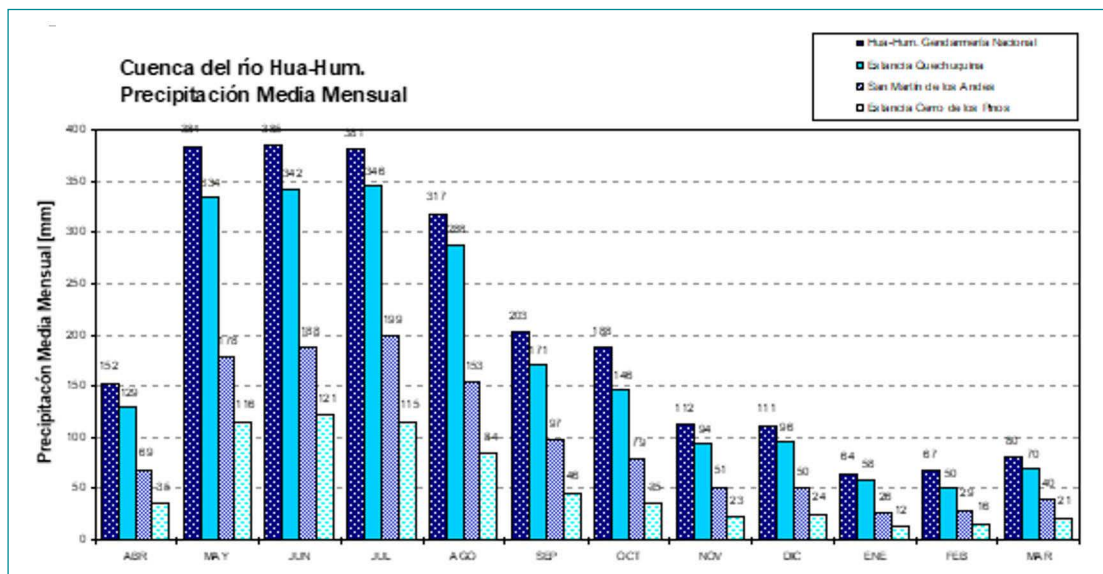
Figura 5. Climograma de San Martín de los Andes



Fuente: Elaboración propia en base al Convenio Subsecretaría de Recursos Hídricos-Facultad de Ingeniería UNLP.

La cuenca presenta un gradiente climático en sentido oeste-este, debido fundamentalmente a las precipitaciones, con isohietas de 4.000 mm en la frontera con Chile, reduciéndose hasta 1.200 mm, aproximadamente, en la parte oriental de la cuenca. La variación regional de la precipitación se presenta a partir de los datos de las precipitaciones medias mensuales de cuatro estaciones ubicadas sobre una transecta a lo largo del paralelo 40° Sur, estimándose una variación de unos 70 mm/km para la precipitación media anual (Figura 6).

Figura 6. Precipitación media mensual a lo largo de una transecta Oeste-Este según paralelo 40° Sur



Fuente: Elaboración propia en base al Convenio Subsecretaría de Recursos Hídricos-Facultad de Ingeniería UNLP.

Estimaciones efectuadas en 1958 por el Ing. Figueroa Bunge para la Corporación Norpatagónica, indican que el módulo del río en la Frontera es del orden de los 50 m³/s. Las evaluaciones correspondientes a la sección de aforos controlada por la Dirección General de Aguas de la República de Chile, ubicada aguas arriba de su entrada al lago Pirehueico, dan un valor del módulo del orden de los 68 m³/s.

3.3. Descripción ecológica

Fitogeográficamente el área de la cuenca pertenece al distrito Subantártico, de Bosque Caducifolio y Valdiviano. Cubre las laderas de las montañas desde el nivel de base definido por el complejo lacustre de los lagos Lácar-Nonthé, hasta las cotas de 1.600-1.800 m, distribuyéndose según sus requerimientos ecológicos, en estrecha relación con los factores geológicos, geográficos, edáficos, bióticos y climáticos, siendo este último uno de los más relevantes. Otro factor importante en la distribución de la vegetación es la altura. La cuenca presenta también comunidades del Distrito Alto andino Austral, Provincia Alto andina, Dominio Andino-Patagónico. Es un distrito discontinuo que se forma a modo de islotes por encima de la Provincia Subantártica, y ocupa las altas montañas del centro y sudoeste de Neuquén, con comunidades muy heterogéneas: estepas gramíneas de *Poa obvallata* y *Festuca weberbaueri*, etcétera (Cabrera, 1971).

El área de la cuenca presenta un nivel de biodiversidad bajo a moderado, no obstante lo cual concentra comunidades ecológicas de altísimo valor de conservación por ser exclusivas en la Argentina, con una restringida distribución y escasa presencia regional.

En la cabecera de las subcuencas hacia el sector oriental, la vegetación es estepa gramínea (Distrito Alto andino Austral) que al descender aglutina matorrales de Lenga achaparrada. Hacia el Oeste, con el bosque alto de Lenga, aparecen inclusiones de pastizal de montaña (gramíneas y ciperáceas) y zonas con mallines. En la zona media la vegetación es más heterogénea: se encuentra el bosque de Lenga, y también se desarrolla un bosque con especies de Coihue, Ñire y Radal con inclusiones de pastizal de montaña (especies tales como neneo, coirón y gramíneas) y cañaverales de caña coihue en las partes erosionadas. En la porción baja de las subcuencas la vegetación dominante está compuesto por el bosque de Coihue y es Ciprés, con zonas de pastizal de ciperáceas y gramíneas donde se realizan actividades de ganadería extensiva y extracción de madera.

Hacia el Oeste, se encuentran importantes masas boscosas de raulí y coihue, mientras que hacia el Este los bosques son abiertos y semidensos de ciprés. Entre ambos extremos hay bosques puros de roble pellín o mixtos de roble pellín-coihue-raulí. La lenga se distribuye en gran parte de la cuenca, formando densos matorrales generalmente monoespecíficos o con alguna proporción de raulí y/o roble pellín (APN, 1997). Hacia el Este, en el ecotono con la estepa, la cobertura vegetal corresponde a pastos de *Festuca spp.* y *Stipa spp.*, y arbustos espinosos (Veber y Lorenz, 1988).

El mayor impacto sobre el ecosistema se relaciona por la expansión urbana sobre los bosques nativos (deforestación), las actividades constructivas sobre áreas frágiles (ocasionando erosión y deslizamientos de tierra), incremento en la densidad poblacional (que aumenta el consumo de agua) y la contaminación del agua (por aportes de materia orgánica y nutrientes). Todo esto afecta la calidad del agua en el SDL (incluyendo el lago), generando conflictos sociales debido a la escasez periódica de agua para las poblaciones nativas.

3.4. Contexto socioeconómico

Hasta la década del 70 la economía de la cuenca provenía principalmente de la actividad maderera a través de concesiones que otorgaba la Administración de Parques Nacionales para el manejo forestal y obtención de madera de aserrío del bosque nativo circundante. La actividad turística era marginal, principalmente estival, coincidiendo con las temporadas de camping, pesca y caza deportiva. Hacia fines de los 70 se comienza a consolidar como destino turístico, a partir de la inauguración del Centro de Ski Chapelco. La implementación, por parte del Estado Provincial de préstamos blandos para inversión hotelera y de servicios turísticos, consolidó la vocación turística de San Martín de los Andes.

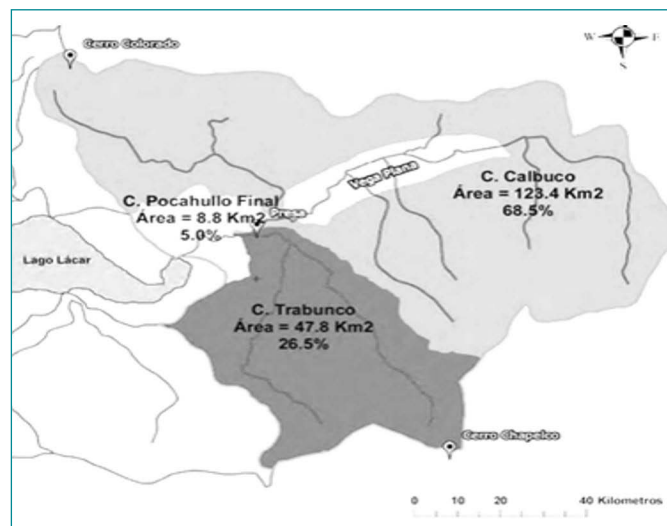
Este proceso generó una importante inmigración no solo de fuertes inversores, sino también de nuevos emprendedores con empresas familiares y trabajadores de la construcción, entre otros. Asimismo, la necesidad de proporcionar nuevos servicios educativos, de salud y de seguridad, significó la inmigración de maestros, médicos y policías. Este incremento de población por inmigración no ha dejado de ocurrir desde entonces, con pulsos de incremento. Se pasó de unos 8.000 habitantes a fines de la década del 70 a 17.000 en 1991, 22.500 en el 2001 y 30.000 en el 2011; estimándose que en la actualidad alcanza a los 60.000 hab. (2021).

La principal actividad económica es el turismo, tanto estival (senderismo, kayak, rafting, pesca, camping, observación de aves, biking, deportes lacustres) como invernal (centro de ski Chapelco), por lo que en el último caso las actividades de montaña (ski, snowboard, raquetas) son importantes.

3.5. Las áreas de trabajo del primer y segundo ciclo del SDL

El primer ciclo del proyecto que derivó en el SDL se inició en 1994 y se extendió hasta el año 2005 desarrollándose en las subcuencas de los arroyos Trabunco y Quitrahue, mientras que en el segundo se desarrolló en la Vega Plana que corresponde al fondo del valle del Arroyo Calbuco. Ambos arroyos confluyen formando el arroyo Pocahullo cuya cuenca tiene una superficie de 180 km² y atraviesa la ciudad de San Martín de los Andes hasta desembocar en el Lago Lácar. Dichos subsistemas hídricos presentan características particulares que definen su respuesta ante los eventos de precipitación y sus correspondientes problemáticas (Figura 7) (Gaviño Novillo, 2006; Ortiz, 2015; Diaz, 2017).

Figura 7. Subcuencas de los arroyos Trabunco, Calbuco y Pocahullo que conforman las áreas de trabajo del primero y segundo ciclo del SDL



Fuente: Elaboración propia.

El Arroyo Trabunco, tiene superficie de aporte de 47,8 km² (26,5 % de la superficie de la cuenca total) presentando un desnivel de 1.740 m y un curso principal de una longitud de cerca de 9 km, dando lugar a un tiempo de concentración muy corto y un escurrimiento de carácter torrencial que acarrea gran cantidad de rocas de gran tamaño, grandes troncos (large woody debris) y detritos de leña, así como un importante arrastre sólido. Por su parte, la cuenca del Arroyo Calbuco abarca 123,4 km² (68,5 %) contando como afluentes a una serie de tributarios como los arroyos Chapelco Chico, La Escuela, Pichi Chacay, Chacay, Rosales, Cull-rani y Maipu. Todos ellos tienen su origen en las laderas del cordón montañoso del Cerro Chapelco ubicado al sur de la cuenca, mientras los otros nacen en las laderas de un cordón montañoso ubicado al norte del cual se destaca el Cerro

Colorado como pico referente, dando lugar a un valle entre estos cordones montañosos conocido como la Vega Plana. En esta cuenca el rango es de 1.250 m y los tiempos de concentración resultan mayores al doble de los de la cuenca del Arroyo Trabunco. A los fines de caracterizar el comportamiento de la cuenca integral del Arroyo Pocahullo, cabe destacar la presencia de la Vega Plana dado que corresponde a un gran humedal que permite un importante amortiguamiento de las crecidas de los distintos arroyos tributarios al curso del Calbuco, previo a su confluencia con el Arroyo Trabunco. A ello también contribuye el embalse de una presa en arco ubicada sobre el mismo Arroyo Calbuco (Prog. 3800) construido como parte de una antigua central hidroeléctrica actualmente fuera de servicio, que con sus 8.000 m³ de almacenamiento en su vaso representa una alteración en la continuidad del flujo sólido y líquido, pese a su avanzado estado de colmatación (Gaviño Novillo, 1994; Ortiz, 2015; Martínez, 2016).

4. Servicios ecosistémicos que presta

Los ecosistemas presentes en la cuenca prestan importantes servicios ambientales. Por un lado la presencia del bosque nativo, además de aportar un importante elemento al paisaje, forma parte del mantenimiento de los mecanismos reguladores del sistema natural, especialmente del ciclo hidrológico local y del microclima, aportando oxígeno a la atmósfera, captando a la vez dióxido de carbono, brindando el hábitat natural a especies en peligro de extinción y de importancia económica.

Además de los servicios prestados por el bosque, otros ecosistemas también contribuyen al funcionamiento del sistema natural. Los pastizales y mallines (humedales) de la cuenca captan los nutrientes provenientes de la escorrentía superficial, disminuyendo la carga orgánica de los cursos de agua. A la vez minimizan el riesgo de eutrofización de los cuerpos de agua ubicados aguas abajo, y el efecto de las crecidas por medio de la regulación de la escorrentía, funcionando a la vez como trampas de sedimentos lo cual permite minimizar los episodios de colmatación de desagües, alcantarillas y obras de toma.

Los arroyos tienen la capacidad de autodepurar y reciclar los nutrientes y contaminantes, condicionando la cantidad (caudal, frecuencia), la calidad (contaminantes, sedimentos, nutrientes) y usos potenciales (bebida, riego, etc.), del agua que llega a la ciudad de San Martín de los Andes. También el suelo provee una gran variedad de servicios ecosistémicos, además de actuar como sustrato para las plantas, dado que juega un rol fundamental en la filtración y purificación del agua caída por lluvia (Muschong, 2010).

5. Objetivos

5.1. Principales desafíos para el SDL

Sobre la base de una evaluación ambiental regional llevada a cabo en las cuencas de los dos ciclos demostrativos se han identificado los siguientes desafíos para el SDL:

- i. **Riesgo de inundaciones:** la población de San Martín de los Andes, las principales vías de comunicación y las actividades turísticas están sujetas a un elevado nivel de riesgo de inundaciones con una alta dinámica torrencial con transporte de grandes rocas, grandes troncos de leña provenientes de la alta cuenca del Arroyo Trabunco así como de erosión hídrica laminar y concentrada en sus márgenes.

- ii. **Alteración de los recursos hídricos por contaminación:** tanto natural como de carácter difuso debido al origen volcánico de los suelos de la cuenca, así como también de carácter puntual debido a la superación de la capacidad de tratamiento de los efluentes cloacales de las plantas. Esta última situación pone en peligro la salud de la población, especialmente de las comunidades indígenas mapuches ubicadas en la cuenca, las cuales hacen uso directo del recurso. Los arroyos Trabunco y Quitrahue, como se observó en los muestreos de calidad de agua que son llevados a cabo desde 1994, son recursos hídricos sensibles al incremento de nutrientes, materia orgánica y coliformes, así como también el Lago Lácar, de características ultraoligotróficas, lo que podría aumentar el riesgo de eutrofización por los aportes de origen humano (efluentes cloacales) o agropecuario (aportes de la ganadería).
- iii. **Conflictos por el uso de los recursos hídricos de las subcuencas Trabunco-Quitrahue:** Si bien hay abundancia de recursos hídricos debido a la presencia de arroyos y el lago, existe una sobreexplotación del agua durante la estación estival, específicamente del arroyo Trabunco. En esta época el arroyo es explotado por diversos usos como bebida, riesgo y abastecimiento al ganado.
- iv. **Riesgo de degradación de ecosistemas naturales:** El Bosque Andino Patagónico en el cual se encuentra inmersa la cuenca presenta una alta fragilidad ambiental en comparación a otros ecosistemas. Entre otras debido a su condición “insular”, al estar aislado geográficamente de otros ecosistemas boscosos y presentar características muy particulares en cuanto a clima, topografía y tipo de suelo; y por su falta de adaptación frente al desarrollo de algunos usos de la tierra tales como el ganadero, forestal y turístico (APN, 2004).
- v. **Sustrato geológico inestable:** En algunos sectores se presentan distintos grados de fracturación de las rocas por lo cual se deben restringir o evitar las obras de infraestructura y el asentamiento humano en sectores críticos.
- vi. **Riesgo de incendio:** La coincidencia del periodo de bajas precipitaciones con la época estival condiciona el riesgo de incendios forestales. Esta situación puede verse incrementada por descuidos de los turistas y acampantes en la zona.
- vii. **Riesgo geológico:** Las elevadas pendientes que presentan las subcuencas y las zonas con suelo desnudo favorecen los procesos de erosión laminar. También la falta de ordenación de las actividades de extracción de madera y ganadería disminuyen la cobertura del suelo, por lo cual todos estos factores incrementan el proceso erosivo.
- viii. **Conflictos mapuches-Municipio-Provincia por la tenencia de la tierra:** Esta problemática no solo repercute en los aspectos legales de posesión de la tierra y otorgamiento de la propiedad comunitaria de las comunidades indígenas mapuches, sino que también obstaculiza la planificación del uso de la tierra así como la administración y aprovechamiento de los recursos naturales presentes en la cuenca.
- ix. **Aumento de la densidad poblacional:** El crecimiento demográfico en los últimos años puede caracterizarse como explosivo para el ejido de San Martín de los Andes. Esto se ve acompañado por un aumento de los residuos sólidos sin tratamiento, efluentes cloacales e impermeabilización, así como también el aumento de la demanda de agua y servicios. En general este proceso no se ve acompañado por un crecimiento equivalente de la infraestructura y los servicios de manera ordenada y planificada. Como consecuencia de ello, se produce la pérdida de bienes y servicios ecosistémicos tales como el deterioro de la calidad de las aguas del Lago Lácar y los arroyos de la cuenca, así como también la degradación del paisaje, la erosión y deforestación por la expansión de la urbanización.
- x. **Avance del área urbana sobre los límites de las áreas protegidas:** La capacidad de planificación urbana debido al aumento de la población se ve desbordada en zonas periféricas. Esta

situación debido a la contigüidad con las tierras del Parque Nacional Lanín da lugar al avance de la ciudad hacia sectores protegidos, generando conflictos no solo legales sino también ambientales como por ejemplo la degradación del paisaje, contaminación, deforestación, etcétera.

En este amplio marco de desafíos identificados durante los talleres expertos en la instancia de diagnóstico para la elaboración del Plan Director para la gestión de la cuenca, se lograron priorizar los objetivos científicos del SDL. Los tres primeros desafíos vinculados a la hidrología de la cuenca (escurrimiento superficial, aportes de nutrientes y sedimentos), debido en parte a los cambios en el uso del suelo, la reducción de la cobertura vegetal dieron lugar a la identificación de soluciones basadas en las fitotecnologías para mejorar tanto los procesos limnológicos como los servicios ecosistémicos (calidad del agua, valor estético del paisaje) (Sarandon *et al.*, 2006).

5.2. Los desafíos abordados mediante el enfoque ecohidrológico

El sector costero del Lago Lacar adyacente al casco urbano de San Martín de Los Andes ha sido seriamente afectado por procesos de eutrofización asociados a la contaminación natural y a la descarga de efluentes cloacales a los ríos que drenan directamente hacia el lago, magnificado por la reducida dinámica de la escorrentía superficial que no contribuye a la autodepuración de las aguas. Esta área, de amplio uso por parte de la población residente y los turistas, fue cerrada a las actividades recreacionales debido al deterioro de las condiciones sanitarias.

A partir de la implementación del Plan Director acompañado de políticas sistemáticas de restauración ambiental impulsadas desde el Municipio, acompañado por el Estado Nacional y la Provincia de Neuquén se pudo lograr una restauración mediante la integración de intervenciones de ingeniería clásica (planta de tratamiento) acompañadas de soluciones basadas en la naturaleza a partir de los principios de la ecohidrología que no solamente permitieron lograr la reducción de la contaminación del agua sino también un mejoramiento y restauración de las condiciones previas a la eutrofización de las aguas del Lago Lácar. Se implementaron medidas haciendo uso de las fitotecnologías y el biofiltrado y el control de los procesos de erosión que disminuyen los aportes de sedimentos y la carga de nutrientes a los ríos y al lago (causantes de la eutrofización y la contaminación del cuerpo de agua) lo cual permitió la recuperación de la calidad del agua y de manera posterior las actividades recreativas.

La formulación e implementación de políticas y/o estrategias de manejo alternativo que lograron dicho resultado constituyeron sin duda un ejemplo inédito de efectos demostrativos, por lo cual, el proyecto fue presentado y aceptado como un sitio demostrativo.

Pero los desafíos para la gestión de la cuenca son muy amplios por lo cual necesario conocer la relación existente entre el uso del territorio y la respuesta hidrológica de la cuenca. Al respecto, un aspecto particularmente importante surge de la evaluación de las tasas de la erosión del suelo y su impacto sobre la calidad del agua; así como de la carga de nutrientes hacia los cuerpos de agua. Tanto la eutrofización, debido al aumento de la carga de nutrientes, y la turbidez, debida al aumento de la carga de sedimentos dan lugar a una degradación de la calidad del agua y la consiguiente pérdida de su calidad recreativa (olores, transparencia), un mayor riesgo sanitario (concentración de bacterias del grupo Coli en el agua), y un aumento del costo de tratamiento para potabilizarla. Estos temas son útiles para el desarrollo de estrategias de manejo e implementación de políticas de uso del suelo para toda la cuenca de aporte (Brea *et al.*, 1999; Gaviño Novillo, 2001).

El proyecto SDL en síntesis apunta al desarrollo y difusión (demostración) e implementación del enfoque ecohidrológico, el uso de fitotecnologías y soluciones innovadoras de infraestructura hídrica para el manejo de los recursos hídricos a escala de cuenca, reduciendo los conflictos institucionales y de manejo. El objetivo principal de proyecto es "demostrar el uso de la ecohidrología

como herramienta para una gestión preventiva del agua, mejorando los servicios provistos por la cuenca y la calidad del agua, y consecuentemente reduciendo los impactos ambientales debido al cambio del uso del suelo”. Esto puede ser logrado, por ejemplo, identificando aquellos sectores del bosque y otras coberturas de vegetación nativa más importantes para el control de erosión (bosques riparios) o la capacidad de absorción de nutrientes (vegetación palustre natural), proponiendo medidas específicas para el manejo y conservación a través de la regulación del uso del suelo, soluciones basadas en la naturaleza y soluciones ingenieriles cuando ello es necesario.

5.3. Objetivos del SDL

Las actividades en el SDL tienen como objetivo principal el desarrollo, difusión e implementación del enfoque ecohidrológico para la gestión de los recursos hídricos a escala de cuenca, especialmente en el ámbito Andino-Patagónico. La principal meta es “demostrar el uso de la ecohidrología como herramienta para la gestión preventiva del agua, potenciando los servicios ambientales que brinda la cuenca, aumentando la calidad del agua y reduciendo los impactos debidos al cambio del uso del suelo”. Para ello vincula la investigación científica con la elaboración de políticas públicas y la gestión inteligente de cuencas mediante el desarrollo de:

- un modelo conceptual para la evaluación del impacto debido a las prácticas de gestión en la respuesta de la cuenca, incluida la evaluación de los riesgos;
- estrategias mejoradas que utilizan los principios ecohidrológicos para el manejo integrado de cuencas hidrográficas;
- recomendaciones de políticas basadas en evidencia para las autoridades provinciales y municipales.

Para lograr el objetivo principal, los objetivos operativos del SDL son:

1. Evaluación del impacto del uso de la tierra en la calidad del agua y el estado ecológico del sistema río-lago.
2. Evaluación del impacto de eventos catastróficos (inundaciones, incendios) en la ecología del sistema.
3. Evaluación de los riesgos reales y potenciales frente a los servicios ecosistémicos a escala de cuenca en áreas protegidas y desprotegidas para diferentes escenarios prospectivos de manejo.
4. Elaboración de una estrategia basada en evidencia científicas para el manejo coherente del SDL.
5. Organización y/o participación de ONG locales y/o asociaciones de propietarios para asegurar la implementación exitosa de las estrategias de manejo resultantes del Plan Director.
6. Organización de reuniones con expertos nacionales e internacionales para ser consultados sobre los contenidos científicos del Sitio Demostrativo.
7. Organización de reuniones con comunidades locales, actores locales y tomadores de decisiones para promover la aplicación de herramientas basadas en la ecohidrología y las fitotecnologías en la gestión del agua para otras cuencas transfronterizas argentino-chilenas.
8. Organización y coordinación de actividades de formación *in situ* para jóvenes científicos, responsables de la toma de decisiones y partes interesadas.
9. Elaboración y difusión de materiales de información sobre el Sitio Demostrativo y sus resultados (folletos, CD, afiches, página web, MOCC) tanto en castellano como en inglés.

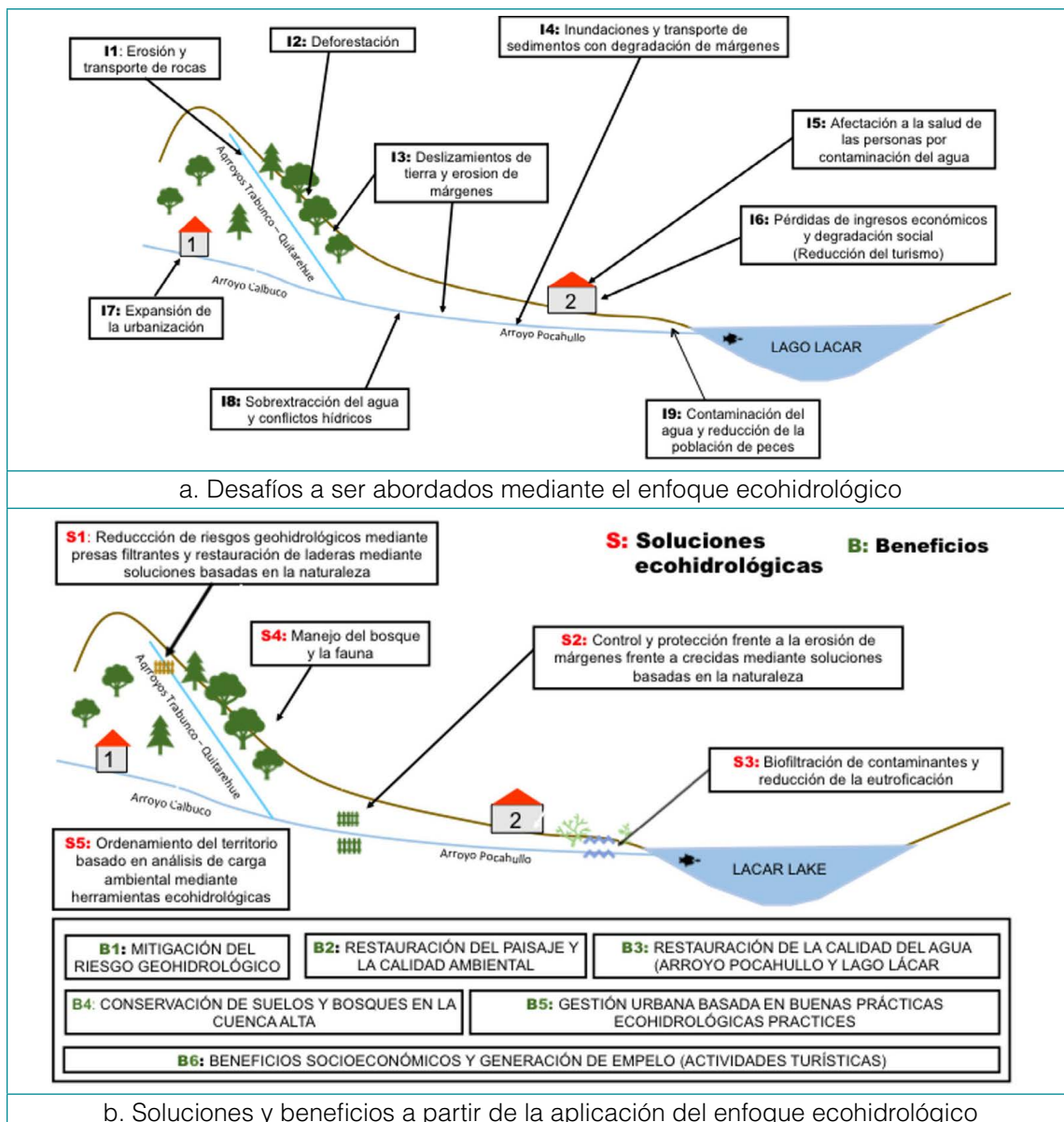
6. Modelo conceptual de funcionamiento

Las cuencas son sistemas complejos cuyos factores biológicos, climáticos, geológicos e hidrológicos se combinan con factores sociales, políticos y económicos para producir una serie de procesos ambientales que determinan la evolución del sistema en el tiempo. Por ello, cualquier herramienta que permita simplificar el estudio de estos factores y predecir los efectos de variaciones en alguno de ellos es de gran ayuda tanto en la investigación como en la gestión.

Al respecto, para el SDL se ha implementado un modelo conceptual a partir del conocimiento de los desafíos a abordar, el entendimiento de los procesos para poder aplicar el potencial de la regulación dual propuesto por la ec hidrol o g í a y plantear soluciones ec hidrol o g í c a s a partir de cuya implementación es posible lograr los beneficios esperados.

En este trabajo se ha actualizado el modelo conceptual del DSL integrando los desafíos abordados durante el primer y segundo ciclo, identificando las soluciones ec hidrol o g í c a s que se implementaron con los respectivos beneficios obtenidos (ver Figura 8).

Figura 8. Actualizado el modelo conceptual integrando los desafíos abordados durante el primer y segundo ciclo del SDL



Fuente: Gaviño Novillo, 2021.

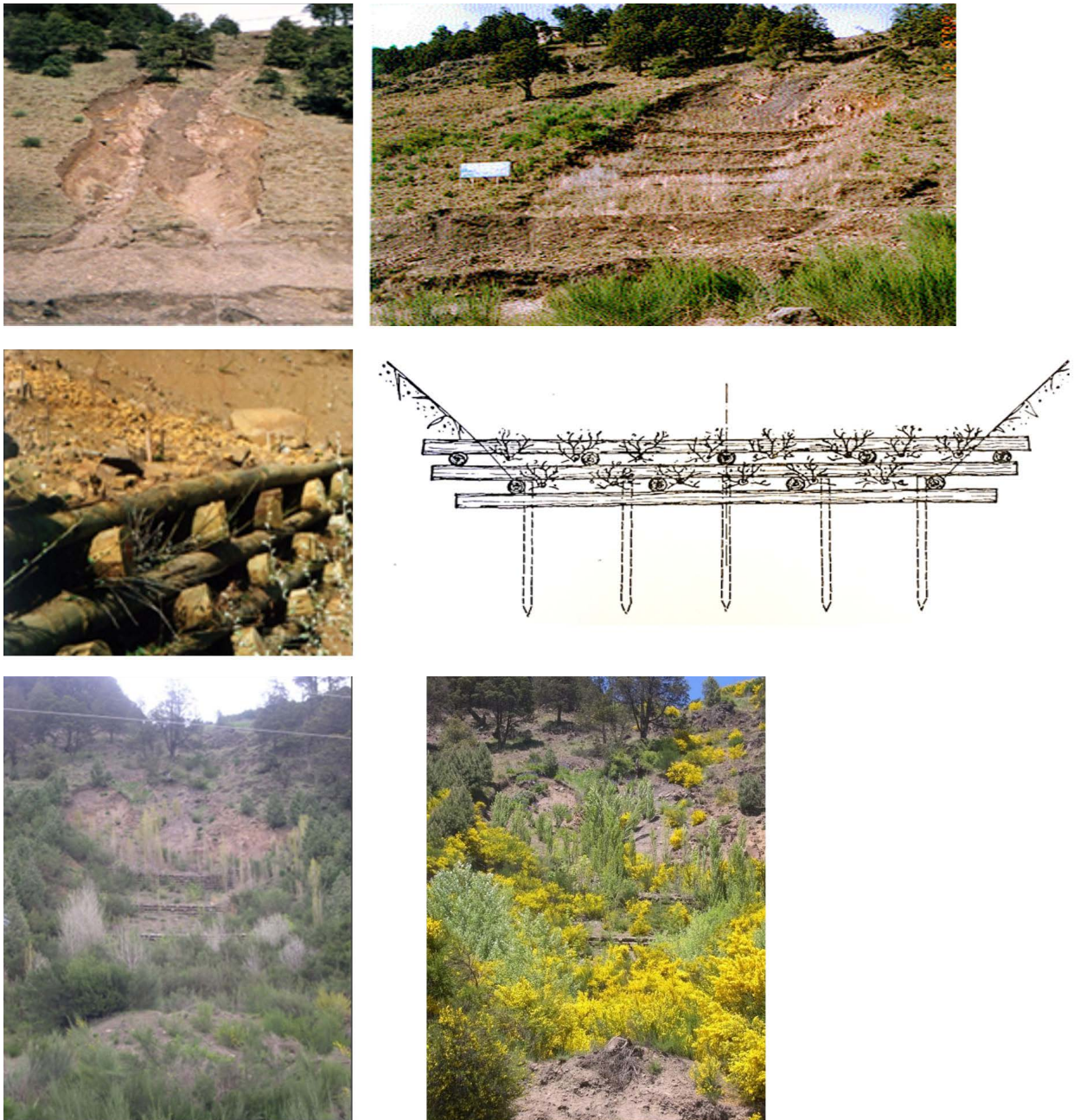
7. Medidas y acciones ecohidrológicas implementadas

7.1. Síntesis de medidas implementadas durante el primer ciclo

Se adjuntan testimonios fotográficos de las soluciones ecohidrológicas implementadas en el SDL.

7.1.1. Restauración de procesos de erosión en laderas mediante soluciones basadas en la naturaleza

Figura 9. Secuencia de actividades desarrolladas para la restauración de una ladera luego de 22 años de monitoreo



© Elaboración propia en base al Convenio Subsecretaría de Recursos Hídricos-Facultad de Ingeniería UNLP.

7.1.2. Restauración de procesos de erosión en márgenes del arroyo Pocahullo con soluciones basadas en la naturaleza

Figura 10. Secuencia de actividades desarrolladas para la restauración de una ladera luego de 22 años de monitoreo

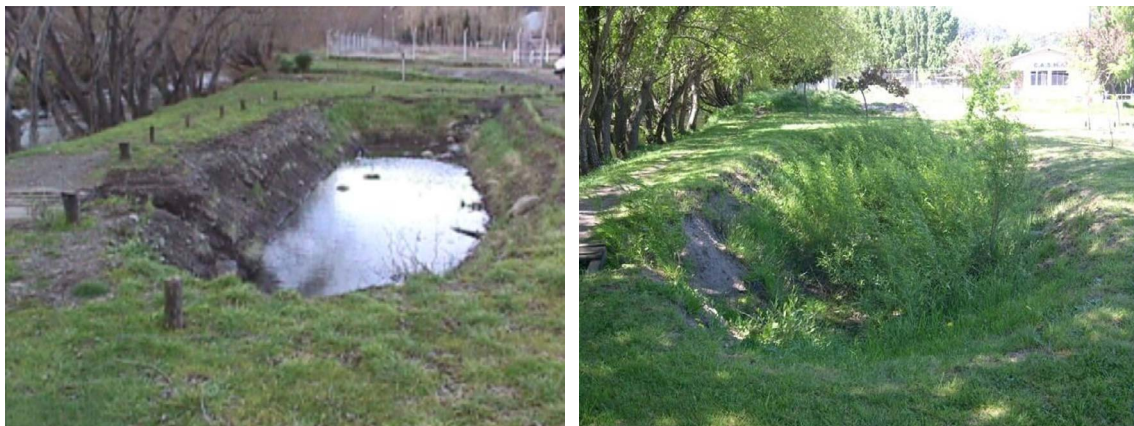


© Elaboración propia en base al Convenio Subsecretaría de Recursos Hídricos-Facultad de Ingeniería UNLP.

7.1.3. Biofiltrado de aguas pluviales en ambiente urbano

Para mejoramiento de la calidad del agua debido al transporte de nutrientes y contaminantes previo al retorno del agua al cauce del Arroyo Pocahullo.

Figura 11. Biofiltro en el parque lineal del arroyo Pocahullo.



© Elaboración propia en base al Convenio Subsecretaría de Recursos Hídricos-Facultad de Ingeniería UNLP.

7.1.4. Presa filtrante de retención de grandes clastos y troncos de madera combinada con una plazoleta de depósito de sedimentos

La retención de grandes clastos y rocas aguas arriba de diques filtrantes puede ser la única solución posible cuando esos materiales provienen de zonas de la cuenca inaccesibles. En consecuencia es necesario evitar daños a zonas habitadas durante el tiempo necesario para que las medidas biológicas y mecánicas adoptadas en el lugar de origen de la erosión, produzca los efectos buscados. En estos casos las presas filtrantes tienen como objetivo retener preferentemente el material de mayores dimensiones, diseñando el tamaño y separación de los filtros de hierro en función del tamaño de los clastos. Así también con objeto de reducir la energía cinética de la corriente líquida-sólida se define la inclinación de las rejillas (filtros) hacia agua arriba de manera que las rocas tiendan a subir y bloquear a las que vienen detrás de la corriente generando un vórtice horizontal. La reja vertical superior tiene como objetivo retener los troncos que vienen flotando sobre el flujo sólido-líquido de la corriente (ver Figura 12). Los sedimentos y clastos de menor tamaño que pasan los filtros son retenidos aguas abajo en una plazoleta de depósitos que integra un dique “a peine” de baja altura.

Figura 12. Obras de ingeniería diseñadas en base a una imitación de los procesos naturales



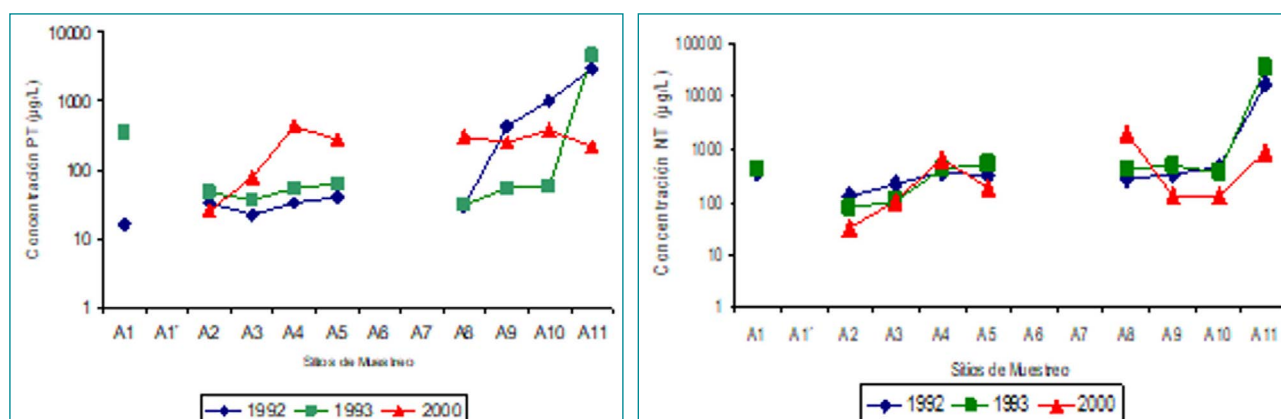
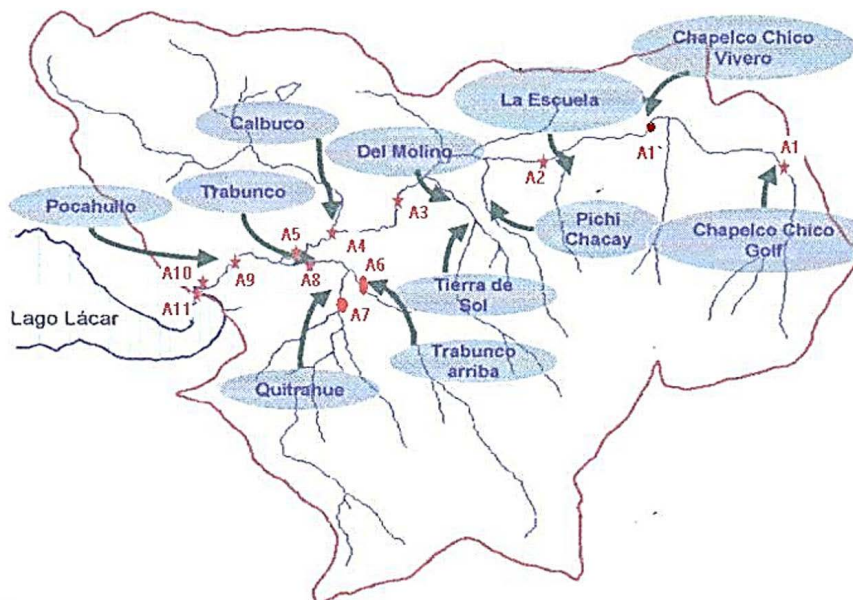
© Elaboración propia en base al Convenio Subsecretaría de Recursos Hídricos-Facultad de Ingeniería UNLP.

7.1.5. Monitoreo hidrológico y de la calidad del agua

En el SDL se lleva a cabo un monitoreo hidrológico sistemático y otro de la calidad del agua por intermedio de la Universidad Nacional del Comahue – CRUB desde 1992 con objeto de hacer un seguimiento sistemático. En la Figura 13 se indican las estaciones de monitoreo existentes en la cuenca del Arroyo Pocahullo y algunos resultados seleccionados obtenidos hasta el año

2000 como referencia de dos de las variables correspondientes a la materia orgánica (Pedrozo, Temporetti, CRUB, 2000).

Figura 13. Estaciones de monitoreo en la cuenca del Arroyo Pocahullo y resultados de mediciones seleccionadas



Fuente: Elaboración propia en base al Convenio Municipalidad de San Martín de los Andes-Universidad Nacional del Comahue (CRUB).

El análisis de las características ecológicas actuales de la cuenca del arroyo Pocahullo y del Lago Lácar (UNC, 2006a; 2006b) indica un estado trófico ultraoligotrófico a oligotrófico, con una fuerte variabilidad estacional en las características físicas y químicas siguiendo el régimen de precipitación, con un evidente efecto de dilución y aumento de la carga de sedimentos en primavera (durante el deshielo). Esta condición natural es compartida por otros lagos y cuencas de la ecorregión (UNC 2006a; 2006b; Burkart *et al.*, 1999). Las variables físicas, químicas y biológicas (fitoplancton, clorofila a, bacteriología) en 11 puntos de muestro a lo largo del Río Pocahullo (que desemboca en el Lago Lácar), así como en 8 puntos de muestreo en el lago mismo, muestran un ambiente acuático típico de la Ecorregión Andino Patagónica (UNC, 2006a; 2006b). Existe un claro aumento de la carga de nutrientes, como se indicó previamente (P y N) en aquellos sectores cercanos a las principales actividades antrópicas (áreas residenciales), los cuales tienen un marcado efecto sobre las condiciones ecológicas del Lago Lácar (eutrofización, turbidez, calidad recreativa del agua, degradación del agua), asociadas con el ingreso de sedimentos, nutrientes y otros contaminantes a través de la cuenca de los ríos Trabunco, Quitrahue y Calbuco, afluentes del Río Pocahullo.

7.2. Síntesis de medidas implementadas durante el segundo ciclo

7.2.1. La necesidad de integrar el ordenamiento territorial a nivel de una cuenca hidrográfica

Una de las mayores preocupaciones urbano-territoriales en el área andino-patagónica surge del sostenido crecimiento de la población, y consecuentemente del incremento de la demanda de tierras para la urbanización y servicios, por una parte; y la necesidad de implementar políticas activas de sustentabilidad ambiental a escala de cuenca, por la otra. Este creciente dilema ha sido prácticamente una constante a lo largo de los últimos 40 años en todas las ciudades patagónicas, y San Martín de los Andes no ha sido una excepción.

El desafío de articular el desarrollo, satisfaciendo estas dos grandes demandas sociales, ha llevado a las sucesivas autoridades municipales a diseñar y aplicar una serie de instrumentos de gestión urbano-territorial cuyo objetivo ha sido mitigar los conflictos que se presentan a diario en la necesidad de compatibilizar el crecimiento económico, con base en una equidad social y una sustentabilidad ecológica. En este marco, la Municipalidad de San Martín de los Andes en el ámbito del SDL ha decidido preparar una nueva zonificación del sector de la Vega Plana o de Maipú y las laderas de la cuenca alta del arroyo Calbuco a fin de llevar a cabo una gestión desde una perspectiva integral apoyada en el enfoque ecohidrológico.

Una zonificación implica la subdivisión del territorio en sectores o áreas más o menos homogéneas que presentan similares características ambientales, y como consecuencia de ello, asignarse usos o actividades con objetivos de manejo específicos. El grado de homogeneidad de cada unidad o zona así determinada depende de la escala de análisis y de las características propias del territorio. Las zonificaciones ambientales finalmente se presentan en forma de mapas temáticos que se convierten en instrumentos de apoyo a la sistematización, el ordenamiento y la optimización del uso del territorio, permitiendo una gestión ambiental (Gaviño Novillo *et al.*, 2005). En particular, las zonificaciones hidro-ambientales basadas en un enfoque ecohidrológico permiten resumir de una forma sencilla las potencialidades y las limitaciones que presentan las diferentes zonas de una cuenca respecto a la disponibilidad, el uso y la preservación de la calidad de los recursos hídricos y los recursos naturales asociados. En esos mapas, se sale del marco tradicional de la delimitación de cuencas para llegar a un ordenamiento sistemático no solo de los recursos hídricos, sino también de todos los elementos físicos que determinan la calidad y la cantidad de estos (geomorfología, vegetación, suelos, clima, nutrientes, otros).

Y si bien existen innumerables experiencias en materia de zonificación ambiental, no son tantas aquellas que han sido desarrolladas para la zonificación en base al enfoque ecohidrológico que incorpora conceptos hidrológicos, ecológicos y ambientales en el diseño de las estrategias de gestión del agua en su relación con los demás recursos naturales. Por ello en el segundo ciclo del proyecto SDL se llevó a cabo una zonificación de carácter hidroambiental del área de la Vega de Maipú basada en los principios de la ecohidrología a partir de un análisis de la capacidad de carga de manera de brindar evidencia técnico-científica para la zonificación del área.

a) Elementos condicionantes de la dinámica hídrica

- **Relieve:** asociado al análisis de los diferentes aspectos que surgen de la interpretación de la topografía y la identificación de los sectores con diversa elevación en relación a la presencia temporal y permanente del agua. Ello ha sido posible a través de la elaboración de diversos modelos digitales del terreno a escala de la cuenca alta del arroyo Pocahullo, comprendiendo la zona de la Vega y los Faldeos.
- **Geomorfología y riesgos geomorfológicos:** asociado a la presencia de ciertas geoformas que guardan vinculación con la dinámica del paisaje. Este criterio permite diferenciar

áreas con distinto grado de dependencia en relación a la dinámica hídrica (pasada o actual) que en forma predominante ha modelado el paisaje regional. Este elemento tiene en cuenta a su vez las características de los suelos presentes en el área.

- **Peligro hídrico:** asociado a la probabilidad de ocurrencia de crecidas sobre la base del análisis de la cobertura de agua en imágenes satelitales de épocas secas y húmedas, comparando con la topografía y los registros hidrológicos. Este criterio permitió delimitar la zona de la Vega y los Faldeos que están sujetos a inundaciones y que en consecuencia deben ser sujetas a estrategias de tutela ecohidrológica.

b) Condicionantes ambientales

- **Cobertura:** resultante del análisis de la presencia de la vegetación y diversos usos del suelo en el área de la Vega mediante el análisis de fotos aéreas históricas combinadas con imágenes satelitarias para diversas épocas.
- **Infraestructura:** asociado a la disponibilidad de servicios de saneamiento, transporte, y construcciones relevantes presentes en el área, que determinan la potencialidad, limitaciones o restricciones en el área. Este criterio permite identificar aquellos sectores con limitaciones y posibilidades para un uso urbano-ambiental.
- **Patrimonio:** asociado a la presencia de la vegetación y la fauna en tanto un patrimonio natural en el área, complementariamente al patrimonio cultural a preservar. Este criterio permitió diferenciar aquellos sectores con mayor valor para la tutela por sus cualidades ecohidrológicas o culturales.

La integración de estos criterios permitió elaborar una serie de mapas específicos para el área del humedal de la cuenca del Río Calbuco denominado La Vega que identifica los sectores con limitaciones y posibilidades para un uso urbano. Los criterios de zonificación tienen una estructura jerárquica por lo que su importancia relativa cambió a medida que se procedió a la elaboración de la zonificación y la delimitación de las áreas. Por otro lado, se diferenciaron los rasgos del ambiente natural que están relacionados funcionalmente entre sí, debido a la interrelación o interdependencia existente entre topografía, geomorfología, riesgo hídrico, tipo de suelo y tipo de vegetación. Por esta razón, la delimitación de las unidades o zonas aplicando estos criterios ponen en evidencia una cierta unicidad funcional que posibilita la **asignación de objetivos de manejo a las mismas**. Esto es así a pesar de que algunas zonas muestran cierto grado de heterogeneidad debido a la naturaleza del patrón de variación espacial de las características naturales y la escala de trabajo adoptada tanto en el área de la Vega como en los Faldeos.

7.2.2. Delimitación de las unidades hidro-ambientales

La delimitación de las unidades hidro-ambientales fue posible mediante la preparación previa de una serie de mapas temáticos de variables, indicadores e índices ambientales especializados en el territorio. La base de la información a escala de la Cuenca fue de 1:50.000 tomando como base la topografía publicada por el IGN, complementada con mapas elaborados específicamente para la zona de la Vega en otras escalas. Ello se complementó con información satelitaria del proyecto SRTM, e información provista por sensores remotos combinada con un mosaico de las fotos aéreas con que cuenta la Municipalidad.

La superposición o combinación de los mapas temáticos se llevó a cabo a partir del desarrollo de un modelo sencillo implementado en un Sistema de Información Geográfico. Los mapas fueron llevados a formato "ráster" con un valor de tamaño del píxel compatible con una resolución de 15 y 30 m respondiendo a la resolución espectral de las imágenes LANDSAT empleadas. Las categorías de cada capa temática fueron reagrupadas (reclasificadas) teniendo en cuenta la posición topográfica y la dinámica hídrica de la cuenca alta del arroyo Pocahullo.

Las clases resultantes de cada mapa reclasificado han sido combinadas entre sí, definiendo nuevas categorías a partir de las cuales finalmente se definen las zonas hidro-ambientales. Siguiendo la estrategia y los criterios definidos, el modo de combinar los mapas sigue un esquema jerárquico, donde en primer lugar se definió el sector de la Vega y aquel que está fuera de ella. Dentro del área en análisis se hizo un detenido análisis de la cobertura del suelo, identificando los sectores con pastizales y bosques inundables y los sectores que no están sujetos a riesgo de inundación.

Para apoyar esta tarea se consideraron dos importantes antecedentes: por una parte el trabajo desarrollado para la elaboración del Mapa Geomorfológico y de Peligrosidad, así como un relevamiento de campo expreso llevado a cabo en el marco de estos estudios por parte de la Secretaría de Planificación y Desarrollo Sustentable del Municipio. Incluyó la demarcación de las áreas no inundables en base a un trabajo de detalle sobre el terreno, empleando mediciones topográficas y complementadas con referenciación mediante puntos GPS diferencial.

7.2.3. Objetivos de manejo

Si bien los objetivos de manejo específicos finales formaron parte del texto del instrumento normativo, en el marco del trabajo se propusieron diversas Zonas de Aptitud Urbano-Ambiental (ZAUA), en función de las características de los distintos ambientes presentes en el Valle del Arroyo Calbuco (Vega). Los objetivos considerados y las características de cada uno son los siguientes:

- **Tutela ecohidrológica:** Aquellos sectores inundables o que han sufrido poca alteración que incluyen ecosistemas relevantes o frágiles, y requieren un cuidado especial para asegurar el funcionamiento del ecosistema, la conservación de la biodiversidad regional y el mantenimiento de los procesos naturales, particularmente la dinámica hídrica. Son áreas importantes por ser sitios de anidación; zonas críticas de alimentación y/o descanso de aves o refugio de fauna silvestre. Corresponde a zonas en las que se propuso mantener el ambiente en su estado natural, o no seguir deteriorándolo, limitando el grado de intervención de las actividades humanas. Son compatibles con usos no consuntivos tales como la investigación, el monitoreo, la educación ambiental, las visitas supervisadas por guías certificados y un ecoturismo controlado.
- **Aprovechamiento sustentable:** Sectores que son y han sido aprovechados de manera continua en los cuales se desarrollan actividades productivas de baja intensidad, para lo cual deberán contar con instrumentos de gestión ambiental debidamente aprobados. En estas zonas se podrá permitir la continuidad de las actividades productivas de bajo impacto. Asimismo, se buscará generar en ellas modelos de desarrollo y de utilización del territorio y los recursos naturales de manera compatible con los objetivos de conservación del área, sirviendo de base a otros sectores de la cuenca para su replicabilidad.
- **Uso urbano:** Sectores con bajas restricciones ambientales para la urbanización que permiten satisfacer cierto nivel de demanda urbana, promoviendo un mayor desarrollo económico y social sin deteriorar el ambiente ni causar impactos irreversibles en los elementos naturales que la conforman. Esas áreas, complementariamente, albergan los sistemas de transporte e infraestructura en general, o aquellos en los cuales se instalen actividades económicas de baja intensidad.
- **Recuperación:** Sectores que por diversas causas presentan una situación de degradación por lo cual es necesario implementar estrategias de recuperación buscado el cambio de categoría a alguna de las anteriormente descritas (recuperación de mallines, sectores contaminados, otros).

Estos objetivos de manejo han servido de base para la elaboración del Mapa de Aptitud Urbano-Ambiental en el cual cada zona se corresponde con uno de los objetivos de manejo delineados.

7.2.4. Mapa de unidades ambientales de la Vega Plana

Para su elaboración, la información de base correspondió a la Imagen Landsat 7 ETM 232-88 (7 bandas- *merge* banda 8) con fecha del 08-12-2001 y una resolución espacial de 15 m. (Fuente: SIAN). En primer lugar se realizó un análisis visual (RGB 453, falso color; RGB 321, color real) permitiendo identificar de manera preliminar los rasgos principales de las unidades que conforman el mapa. Posteriormente se realizó un análisis digital por medio de una *clasificación no supervisada* (ISODATA) en función de las 7 bandas permitiendo la discriminación y separación de las unidades. Para complementar el análisis digital se realizó también una clasificación a través del Índice Normalizado de Vegetación (NDVI) que se contrastó con la clasificación ISODATA. Esto permitió unificar y reclasificar las clases resultantes en unidades homogéneas. Se partió de una base de 20 clases para permitir la máxima discriminación posible. Mediante la unificación y reclasificación se redujeron a 7 clases que sirvieron de base para la preparación del Mapa de Unidades Ambientales (ver Figura 14).

Dicho mapa representa fundamentalmente la cobertura del suelo, combinando en cada unidad cartográfica elementos de la vegetación, el suelo y el agua. En general se trata de un área con una cobertura vegetal importante, razón por la cual este es el elemento dominante que define las unidades cartográficas, aunque en alguna unidad cobra cierta importancia el agua. Como resultado del trabajo se obtuvieron 7 clases que podrían agruparse de la siguiente manera:

- Suelo mineral, ripio, construcciones: clase 3
- Suelos con escasa cobertura vegetal: Clases 6 y 2
- Suelos con abundante cobertura vegetal, herbácea, arbustiva y arbórea: clases 4, 5 y 7. Las diferencias entre estas clases podrían deberse a la densidad de la cobertura así como a las especies presentes y al vigor de la vegetación.
- Áreas con presencia de agua: clase 1.

Figura 14. Mapa de unidades ambientales de la Vega Plana



Fuente: Gaviño Novillo, 2010.

7.2.5. Determinación de cuerpos de agua y humedales: condicionantes hídricos

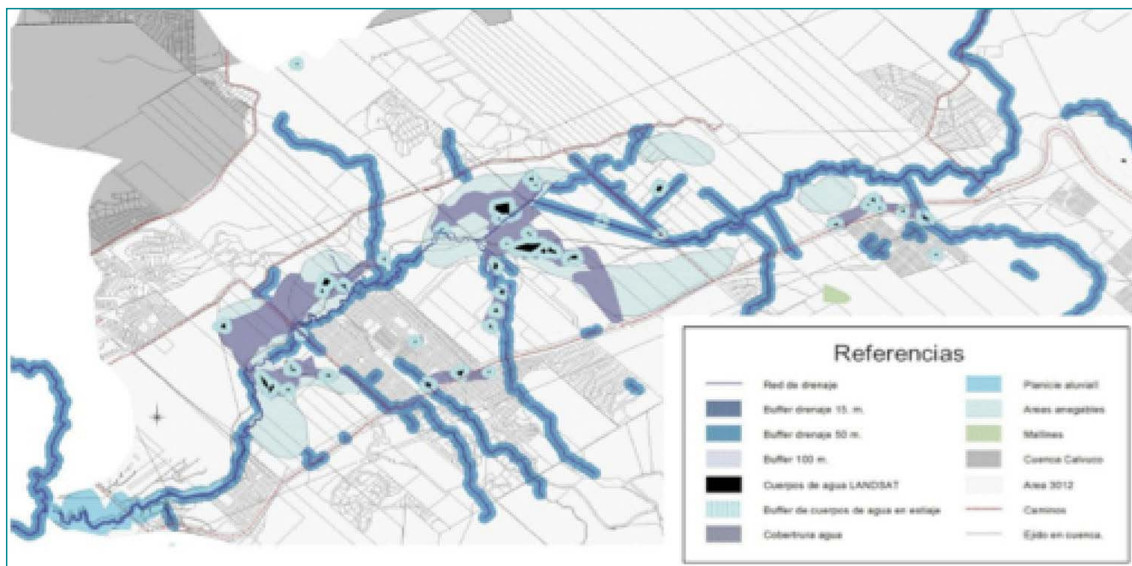
Para esta tarea se usó como información de base la Imagen Landsat 7 ETM 232-88 (7 bandas-merge banda 8) del 08-12-2001, con resolución espacial de 15 m (Fuente: SIAN) y la imagen Landsat 5 TM 232-88 (5 bandas) de fecha: 09-02-1987 con una resolución espacial de 30 m (Fuente: Universidad de Maryland).

El objetivo de esta capa de información fue identificar cuerpos de agua permanentes o semipermanentes en el área de la Vega, para lo cual se aplicó el modelo *Watermask cover* de ERDAS. Este modelo clasifica la imagen en 256 clases de las cuales las primeras 50 corresponden a cuerpos de agua; las clases 51 a 75 a suelo húmedo y las restantes a suelo firme. Este procedimiento se realizó en las dos imágenes precitadas para captar la máxima presencia de cuerpos de agua. Las capas resultantes se combinaron para obtener en una sola todos los cuerpos de agua presentes en ambas fechas. Luego se aplicó un buffer alrededor de los mismos para delimitar el área de expansión en épocas húmedas a partir de lo cual se definieron áreas de tutela ecohidrológica. El buffer se determinó con diversas distancias (100 m, 50 m, 15 m siempre desde el borde de cada uno de los cuerpos de agua).

Por último, se digitalizaron varios polígonos envolviendo a los cuerpos de agua adyacentes para generar sectores en los cuales existe riesgo de inundación o presencia de agua en algún momento del año. Se complementó con información resultante del levantamiento en campo descripto precedentemente

Para la verificación de este condicionante se elaboró un mosaico con las fotos aéreas del área de la Vega a fin de identificar sectores inundables. Complementariamente se hizo una sistematización de fotografías actuales e históricas que muestran de manera oblicua los sectores que alguna vez han estado sometidos a la presencia del agua o que podrían estarlo. Finalmente elaboró el Mapa de Condicionantes Hídricos (ver Figura 15).

Figura 15. Mapa de condicionantes hídricos



Fuente: Gaviño Novillo, 2010.

7.2.6. Elaboración del mapa de Zonas de Aptitud Urbano-Ambiental

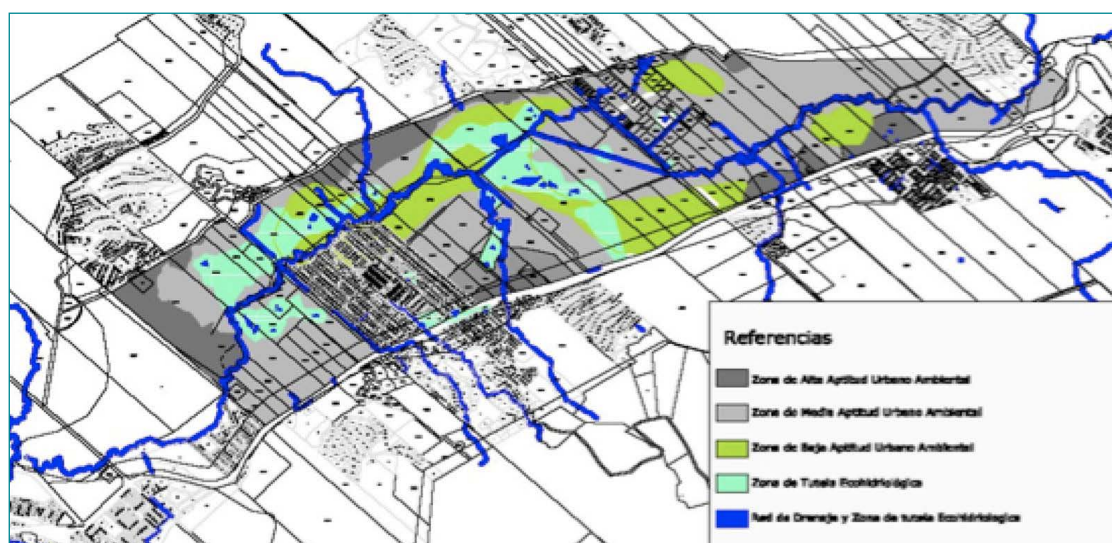
Como resultado de la integración de los diversos condicionantes se procedió a efectuar una integración de los resultados parciales verificados a campo. Para ello se empleó el Sistema de Información Geográfica determinando las diversas zonas de manejo. El mapa muestra las

limitaciones y el potencial que posee el sistema ambiental como resultado del análisis de sus características intrínsecas y aquellas impuestas predominantemente por la dinámica hídrica debido a su inundabilidad. En base a este mapa y como resultado de un Taller Experto se procedió a delimitar en borrador las Zonas de Aptitud Urbano-Ambiental para la Vega Plana y elaborar el mapa respectivo (ver Figura 16). Para ello se tuvieron en cuenta dos criterios relevantes: *la importancia urbana y la sensibilidad ambiental resultante del Mapa Hidroambiental*. De esta manera se definieron las zonas considerando de manera indisoluble el potencial de desarrollo urbano condicionado por limitaciones ambientales intrínsecas e inundabilidad sintetizadas en el Mapa Hidro-Ambiental elaborado desde un enfoque ecohidrológico.

El mapa finalmente es la base del instrumento normativo que tiene múltiples indicaciones para su uso, que cuenta en calidad de Anexo con un Manual de Buenas Prácticas Ecohidrológicas de carácter vinculante y obligatorio para implementar entre otros el principio hidrológico nulo que obliga a una compensación hídrica como resultado de los mínimos cambios en la impermeabilización de los suelos debido a construcción de viviendas y caminos.

Las Zonas de Aptitud Urbano-Ambiental fueron aprobadas localmente por unanimidad en el año 2009 constituyendo una Ordenanza de uso obligatorio que sigue manteniendo su vigencia 15 años después de la tarea realizada con mínimos ajustes a lo largo del tiempo, contando con un monitoreo territorial de cumplimiento mediante un seguimiento con imágenes satelitarias apoyado con drones.

Figura 16. Mapa de Zonas de Aptitud Urbano-Ambiental elaborado en base a los mapas hidro-ambientales vigentes desde el año 2009 hasta la fecha



Fuente: Gaviño Novillo, Municipalidad de San Martín de los Andes, 2010.

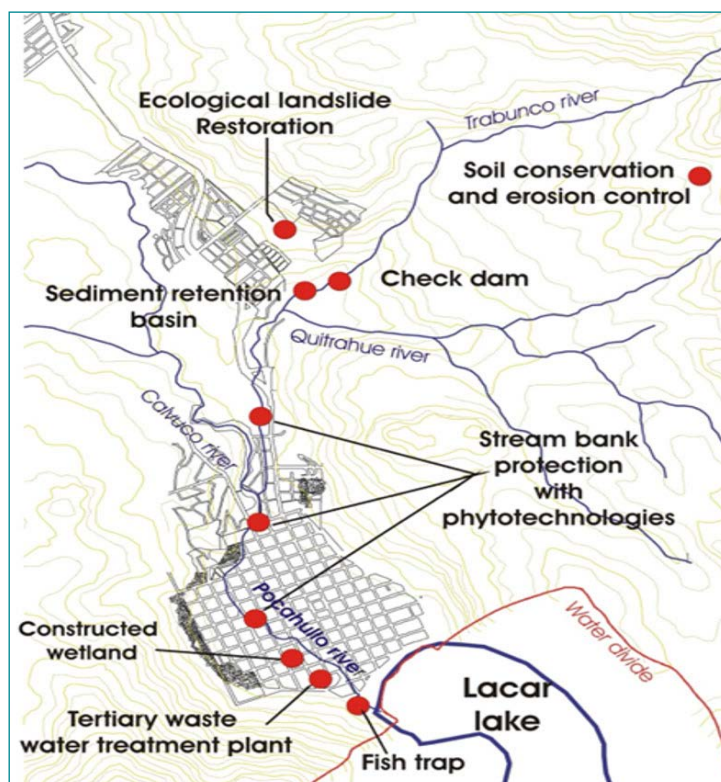
8. Lecciones aprendidas

Como se citara previamente, el principal problema del SDL, así como en muchas otras partes del mundo, es el impacto de la transformación del uso del suelo sobre la calidad del agua y los servicios ecosistémicos (DNRH-MSA, 1994; Gaviño Novillo, Castañeda, 1995; Gaviño Novillo, 2001; Baron *et al.*, 2003; Sarandon *et al.*, 2006). El aumento de la densidad poblacional, el desarrollo urbano sin una planificación a largo plazo, y la construcción de infraestructura para las actividades y servicios turísticos durante los últimos 30 años, son los principales factores que gobiernan el cambio en el uso del suelo y el paisaje en el SDL.

Las estrategias de manejo y los proyectos de intervención implementados en el SDL para el control de la erosión, deslizamientos de suelo y restauración del río han utilizado un enfoque innovador basado en la ecohidrología (utilizando vegetación nativa, materiales locales y tecnologías de bajo costo). En el Punto 7.1 se han mostrado las principales intervenciones implementadas con el objetivo de reducir los riesgos naturales y geohidrológicos a través del control de los detritos leñosos en los ríos (por medio de presas selectivas para grandes rocas y restos leñosos), la restauración de deslizamientos de ladera, el control de la carga de sedimentos y la erosión por medio de trampas de sedimentos y el manejo de la vegetación y la captura de nutrientes a través de la restauración de las márgenes del río (ecotonos). Los beneficios ambientales incluyen mejoras en la seguridad contra riesgos naturales, mejoras en la calidad del agua, promoción de los valores estéticos del paisaje y la conservación de la biodiversidad según el modelo conceptual propuesto. Estas medidas son complementarias a las plantas de tratamiento de las aguas servidas existentes y en implementación a fin de reducir la carga de la materia orgánica y nutrientes hacia el lago Lácar. Más aún, estos beneficios ambientales han sido complementarios de otros beneficios socioeconómicos relacionados con las actividades turísticas, el empleo y el desarrollo económico (ver Figura 17).

Similares estrategias y enfoques pueden ser aplicadas en otras áreas de la Ecorregión Andino Patagónica, desde Villa la Angostura (Provincia de Neuquén), y San Carlos de Bariloche (Provincia de Río Negro) en el norte de la Patagonia hasta El Calafate (Provincia de Santa Cruz) y la zona de bosques de Tierra del Fuego, en la porción más austral del Cono Sur (Sarandon *et al.*, 2006; Di Pace, 1992; Bathurst *et al.*, 2008). Esta ecorregión comparte tanto sus rasgos naturales (áreas montañosas, modelada por procesos glaciarios de la era cuaternaria, un paisaje heterogéneo cubierto de bosques estacionales, lagos y ríos), y el desarrollo de procesos de transformación del paisaje relacionados con un rápido aumento demográfico (mayormente por inmigración), expansión urbana, deforestación para la construcción de infraestructura (caminos, edificios, servicios públicos) y una importante actividad de turismo estacional.

Figura 17. Síntesis de medidas implementadas durante el primer ciclo



Fuente: Gaviño Novillo, 2010.

Cabe señalar finalmente que en los últimos 30 años de investigación e implementación del SDL se han aprendido varias lecciones, siendo las más importantes:

- La implementación de nuevas tecnologías en el campo requiere la comprensión previa y la adquisición del enfoque que sustentan las estrategias (fundamento teórico) por parte de los investigadores y autoridades locales.
- El involucramiento de los actores locales (*stakeholders*) tiene que ser planificado desde el inicio de las actividades de investigación debido a se necesita tiempo para la comprensión e internalización de nuevos métodos de gestión del territorio.
- Las autoridades locales deben ser parte del proceso de desarrollo a fin de ajustar los resultados de las investigaciones a las condiciones locales y el convencimiento frente a la evidencia resultante del efecto demostrativo de las medidas ecohidrológicas.
- Una experiencia es exitosa si **ha sido ejecutada con las autoridades y actores locales quienes deben apropiarse de los beneficios.**
- La incorporación de los aspectos sociales tiene que ser hecho a través del desarrollo de actividades específicas de difusión y concienciación a partir de la activa participación y liderazgo de los actores locales (*stakeholders*).

El SDL muestra que el mayor desafío que enfrenta la aplicación de la ecohidrología a situaciones reales está en definir la forma y oportunidad de transferir la información y el conocimientos desde las instituciones académicas a los actores y autoridades locales (*stakeholders*). Debe ensayarse un formato o esquema adecuado a los tomadores de decisión. Una buena comunicación y colaboración en el trabajo de campo, con desarrollo de seminarios y actividades educativas, es un buen punto de partida para una mejor interacción. La percepción ambiental de las comunidades y decisores locales es esencial para la implementación exitosa de las medidas concretas desde un enfoque ecohidrológico en el mundo real para ser efectivamente demostrativas.

Referencias bibliográficas

- ACC/ISGWR (1992). The Dublin Statement and Report of the Conference. International Conference of Water and the Environment. Development issues for 21 st century. 26-31 January 1992. Dublin.
- Baron, J. S.; LeRoy Poff, N.; Angermeier, P. L.; Dahm, C. N.; Gleick, P. H.; Hairston, N. G. Jr.; Jackson, R. B.; Johnston, C. A.; Richter, B. D.; Steinman, A. D. (2003). Sustaining Healthy Freshwater Ecosystems. *Issues in Ecology* 10; Ecological Society of America, Washington, 18 pp.
- Bathurst, J. C.; Amezaga, J.; Cisneros, F.; Gaviño Novillo, M.; Iroumé, A.; Lenzi, M. A.; Mintegui Aguirre, J.; Miranda, M.; Urciuolo, A. (2008). Forests and Floods in Latin America: Science, Management and the Epic Force Project. EPIC FORCE (Evidence-based Policy for Integrated Control of Forested River Catchments in Extreme Rainfall and Snowmelt). INCO-CT2004-510739. <http://www.ceg.ncl.ac.uk/epicforce/>
- Brea, D.; Gaviño N. J. M.; Spalletti, P. (1999). Erosion risk assessment in a Southern Patagonian basin. International Symposium EROSLOPE, European Union, University of Padova.
- Burkart, R.; Bárbaro, N. O.; Sánchez, R. O.; Gómez, D. A. (1999). *Eco-regiones de la Argentina*, Secretaría de Recursos Naturales y Desarrollo Sustentable, Buenos Aires, 42 pp.
- Daily, G. C.; Alexander, S.; Ehrlich, P. R.; Goulder, L.; Lubchenco, J.; Matson, P.A.; Mooney, H. A.; Postel, S.; Schneider, S. H.; Tilman, D.; Woodwell, G. M. (1997). Ecosystem Services: Benefits Supplied to Human Societies by Natural Ecosystems. *Issues in Ecology* 2; Ecological Society of America, Washington, 18 pp.

Di Pace, M. (1992). Las Utopías del Medio Ambiente. Desarrollo Sustentable en la Argentina. Bibliotecas Universitarias. Centro Editor de América Latina. Buenos Aires. 42 pp.

Dirección Nacional de Gestión de los Recursos Hídricos - Laboratorio de Hidrología - DNRH-UNLP (1997). Estudio y caracterización de los recursos hídricos compartidos con la República de Chile. Convenio Secretaría de Obras Públicas y Comunicaciones del Ministerio de Economía y Obras Públicas de la Nación - Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata.

Dirección Nacional de Recursos Hídricos - Municipalidad de San Martín de Los Andes - DNRH-MSA (1994). Plan de ordenamiento de la cuenca de los arroyos Trabunco-Quitrahue. Diagnóstico preliminar. Convenio Secretaria de Obras Públicas y Comunicaciones de la Nación - Municipalidad de San Martín de los Andes. Primer documento, San Martín de los Andes.

Gaviño Novillo, J. M. (1995). Plan Director de las subcuencas de los arroyos Trabunco – Quitrahue Conclusiones del Taller. Informe de Avance IV. San Martín de los Andes. 3, 4 y 5, mayo, 1995.

Gaviño Novillo, J. M. (1996). La proyectación de planes de manejo de cuencas. Un caso en la República Argentina. Atti del Corso Sviluppo e Gestione dei Bacini Idrografici. Cuadernos IILA. Serie Cooperación n.º 6. Roma, 1996.

Gaviño Novillo, J. M. (1996). La proyectación de planes de manejo de cuencas. Un caso en la República Argentina. Atti del Corso Sviluppo e Gestione dei Bacini Idrografici. Cuadernos IILA. Serie Cooperación 1 6. Roma.

Gaviño Novillo, J. M. (2001). The use of eco-hydrology in a watershed management program in southern Patagonia, *Ecohydrology & Hydrobiology*, 2, 105-112.

Gaviño Novillo, J. M. (2003). The complexity of participation in watershed management, UNEP International Conference on Integrated Watershed Management, 3 World Water Forum, Kyoto, Japan.

Gaviño Novillo, J. M.; Castañeda, S. (1995). Plan director de las subcuencas de los arroyos Trabunco - Quitrahue. IV Jornadas Forestales Patagónicas. San Martín de los Andes, 24 al 27 de octubre.

Gaviño Novillo, J. M.; Cielli, P. (1997). Land Information System for lake management in shared water resources between Argentina and Chile, 7.º International Conference on Lakes Management, ILEC, San Martin de los Andes, October.

Ministerio de Economía (1996). Estudio y Caracterización de los Recursos Hídricos Compartidos con la República de Chile. Convenio Dirección Nacional de Recursos Hídricos-Laboratorio de Hidrología. UNLP. 10 Etapa. Buenos Aires.

Ministerio de Economía (1997). Estudio y Caracterización de los Recursos Hídricos Compartidos con la República de Chile. Informe de Avance. Convenio Dirección Nacional de Gestión de los Recursos Hídricos-Laboratorio de Hidrología. UNLP. 20 Etapa. Buenos Aires.

Muschong, D, Sarandón, R.; Gaviño Novillo, J. M. (2007). Cambios en el uso del suelo en dos subcuencas de la Ecorregión de los Andes Patagónicos – provincia de Neuquén, R. Argentina. Sixth National University Scholars Meeting (VI Expouniversidad), La Plata, R. Argentina.

Muschong, D. (2006). Elaboración de un sistema espacializado soporte para las decisiones para la cuenca del Trabunco-Quitrahue (Neuquén, R. Argentina). In: Sarandon *et al.*, Unesco-PHI. Part B: 15 pp.

Muschong, D.; Guerrero Borges, V.; Sarandon, R. (2006). Evaluación ecológica de escenarios de conservación en la cuenca del Trabunco-Quitrahue, provincia de Neuquén, R. Argentina. Resúmenes de la Reunión Argentina de Ecología, Mendoza.

Muschong, D.; Sarandón, R. (2006). La cuenca de los arroyos Trabunco-Quitrahue: Evaluación ambiental regional. In: Sarandon *et al.*, UNESCO-PHI. Part B: 14 pp.

Muschong, D.; Sarandon, R. (2007). Análisis de los cambios en el uso del suelo de las cuencas de los Arroyos Trabunco-Quitrahue entre 1987 y 2001. XII Congress of Spanish Teledetection Association. Mar del Plata.

Muschong, D.; Sarandon, R.; Gaviño Novillo, J. M. (2005). Evaluación ambiental regional aplicada a unidades de manejo del territorio. Third International Conference on "Interdisciplinary approach for Regional Planning (CIFOT-FFyL, UNC). Mendoza.

Sarandon, R.; Gaviño Novillo, J. M.; Muschong, D. (2006). Integrated Management of the Lacar Lake Watershed Lacar Lake Demonstration Project UNESCO Program - PHI of Ecohydrology.

Sarandon, R.; J. M. Gaviño N.; D. Muschong; V. Guerrero Borges (2009). Lacar Lake Demonstration Project for Ecohydrology: Improving land use policy at Lacar Lake Watershed based on an Ecohydrological approach (San Martín de Los Andes – Neuquén – R. Argentina). Ecohydrology and Hydrobiology.

Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación (SSRH) (1995). Catálogo de Lagos y Embalses de la Argentina. Buenos Aires.

Universidad Nacional del Comahue (UNC) (1995). Mapa de suelos. Cuenca Trabunco-Quitrahue. Convenio con UNC - AUSMA y Municipalidad de San Martín de los Andes - Dirección Nacional de Recursos Hídricos.

Universidad Nacional del Comahue (UNC) (2006a). Análisis del agua de los Arroyos Quitrahue y Trabunco (San Martín de los Andes, Pcia. del Neuquén, R. Argentina). Universidad Nacional del Comahue (CRUB – GECAyRA; May/06), p. 9.

Universidad Nacional del Comahue (UNC) (2006b). Estado trófico actual del Lago Lacar y el Arroyo Pocahullo y sus principales afluentes (San Martín de los Andes, Pcia. del Neuquén). Universidad Nacional del Comahue (CRUB – GECAyRA; October/06), p. 23.

VAN DAM, J. C. (1993). Summary, conclusions and recomendations. Proceedings: Transboundary river basin management and sustainable development. Technical Documents in Hydrology. UNESCO. IHP. Paris.

Zalewski, M. (2000). Ecohydrology-the scientific background to use ecosystem properties as management tools toward sustainability of water resources. Guest Editorial, Ecological Engineering 16, 1-8.

Zalewski, M.; Janauer, G. A.; Jolankai, G. (eds.) (1997). Ecohydrology: A new paradigm for the sustainable use of aquatic resources. International Hydrological Programme UNESCO, Paris, Technical Document in Hydrology.

Capítulo 4

Sitio demostrativo de ecohidrología

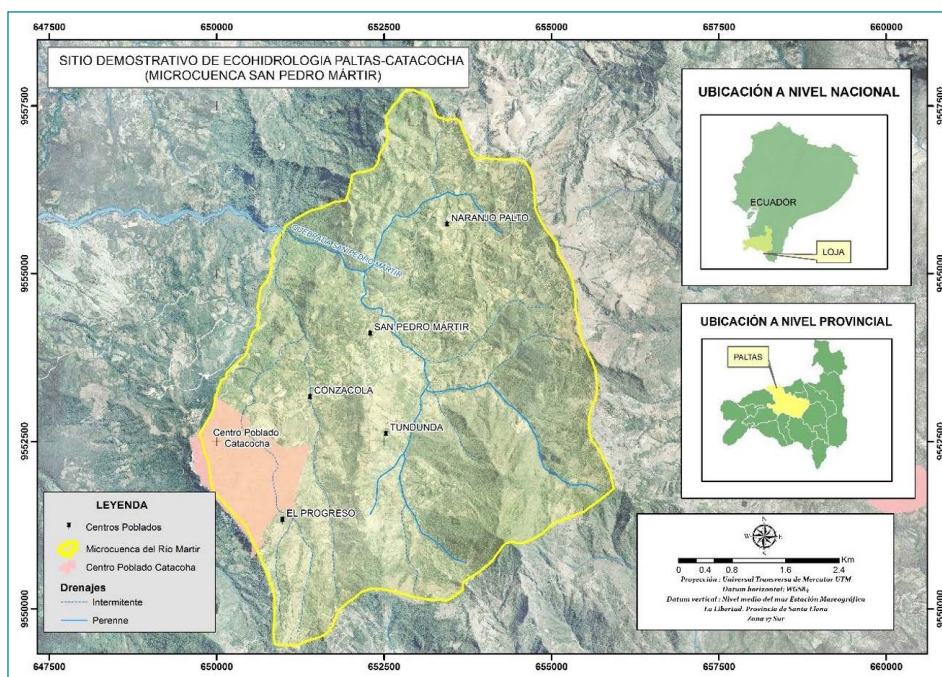
Paltas - Catacocha, Ecuador

Marco Albarracín ⁽¹⁾, Galo Ramón ⁽²⁾, Jorge Gonzalez ⁽¹⁾, Jorge Celi ⁽³⁾, José Romero ⁽⁴⁾, Fabián Rodas ⁽⁴⁾, Carlos Iñiguez Armijos ⁽⁵⁾.

1. Ubicación del Sitio Demostrativo

El Sitio Demostrativo de Ecohidrología Paltas Catacocha se encuentra en la microcuenca de la quebrada San Pedro Mártir (en adelante, MQSPM) localizada en el cantón Paltas, provincia de Loja, al sur del Ecuador, en las coordenadas UTM 9550190 N y 652618 E (Figura 1). Tiene una superficie total de 31,48 km² y un rango altitudinal que oscila entre 1320 y 2413 m s.n.m.

Figura 1 Microcuenca de la quebrada San Pedro Mártir



Fuente: Elaboración propia a partir de información de IGM y GAD Cantonal.

El punto más alto de la microcuenca corresponde al cerro Pisaca y en sus faldas se encuentran la laguna y reserva del mismo nombre. La laguna Pisaca es un humedal artificial que originalmente fue construido por la cultura preincaica de los paltas con la finalidad de recargar los acuíferos mediante la captación de agua lluvia. Lamentablemente, durante la colonia española el humedal fue drenado y usado para actividades agrícolas y ganaderas. Sin embargo, en el año 2005 se

(1) Universidad Politécnica Salesiana, Quito (UPS), (2) COMUNIDEC, (3) Grupo de Investigación de Recursos Hídricos y Acuáticos y Cátedra Unesco en Manejo de Aguas Dulces Tropicales, Universidad Regional Amazónica Ikiam, (4) Corporación Naturaleza y Cultura Internacional (NCI), (5) Laboratorio de Ecología Tropical y Servicios Ecosistémicos (EcoSs-Lab) Universidad Técnica Particular de Loja (UTPL).

inició el proceso de restauración por el Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Paltas (GADMP) con apoyo de la Fundación de Desarrollo Local COMUNIDEC y la sociedad civil. A partir del 2010, la Corporación Naturaleza y Cultura Internacional (NCI) inició un programa de restauración y protección de la Reserva Pisaca en conjunto con la Asociación de Producción Agropecuaria Pisaca (ASOAGROPISA), la Unidad Educativa Maristas y el GAD Municipal.

La microcuenca de la quebrada San Pedro Mártir se encuentra ubicada dentro de uno de los sitios de mayor reconocimiento mundial por su importancia biológica y prioridad de conservación, siendo una de las áreas núcleo dentro de la Reserva de Biósfera Transfronteriza Bosques de Paz. Esta reserva de biósfera fue reconocida por el Programa Hombre y Biósfera (MAB) de la UNESCO en 2017 y es un esfuerzo conjunto entre Ecuador y Perú para la conservación de los recursos naturales. Busca ser un modelo de gestión participativa y ciudadana para fortalecer la paz, la sostenibilidad y la conectividad ecológica entre ambos países.

Por una suma de factores, entre los que se incluyen el cambio climático, la desertificación, la mala gestión de los recursos hídricos, y sobre todo la desecación de humedales en la parte alta de la cuenca, la ciudad de Catacocha llegó a tener una crisis de abastecimiento de agua para consumo humano en 2001. Así fue como la distribución de agua se limitó a tan solo una hora por día (Albarracín *et al.*, 2018; GAD Paltas, 2017).

En la actualidad la microcuenca provee el 70 % del agua cruda usada para el abastecimiento de agua potable de la ciudad de Catacocha. La construcción de humedales que recargan los acuíferos de la microcuenca y la reforestación y restauración natural de las áreas aledañas a los humedales han permitido que, mediante la extracción de agua de pozos profundos, el municipio pueda revertir la crisis y proveer de 6 horas de agua por día durante la época seca del año (GAD Paltas, 2017). A esto se suma, una mayor disponibilidad de agua para actividades agrícolas y ganaderas.

2. Organización formal a cargo del Sitio Demostrativo

Varias organizaciones locales fomentan la investigación, el cuidado y la gestión de la microcuenca. Sin embargo, para la representación dentro del sitio demostrativo de ecohidrología, el GADMP ha firmado convenios de cooperación con la Universidad Técnica Particular de Loja (UTPL) y NCI. Estos convenios tienen como objetivo el fortalecimiento del sitio demostrativo mediante la investigación científica y el desarrollo de capacidades en temas relacionados a la Ecohidrología. A la par, estas instituciones colaboran con la Cátedra Unesco de Aguas Dulces Tropicales (CUMADT), el Laboratorio Nacional de Referencia del Agua (LNRA) y el Grupo de Investigación de Recursos Hídricos y Acuáticos (GIRHA) de la Universidad Regional Amazónica Ikiam (URAI). En la actualidad, la Universidad Politécnica Salesiana y su maestría en Recursos Hídricos, así como la Fundación Ecohidrológica son nuevos actores que se están involucrando al apoyo y trabajo en el sitio demostrativo.

3. Características generales

3.1. Principio hidrológico

Hidrografía y características morfométricas de la microcuenca

La MQSPM es parte de la subcuenca del Río Playas, el cual a su vez desemboca en el Río Catamayo, que forma parte de la cuenca Binacional Catamayo - Chira. La microcuenca tiene una extensión de 31,48 km², un perímetro de 23,57 km y un cauce principal de 3,25 km de longitud desde la Laguna Pisaca hasta la parte baja de la microcuenca. Su dirección va de oriente a occidente y existen varios cursos de agua que alimentan el cauce principal. La pendiente media de la cuenca está alrededor del 12 % y no presenta riesgo de inundaciones por crecidas.

Red meteorológica de la microcuenca

Dentro de la microcuenca no se han instalado aún estaciones meteorológicas que permitan un análisis preciso del comportamiento hidrológico de la misma; empero, para fines de entender la hidrología de la zona se utilizó la información publicada por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) en estaciones meteorológicas próximas al área de influencia de la microcuenca. Así, con el fin de evaluar las variables climatológicas de la zona, se utilizaron las estaciones descritas en la Tabla 1.

Tabla 1. Estaciones meteorológicas utilizadas para describir la hidrología de la microcuenca de la quebrada San Pedro Mártir

Estación	Tipo	Código	Coordenadas geográficas		Altitud	Rango de años	Institución encargada
			Latitud	Longitud	m s.n.m.		
Lauro Guerrero	PV	M0760	3° 58' 5" S	79° 45' 31" W	1945	1990-2015	INAMHI
Catacocha	PV	M0433	4° 23' 59" S	79° 28' 18" W	1180	1990-2015	INAMHI

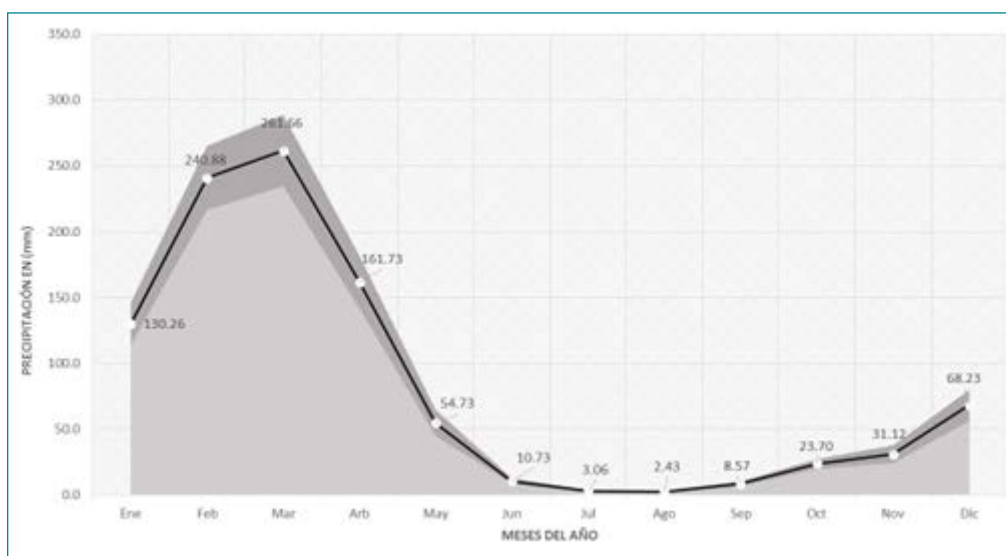
Nota: Para completar datos faltantes se utilizó los métodos de la media aritmética y el método U. S. National Weather Service.

Fuente: Elaboración propia a partir de información del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI)-Anuarios Meteorológicos 1990-2015.

Precipitación y factores que inciden en el clima

En el Ecuador el clima en el sur del país es muy diferente a la parte norte. El aspecto más peculiar del clima de la provincia de Loja, y que lo hace diferente al resto del país, está supeditado al relieve heterogéneo de esta sección de la cadena montañosa de los Andes y la ausencia de la Cordillera Occidental (OEA, 1994). A esto se suma el fenómeno de la desertificación que avanza desde el sur del continente y que es originado por la influencia de las corrientes marinas del Pacífico, en particular la corriente fría de Humbolt. El factor orográfico conformado por un relieve que desciende de este a oeste, con una gradiente general del 2,4 %, ha contribuido a que en la provincia de Loja se forme una microzona de convergencia, perpendicular a la Zona de Convergencia Inter Tropical (ZCIT). En esta microzona los vientos marinos del oeste tocan la cumbre de la Cordillera Real y los vientos Alisios del este sobrepujan en el centro de la provincia, configurando una situación de "Sahel", es decir de transición entre la zona montañosa de los Andes meridionales del Ecuador y el desierto de Sechura de Perú. Esta situación da como resultado que el régimen de lluvias sea de tipo unimodal, con un solo pico de lluvias en los primeros meses del año (ver Figura 2). Este comportamiento de precipitaciones es evidente hacia el sector occidental bajo, y paulatinamente tiende a homogeneizarse a medida que se asciende y avanza hacia el oriente (OEA, 1994).

Figura 2. Precipitación promedio mensual (mm) en las estaciones cercanas a la microcuenca de la quebrada San Pedro Mártir



Nota: Para obtener los datos se utilizó el método de National Weather Service. Período de Datos: 1990-2015.

Fuente: Elaboración propia a partir de información del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INHAMI), www.serviciometeorologico.gob.ec

Según el régimen pluviométrico en la provincia de Loja presentado por Plan Hidráulico de Loja (1994), la MQSPM se encuentra en el Tipo Régimen II: lluvia de diciembre a mayo, con un solo pico de precipitación.

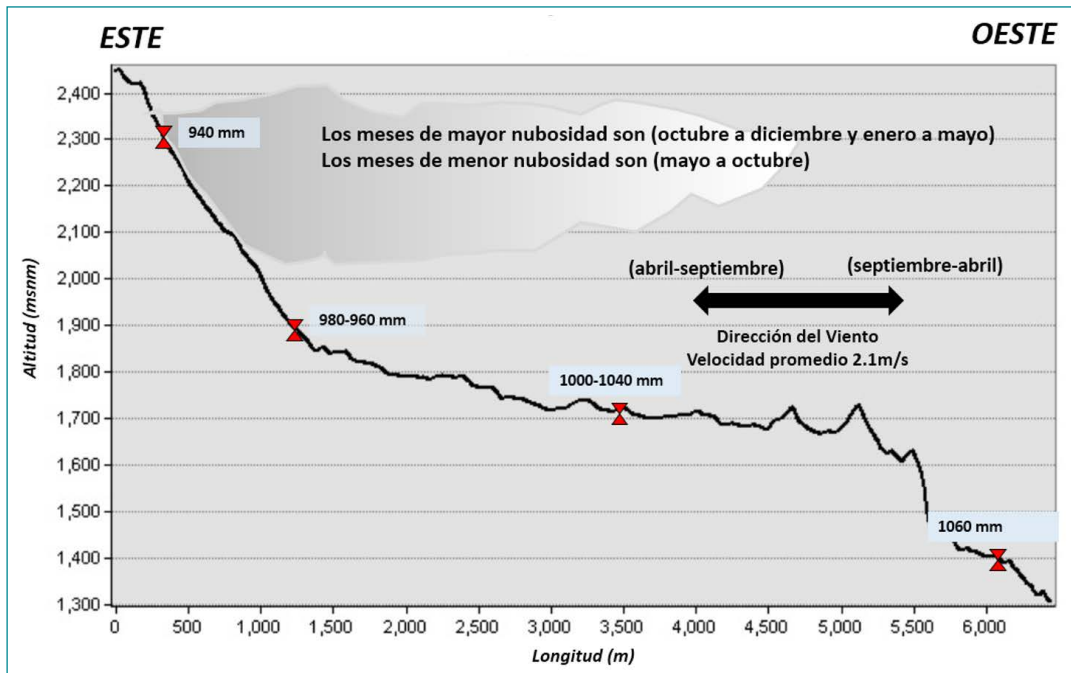
En suma, en la MQSPM las estaciones meteorológicas cercanas indican un comportamiento unimodal con un pico de precipitación en el mes de marzo, mientras que el período de verano se presenta desde los meses de junio a septiembre. Es importante considerar que las precipitaciones pueden ocurrir durante varios meses, entre diciembre y mayo; o aparecer únicamente en pocos días del año. Además, se tienen registros que entre los años 1967 y 1969 se produjo en toda la región un prolongado estiaje que ocasionó una de las migraciones más importantes de pobladores de la provincia de Loja, por las condiciones extremas de escasez de agua (CAN, 2009).

Comportamiento altitudinal de la precipitación y nubosidad

Las precipitaciones anuales se sitúan en mayor intensidad en la parte media y baja de la microcuenca con valores que van de los 980 a los 1060 mm (Figura 3). Por el contrario, en la parte alta se presentan menos precipitaciones, incluso inferiores a 940 mm. El comportamiento de las lluvias se incrementa en dirección este-oeste, debido a la incidencia de la zona costera del país y grandes masas de humedad provenientes desde la región amazónica y desde el océano Pacífico (OEA, 1994).

En cuanto a la nubosidad sobre la microcuenca, se estima que la época de mayor neblina ocurre entre octubre a diciembre y/o de enero a mayo, mientras que la de menor neblina sucede de mayo a octubre. Los vientos con más frecuencia vienen del este entre abril y septiembre, mientras que los vientos del oeste se concentran entre septiembre y abril, Figura 3. (WEATHERSPARK, 2021).

Figura 3. Distribución de la precipitación en el gradiente altitudinal de la microcuenca San Pedro Mártir

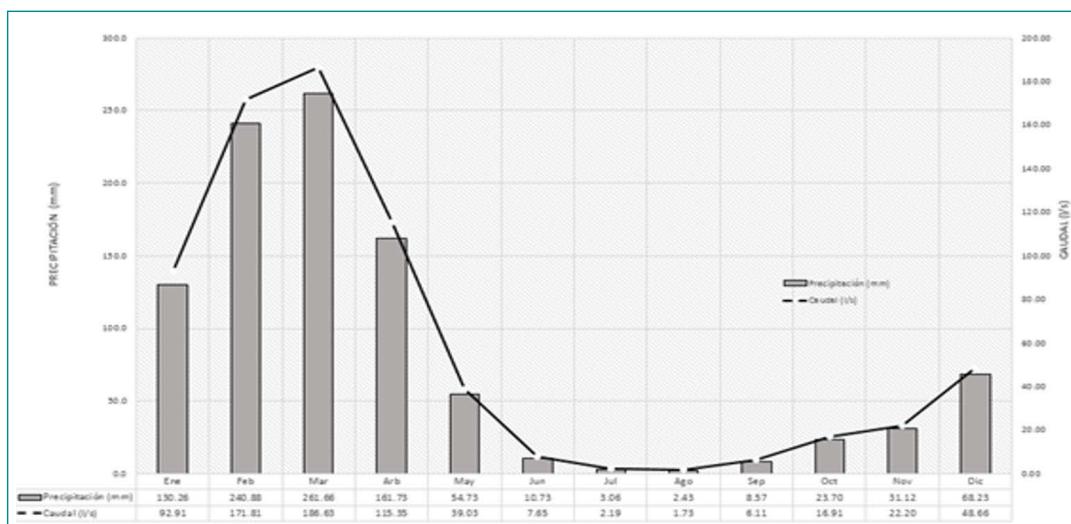


Fuente: Elaboración propia a partir de información del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI)

Caudal

La MQSPM, presenta un caudal promedio máximo en marzo con 186,63 l/s y un caudal mínimo en agosto con 1,73 l/s, directamente relacionado a la precipitación (Figura 4).

Figura 4. Relación entre la precipitación (mm) y el caudal (l/s) en la microcuenca de la quebrada San Pedro Mártir



Nota: Para obtener los datos se utilizó en método "Racional" Período de Datos: 1990-2015.

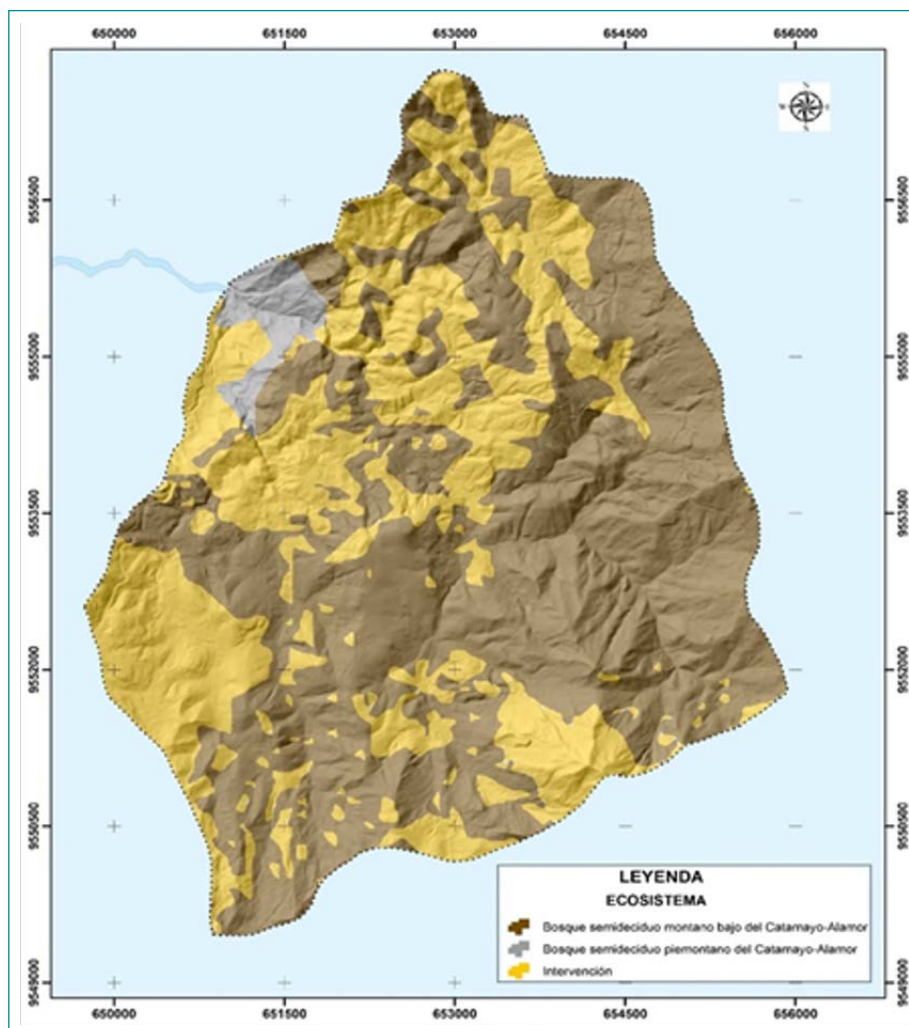
Fuente: Elaboración propia a partir de información del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INHAMI), www.serviciometeorologico.gob.ec

3. 2. Principio ecológico

Ecosistemas

De acuerdo con el sistema de clasificación de ecosistemas del Ecuador continental realizado por el Ministerio del Ambiente (2013), los ecosistemas terrestres identificados en la MQSPM corresponden al Bosque Semidecíduo Montano Bajo del Catamayo-Alamor (BmBn01), al Bosque Semidecíduo Piemontano del Catamayo-Alamor (BmPn01) y al Ecosistema Intervenido (Figura 5).

Figura 5. Ecosistemas de la microcuenca de la quebrada San Pedro Mártir



Fuente: Elaboración propia a partir de información del MAE (2013).

Bosque Semidecíduo Montano Bajo del Catamayo-Alamor (BmBn01)

La mayor parte del territorio de la microcuenca es Bosque Semidecíduo Montano Bajo del Catamayo-Alamor (BmBn01). Estos son bosques estratificados y en la provincia de Loja se distribuyen en las laderas y cumbres de las montañas hasta los 2200 m s.n.m., en el sector Catamayo-Alamor. El dosel alcanza 12 m y los árboles emergentes como *Eriotheca ruizii* pueden llegar a medir 15 m. Se observan especies de la familia *Cactaceae* y bajo el dosel crece una densa cobertura arbustiva y herbácea, donde son comunes *Ipomoea carnea*, *Croton wagneri*, entre otras (Ministerio del Ambiente, 2013).

Las especies florísticas que aquí sobresalen son: *Acacia macracantha*, *Acnistus arborescens*, *Armatocereus cartwrightianus*, *Cochlospermum vitifolium*, *Cyathostegia mathewsii*, *Eriotheca ruizii*, *Ficus cuatrecasasiana*, *Geoffroea spinosa*, *Mauria heterophylla*, *Phytolacca dioica*, *Pisonia aculeata*, *Schinus molle*, *Tabebuia billbergii*, *Tecoma stans*, *Terminalia valverdeae*, *Ziziphus thyrsoiflora*, *Byttneria flexuosa*, *Capparidastrium petiolaris*, *Cordia lutea*, *Coursetia grandiflora*, *Croton wagneri*, *Cynophalla flexuosa*, *Ipomoea carnea*, *I. pauciflora*, *Alternanthera porrigens*, *Bothriochloa saccharoides*, *Hyptis sidifolia*, *Iresine diffusa*, *Stachytarpheta stramine* (Ministerio del Ambiente, 2013).

Bosque Semideciduo Piemontano del Catamayo-Alamor (BmPn01)

Este tipo de formación vegetal corresponde a bosques semideciduos con un dosel que alcanza los 20 m de altura. Este ecosistema representa a los bosques secos estacionales del piedemonte de la Cordillera Occidental. Se caracteriza por la presencia de especies arbóreas, abundantes arbustos y hierbas que en temporada lluviosa crecen sobre laderas con pendientes moderadas de 20 a 30 % en suelos muy pedregosos (Aguirre *et al.*, 2006). Se distribuyen entre 400 y 1600 m s.n.m. en las provincias de Azuay, El Oro y Loja, debido a esta ubicación altitudinal es un sistema heterogéneo producto del contacto entre las distintas regiones y provincias biogeográficas donde confluyen la flora norandina y del Pacífico ecuatorial (Ministerio del Ambiente, 2013).

El estado de conservación de estos bosques es regular; cuando se altera con incendios y conversión de uso del suelo se pierden muchos elementos originales y el bosque se degrada, indicando que la resiliencia de este ecosistema es baja. Al degradarse el sistema se transforma en un arbustal semideciduo con un dosel de entre 5 y 6 m con pocos árboles emergentes remanentes de la vegetación. La fisonomía arbustiva secundaria se caracteriza por el dominio de *Acacia macracantha* y *Vernonantura patens* (Ministerio del Ambiente, 2013).

Las especies florísticas representativas de este tipo de cobertura son: *Bauhinia aculeata*, *Centrolobium ochroxylum*, *Cochlospermum vitifolium*, *Machaerium millei*, *Pradosia montana*, *Senna mollissima*, *Triplaris cumingiana*, *Croton wagneri*, *Pisonia aculeata*. La bromelia *Tillandsia usneoides* conocida localmente como Salvaje, es una epífita dominante en este tipo de bosque. Las especies de lianas se encuentran preferentemente en las quebradas (Ministerio del Ambiente, 2013).

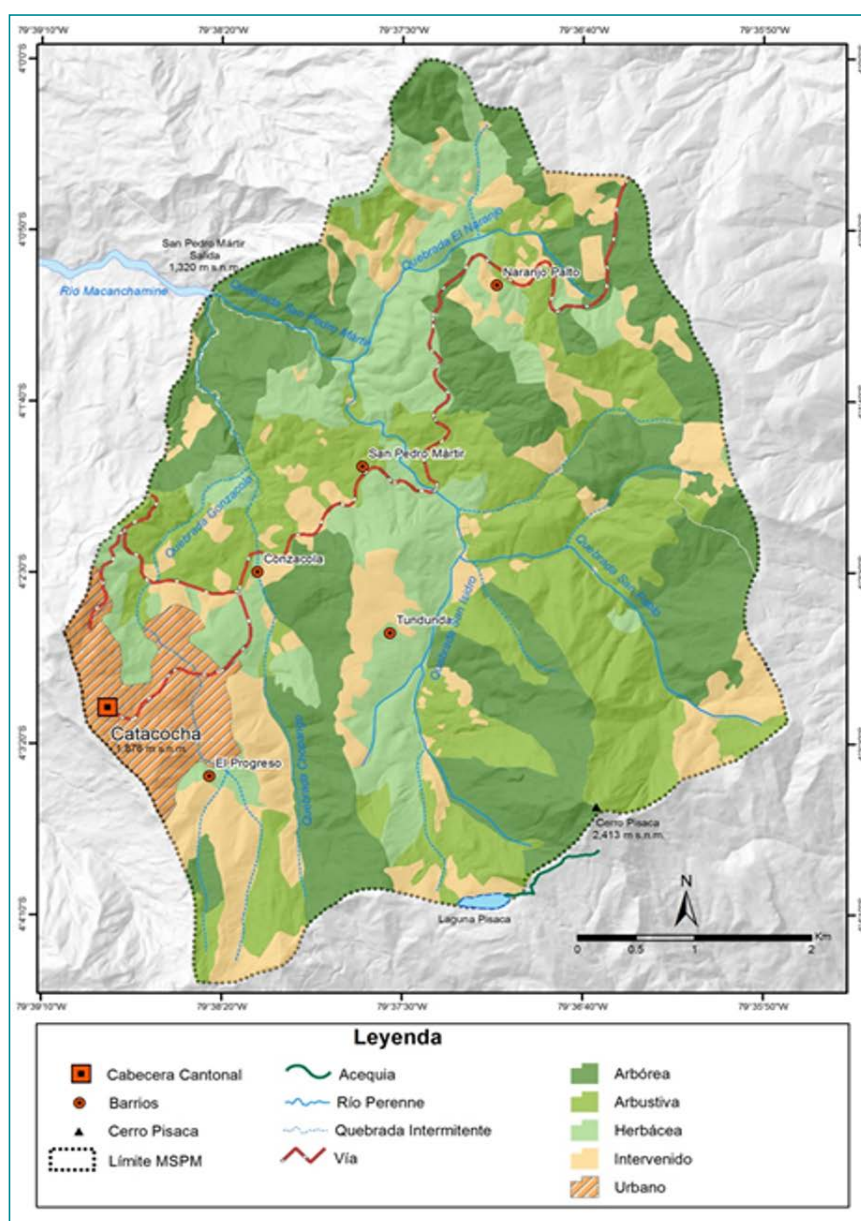
Ecosistema Intervenido

Este tipo de ecosistema se ha formado principalmente por las actividades antrópicas, ya que la población de Catacocha se dedica a la actividad agropecuaria en un 67,70 % (Chiriboga, 2009). Las actividades agrícolas que predominantemente se realizan son: la siembra de maíz, huertos y plantaciones de café, además de actividades de ganadería.

Cobertura vegetal y uso del suelo

En la MQSPM la cobertura vegetal y el uso del suelo se encuentran distribuidos de la siguiente manera. La vegetación nativa predominante es el bosque con un porcentaje del 32 % del total del área de la microcuenca, luego se encuentran los ambientes arbustivos con un porcentaje de 27 %, los ambientes herbáceos que ocupan un porcentaje de 19 % y los pastos con un 15 %. Además, un 5 % del territorio de la microcuenca es zona urbana y un 2 % del territorio se usa para agricultura (ver Figura 6).

Figura 6. Cobertura vegetal y uso de la tierra en la microcuenca de la quebrada San Pedro Mártir



Fuente: Elaboración propia a partir de información de SIGTIERRAS (2015).

Las zonas naturales en la microcuenca se encuentran principalmente en la parte alta, mientras que las zonas intervenidas por las actividades antrópicas son más frecuentes en las zonas bajas.

4. Identificación de impactos y descripción de la problemática

El principal problema en la zona es la poca disponibilidad de lluvias que produce escasez de agua tanto para actividades antrópicas como para los procesos ecosistémicos. A pesar de que esta situación ha ocurrido desde varios siglos atrás, el ser humano ha logrado adaptarse. En los tiempos modernos, la necesidad de las sociedades de contar con agua para sus actividades diarias se ha complicado por factores como el crecimiento poblacional, el sobreuso de los recursos hídricos, el cambio en el uso del suelo y los procesos climáticos globales adversos.

El sitio demostrativo de ecohidrología Paltas Catacocha tiene un componente histórico, cultural y ancestral destacable. De acuerdo con Ramón (2015), la zona sur del Ecuador y norte de Perú estaba habitada por la cultura preincaica de los paltas. Este grupo, que habitó esta zona desde hace más de dos mil años, había desarrollado un sofisticado manejo de la humedad mediante la creación de humedales artificiales. Este conocimiento ancestral, lamentablemente se perdió por el impacto de la colonización española. Los colonizadores de esta zona drenaron los humedales artificiales para usar las tierras para la agricultura y ganadería (Albarracín *et al.*, 2018; Ramón, 2017).

Los humedales artificiales construidos por los paltas, retenían en cochas el agua en tiempo de lluvia, misma que posteriormente se infiltraba y recargaba los acuíferos. El agua retenida de manera subterránea aparecía más abajo en forma de manantiales u “ojos de agua”. Con la destrucción y falta de mantenimiento de los humedales, se produjo la disminución en la recarga de los acuíferos. Esto originó un desabastecimiento de recursos hídricos para el desarrollo social afectando además a los ecosistemas.

En la actualidad se han construido y restaurado más de 25 lagunas o cochas (conocidas también como albarradas) dentro de la microcuenca. Igualmente se han construido tajamares, que son pequeños diques sobre el curso de la quebrada que tienen el propósito de retener la erosión y disminuir la escorrentía, embalsándola y creando una humedad en el suelo que posteriormente va filtrándose para aprovecharla en época de escasez de las lagunas logrando recargar los acuíferos y disponer de agua para la población de Catacocha (CAN, 2009).

En lo que respecta a la calidad del agua, las muestras extraídas de pozos profundos y de captaciones superficiales mostraron resultados de calidad del agua para consumo humano permisibles de acuerdo con los rangos establecidos en normas nacionales (TULAS e INEN 1108). Lo que no ocurrió con las muestras tomadas en los pozos donde se capta el agua cruda para la ciudad, en los que se encontraron concentraciones preocupantes de bacterias patógenas (i.e., coliformes fecales). Esto último se debe a la actividad ganadera cerca de los cauces y zonas de recarga, así como también al deficiente manejo de aguas residuales de la ciudad de Catacocha (Román y González, 2014). Esta contaminación se da a pesar de haber dispuesto la protección de las lagunas mediante la exclusión de ganado y la creación de abrevaderos para evitar la contaminación del agua por las excreciones de los animales (Ramón, 2018).

Con la adquisición de 400 has en 2010, que comprende parte del cerro Pisaca y los humedales principales dónde nace la quebrada San Pedro Mártir, se constituyó la actual Reserva Pisaca. Es en este espacio territorial donde la Corporación Naturaleza y Cultura Internacional logró establecer una importante interacción con varios actores: Municipio de Paltas, Unidad Educativa Maristas, Mancomunidad Bosque Seco, BOS+, ASOAGROPISA, Ministerio del Ambiente y Agua, entre otros. Esta unión de esfuerzos está permitiendo la recuperación, conservación y el manejo de la Reserva y en parte mitigar la problemática existente.

Por otro lado, algunas de las albarradas, especialmente las de menor tamaño y profundidad, presentan problemas de afloramiento de algas debido al estancamiento del flujo, enriquecimiento de nutrientes (N y P) y altas temperaturas e irradiación solar que favorecen altas tasas de producción primaria. Lamentablemente, este fenómeno de eutrofización podría limitar el uso de estas albarradas y los servicios que prestan al afectar a la calidad del agua y vida media de las albarradas (Albarracín, 2014). Otro factor importante es la presencia de totora, especie introducida en la zona con fines productivos, pero que a la larga se ha constituido en un problema puesto que está acelerando la pérdida de varias albarradas.

5. Potencial de sostenibilidad de la cuenca

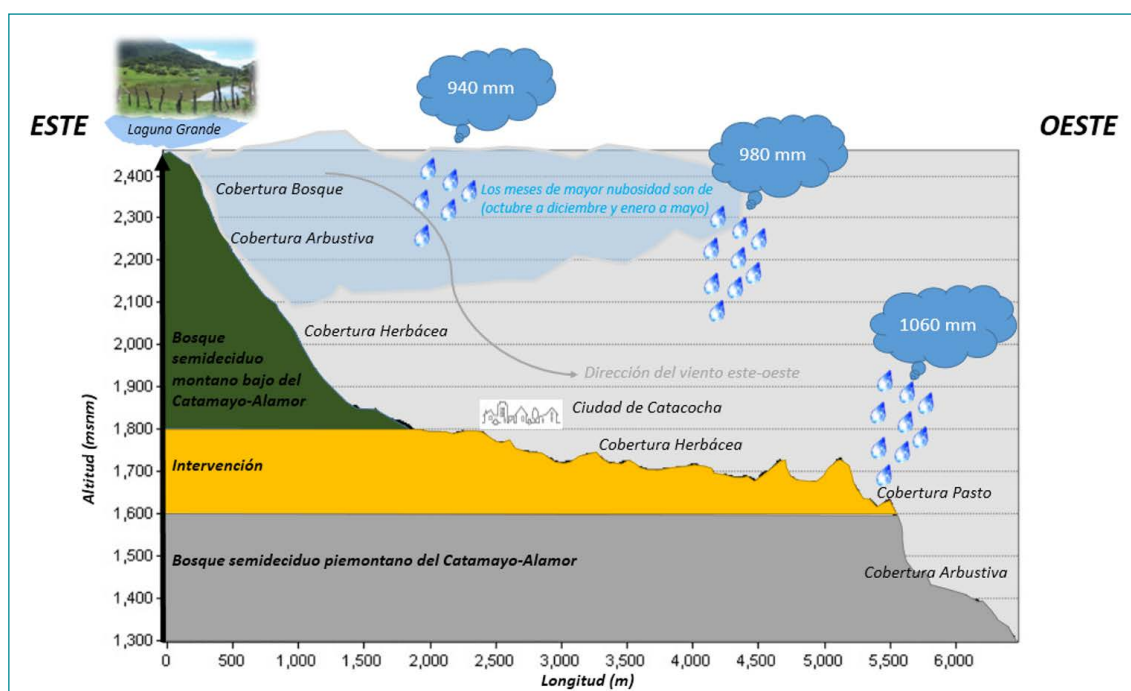
5.1. Enfoque WBSR-C.

De acuerdo con Zalewski (2018), la ecohidrología presenta un enfoque holístico para el manejo de una cuenca hidrográfica. El estudio profundo de las interrelaciones existentes entre el agua y la biodiversidad se potencia al generar herramientas de gestión que buscan alcanzar las metas de sostenibilidad de una cuenca. Estas herramientas buscan la mejora de factores o parámetros multidimensionales: agua, biodiversidad, servicios ecosistémicos, resiliencia y patrimonio cultural y educación (WBSR-CE, por su sigla en inglés).

5.1.1. Relación entre agua y biodiversidad

En la Figura 7, se observa un corte transversal de la MQSPM, indicando los tres ecosistemas y su relación con la precipitación que, a su vez, está influenciada por la altitud.

Figura 7. Corte vertical de la microcuenca de la quebrada San Pedro Mártir indicando las relaciones entre la hidrología y las formaciones vegetales



Fuentes: Elaboración propia a partir de información de MAE (2013), SIGTIERRAS (2015), NCI (2017), WEATHERSPARK (2021), INHAMI (1990-2015), www.serviciometeorologico.gob.ec

Como se explicó anteriormente, la microcuenca presenta mayor nubosidad en los meses de octubre a diciembre y menor nubosidad en los meses de mayo a octubre (WEATHERSPARK, 2021). Particularmente, se registra mayor precipitación en los pisos altitudinales más bajos de la microcuenca, esto se podría deber a que el comportamiento de las lluvias en el lugar se incrementa en dirección este-oeste por la incidencia de la zona costera del país y grandes masas de humedad provenientes desde la Amazonía y desde el Océano Pacífico (OEA, 1994).

Es importante tomar en cuenta que algunas teorías relacionan la presencia del bosque con el aumento de la precipitación total, a través del ciclo de las lluvias por el proceso de evapotranspiración. En general, la precipitación media es mayor en áreas con bosque que en áreas descubiertas (Giraldo,

2002). Además, la evaporación local no controla la precipitación en el mismo lugar, ni tampoco se correlaciona con los patrones de distribución de las lluvias sobre la tierra. Para que se considere que la evaporación en un lugar determinado pueda contribuir a la precipitación en esta área es preciso tener en cuenta el movimiento continuo del aire. De hecho, la capa de aire que recibe el agua evaporada puede encontrarse a kilómetros de distancia algunas horas más tarde (Giraldo, 2002).

Para la MQSPM los dos primeros parámetros, agua y biodiversidad, han sido abordados en los principios hidrológico y ecológico, respectivamente. En el principio hidrológico se evidencia un problema de cantidad de agua originado por la frecuencia unimodal acumulada de precipitaciones entre enero y abril y las escasas o ausentes precipitaciones el resto del año.

El régimen de precipitación influencia el tipo de cobertura vegetal de la microcuenca. Los bosques son caducifolios, es decir que los árboles pierden sus hojas en la temporada de estiaje y reverdecen con las lluvias. Así también el tipo de estructuras vegetales difieren de acuerdo con la altitud. En la parte alta de la cuenca existe menor precipitación que en la parte baja, y eso ha originado que los bosques sean de tipo montano bajo o piemontano, respectivamente (ver Figura 7).

Adicionalmente, el sitio se encuentra ubicado entre los *hotspots* de biodiversidad Andes Tropicales y Chocó Darién del Oeste de Ecuador (Myers *et al.*, 2000), y se encuentra específicamente en la Zona de Endemismo Tumbesina. Este sitio es rico en flora y fauna amenazadas y poco conocidas, propias del Pisaca, que es el punto más alto de la cadena montañosa del lugar. De ahí la importancia de conservar esta área y apoyar su rehabilitación, lo cual podría ser un ejemplo del buen manejo de la humedad para enfrentar las fuertes sequías de las zonas media y baja de la provincia de Loja (NCI, 2015).

Sin embargo, la intervención humana también ha influenciado el mosaico de cobertura vegetal (Figura 6). A pesar de que existe un alto porcentaje de bosque y zonas arbustivas, también existen grandes zonas urbanas, de pastos, herbáceas y tierras agrícolas.

La disminución de la escorrentía y retención del agua por más tiempo en la cuenca, sumado a la restauración y protección de zonas de bosque, darán como resultado una mejora en los objetivos de sostenibilidad de la cuenca (WBSR-CE).

5.1.2. Servicios ecosistémicos en la microcuenca de la quebrada San Pedro Mártir

Los servicios ecosistémicos se definen como los múltiples beneficios que los ecosistemas y su biodiversidad proveen a la sociedad, estos incluyen: (1) Servicios de producción de bienes o servicios de aprovisionamiento, por ejemplo, alimentos, agua, medicinas, materiales para construcción y artesanías, energía y recursos genéticos. (2) Servicios de regulación o aquellos que se generan por los procesos que suceden en los ecosistemas, como el secuestro de carbono, control de catástrofes o eventos extremos, regulación del clima local y la calidad del aire, purificación de aguas residuales, polinización, control biológico de plagas, entre otras. (3) Servicios culturales que son aquellos beneficios no materiales que la gente recibe del contacto con los ecosistemas como la recreación, la salud física y mental, el turismo, la apreciación estética y la inspiración para la cultura, el arte y el diseño, las experiencias espirituales más la apropiación o identidad del sitio. Finalmente, (4) las funciones de soporte que aseguran la posibilidad de tener hábitat para especies y el mantenimiento de la diversidad genética (Carpenter *et al.*, 2009; MEA, 2005; TEEB, 2010).

La gestión enfocada a la preservación de recursos hídricos dentro de la MQSPM ha generado la potenciación de varios servicios ecosistémicos para beneficio de la comunidad que habita en la zona. En la Tabla 2 se puede apreciar los servicios ecosistémicos más notorios y que sobresalen como resultado de la gestión de la microcuenca (Albarracín *et al.*, 2018).

Tabla 2. Servicios ecosistémicos identificados en la microcuenca de la quebrada San Pedro Mártir

Servicios de aprovisionamiento	Servicios de regulación	Servicios Culturales	Servicios de soporte
Agua dulce	Moderación de fenómenos extremos como sequías	Herencia cultural	Producción primaria
Materias primas	Polinización	Identidad de Sitio	Hábitat para especies
Medicinas	Reciclaje de nutrientes	Experiencia espiritual y sentimiento de pertenencia	Conservación de la diversidad genética
Frutos y alimentos del bosque	Preservación de la erosión y conservación de la fertilidad del suelo	Apreciación estética e inspiración para la cultura el arte y el diseño	
		Actividades de recreo y salud mental y física	
		Turismo	

Fuente: Albarracín *et al.*, 2018.

En la parte media de la microcuenca se encuentra la Laguna Pisaca, la más grande y simbólica del sector. Su área de influencia es importante porque brinda varios servicios ecosistémicos, de los cuales muy pocos han sido valorados económicamente. Las cochas y sus áreas de influencia se convierten en zonas protectoras y productoras de agua, refugio de flora y fauna, zonas de recreación, educación e investigación, áreas de captación de carbono, entre otras (NCI, 2015).

A manera de ejemplo, presentamos brevemente el caso del servicio de aprovisionamiento de materias primas con el árbol de vainillo. Existen varios productos que se obtienen en la zona, pero en los últimos años se ha destacado la utilización del Vainillo o Tara (*Caesalpineia spinosa*). Esta planta Fabácea, tiene características tanto de conservación de fuentes de agua como de producción de goma y taninos (NCI, 2015). En efecto, luego de un proceso liderado por una organización de la comunidad conocida como Asociación de Producción Agropecuaria Pisaca (ASOAGROPISA) y NCI, se logró establecer un importante canal de comercialización que beneficia a alrededor de 300 familias y que está permitiendo la exportación al Perú de más de 90 toneladas de vainas de tara (Informe de Comercialización ASOAGROPISA, 2021). Las vainas de tara se utilizan para dos procesos principales; de la cáscara se obtiene el polvo que contiene una alta concentración de taninos útiles en la industria de la curtiembre y, de las semillas, se obtiene la goma de tara utilizada dentro de la industria alimentaria y la medicina principalmente. Perú es el principal exportador de polvo y goma de tara del mundo.

El sector del agro también ha sido repotenciado luego de las actividades de manejo en la cuenca con enfoque ecohidrológico. Como se mencionó anteriormente, en la actualidad la agricultura es la principal actividad productiva en la zona con un 67,7 % de la población que se dedica a tareas agropecuarias (Chiriboga, 2009). En el suroccidente de Ecuador (provincia de Loja) existe una diversidad considerable de usos de las plantas nativas, principalmente como materiales de construcción, medicina y alimentos (Aguirre *et al.*, 2006). Así también, se pueden encontrar extensas áreas de pastos y herbáceas que son utilizadas para potenciar la ganadería. Estas actividades coadyuvan a la reactivación económica de la zona, aunque las prácticas agroecológicas han sido objeto de atención en muchos proyectos desarrollados en la zona (Chiriboga, 2009; Ramón, 2017).

En suma, son varios los servicios ecosistémicos que se han desprendido de la gestión con enfoque ecohidrológico en la MQSPM, pero sin duda se destacan los siguientes: (1) disponibilidad de agua para consumo humano y riego, (2) materiales y recursos como alimento, semillas y medicinas que

se obtienen de las zonas protegidas y de sistemas agroforestales, (3) recuperación de valores y apropiación de la comunidad por el sentido de sitio y de identidad ante la cultura ancestral de los paltas, y (4) posibilidades de turismo por la recuperación del paisaje en la zona (Albarracín *et al.*, 2018).

5.2. Resiliencia y adaptación al cambio climático

Holling (2013), indica que la resiliencia es un concepto que se define como la capacidad de adaptación y recuperación de un sistema, cualquiera que este fuera, ante afectaciones externas o internas. En términos ambientales, la resiliencia es la capacidad de un ecosistema para adaptarse ante adversidades y de recuperarse de tal forma que pueda seguir manteniendo sus movimientos de energía; por ejemplo, dentro de la cadena trófica, o en la relación presa-predador. También se pueden considerar los ciclos biogeoquímicos, de materiales y el ciclo del agua.

Por otra parte, la resiliencia puede ser analizada desde el punto de vista de la capacidad que presenta una población para adaptarse a situaciones catastróficas. Tal como indicamos anteriormente, la comunidad de Catacocha en el cantón Paltas llegó a un momento de crisis con respecto al aprovisionamiento de agua, pero está dando muestras de recuperación basándose en la participación social y el uso de saberes ancestrales como forma de enfrentar las catástrofes. La ciudad de Catacocha llegó a contar con únicamente una hora de agua al día (GAD Paltas, 2017). Posterior a este momento sobrevino una oleada de fenómenos migratorios, cuando muchos de los habitantes de la zona se despojaron de su terruño y se instalaron en lugares distantes del país o el extranjero (CAN, 2009). Sin embargo, muchos se quedaron y con el apoyo de organizaciones y de personas originarias de Paltas que formaron grupos y asociaciones para apoyar a quienes optaron por quedarse, se logró mejorar las condiciones de abastecimiento del líquido vital, tanto para consumo humano como para el riego. El haber conseguido que el sistema de abasto de agua llegue a valores superiores a las 6 horas por día, en época seca, no es la mejor situación, pero demuestra la capacidad de adaptación y recomposición social de los paltenses ante fenómenos adversos (Albarracín *et al.*, 2018).

Finalmente, ante el panorama poco alentador de cambio climático, el ejemplo presentado en la gestión del agua mediante la recuperación de saberes ancestrales en Catacocha genera una alternativa que puede ser imitada en otras zonas en las que las predicciones de sequías relacionadas al cambio climático y al crecimiento poblacional disminuirían la cantidad y calidad de recursos hídricos. En efecto, en Ecuador se ha replicado la construcción de albarradas y cochas en diversos puntos del país con resultados alentadores (Álvarez-Litben, 2021).

6. Patrimonio cultural

La incorporación de los saberes ancestrales y culturales dentro de soluciones ecohidrológicas es el principal aporte que presenta el Sitio Demostrativo de Ecohidrología Paltas Catacocha (Albarracín *et al.*, 2021). El acervo cultural de Paltas se fundamenta en una larga y dinámica historia de asentamientos humanos. En estos territorios se encuentran vestigios de culturas aborígenes que poblaron el lugar hace más de 2000 años. Posteriormente, los incas, en el proceso de expansión del Tahuantinsuyo, ocuparon el territorio y trajeron consigo el intercambio de saberes y tecnologías. Según historiadores, los paltas no se doblegaron fácilmente ante el plan imperialista inca. Los conocimientos de los paltas, al igual que el de los incas, han trascendido en el tiempo; su rescate puede ser fundamental para abordar problemas actuales del manejo del agua (Ramón 2015).

En términos temporales e históricos, en la zona de Catacocha se han registrado al menos tres momentos de culturas diferentes. Los primeros registros se relacionan a los paltas, seguido por los incas y finalmente la colonia española y su consecuente mestizaje. Existen varios vestigios de la presencia de las culturas aborígenes en el sur de Ecuador. En museos de la ciudad de Catacocha, existen varias piezas históricas asociadas a la cultura de los paltas. Son notorios los petroglifos con motivos relacionados a objetos de la naturaleza y a deidades de la zona. El período histórico de invasión inca no fue muy largo y le subsiguió la conquista española. La ciudad de Catacocha, que es la cabecera cantonal del cantón Paltas, es una de las ciudades más antiguas de lo que ahora es Ecuador, puesto que fue fundada en el año de 1824. La arquitectura característica de iglesias, conventos y casas coloniales denota las particularidades de construcción y costumbres típicas de la cultura española. En la actualidad, el fenotipo de los paltenses muestra el mestizaje y la gran diversidad de culturas que se han asentado en este sitio (Albarracín *et al.*, 2018; Ramón, 2015). El gobierno ecuatoriano reconoce a Catacocha como Patrimonio Cultural del Ecuador.

En lo que respecta al manejo del agua de los paltas, Ramón (2015) indica que en el sector de Anganuma, existe un petroglifo famoso conocido como la Serpiente. Sin embargo, esta roca puede ser la representación de una microcuenca con oquedades como lagunas, que permite interpretarla como una “maqueta didáctica” para la gestión de los recursos hídricos de los paltas (ver Figura 8).

Figura 8. Petroglifo de la serpiente ubicado en Anganuma. La roca representa una microcuenca con ríos y cochas interconectadas, se podría interpretar como un modelo 3D de una microcuenca de los paltas



© Elaboración propia a partir de información de Albarracín *et al.* (2018) y Ramón (2015).
Foto: Marco Albarracín.

El reconocimiento de la tecnología, para el manejo de los recursos hídricos, utilizada por los ancestros aborígenes de la zona ha originado un gran sentido de identidad entre los paltenses. La recuperación de los saberes ancestrales de los paltas y sus técnicas de manejo del sistema hídrico son la piedra angular de la denominación de la MQSPM como sitio demostrativo de ecohidrología.

7. Objetivos

- Manejar los recursos hídricos de la MQSPM mediante la disminución de la escorrentía y el aumento de la retención de agua lluvia en humedales artificiales y tajamares, emulando las prácticas ancestrales de los paltas.
- Recargar acuíferos para usarlos como reservorios naturales de agua y usarla en las vertientes y pozos profundos en la parte baja de la cuenca.
- Restaurar y proteger la cobertura vegetal en la parte alta y media de la cuenca para prolongar la humedad de la zona, apoyar a la conservación de la biodiversidad y generar nuevos servicios ecosistémicos para la comunidad.
- Incentivar la participación de la ciudadanía del cantón Paltas en el manejo de los recursos hídricos y de la biodiversidad en la MQSPM con el fin de coadyuvar la seguridad hídrica y alimentaria de Paltas.
- Fomentar la implementación de prácticas ecohidrológicas basadas en el conocimiento científico en otros sectores del país y del exterior.

Objetivos científicos del sitio demostrativo

- Estudiar los efectos de los cuerpos de agua y humedales artificiales sobre el ciclo hidrológico de la MQSPM.
- Estudiar los efectos de la reforestación, la agricultura regenerativa y los cambios de cobertura vegetal y uso del suelo en el ciclo hidrológico de la MQSPM.
- Determinar el tiempo de retención de agua en los acuíferos y la dotación del recurso hídrico en los sitios de captación como resultado de la implementación de humedales artificiales y tajamares.
- Determinar el rol de las intervenciones en los ciclos biogeoquímicos, la ecología de los sistemas y la calidad del agua.
- Cuantificar económicamente los servicios ecosistémicos que brinda la microcuenca de la quebrada San Pedro Mártir.

8. Modelo conceptual de funcionamiento

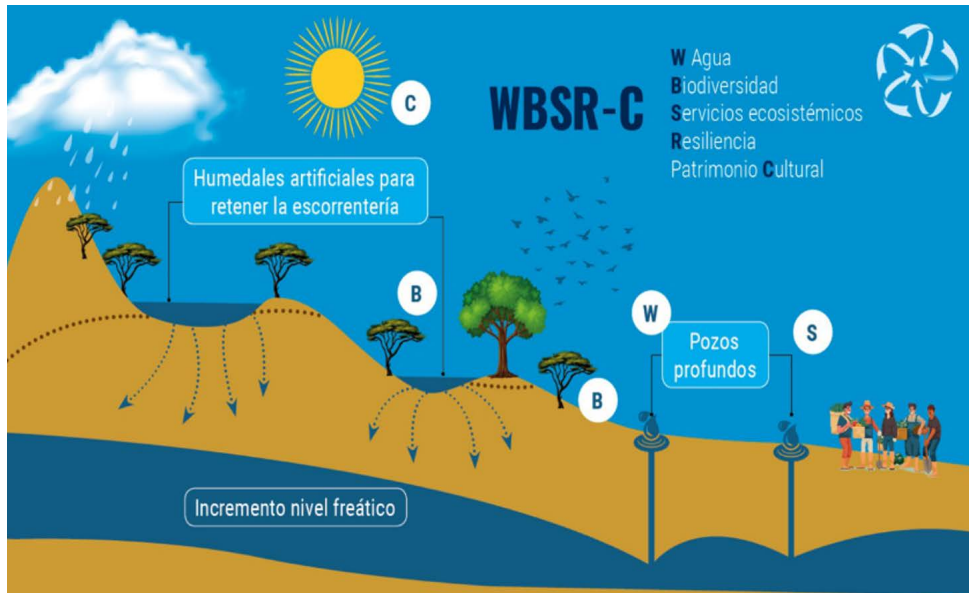
8.1. Principio ecohidrológico o de ingeniería ecológica

El tercer principio de la ecohidrología propuesto por Zalewski (2000), indica que la manipulación controlada de procesos hidrológicos y ecológicos se convierte en un nuevo paradigma para la gestión integrada de recursos hídricos. La propuesta incluye la armonización de varias intervenciones que van desde las prácticas propuestas por la biología de la conservación, como la restauración de paisajes y la delimitación de áreas de preservación biológica, hasta las intervenciones tecnológicas con infraestructura civil para mejorar la cantidad y calidad de agua. La propuesta invita a entender a profundidad las relaciones existentes entre la hidrología y la biota y usar estos procesos como herramientas para la gestión de recursos hídricos y naturales.

En el sitio demostrativo de Paltas Catacocha, se han ejecutado diversas intervenciones. Por ejemplo, la construcción de lagunas artificiales y tajamares permiten la infiltración de agua hacia los acuíferos, ralentizando la escorrentía. Por otro lado, la estrategia también incluye la delimitación

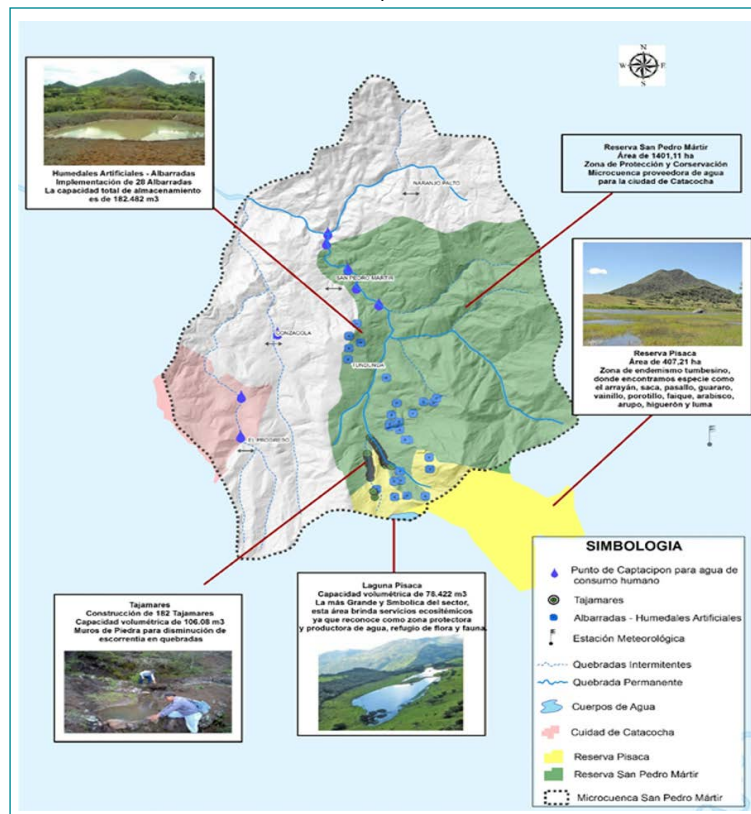
de áreas para la conservación y restauración de ecosistemas que a su vez permiten recuperar la capa vegetal y así contrarrestar los procesos de erosión del suelo y la acelerada escorrentía (ver figuras 9 y 10).

Figura 9. Modelo conceptual del enfoque ecohidrológico para mejorar la recarga de acuíferos, la calidad del medio ambiente, crear una retroalimentación socioeconómica positiva y aumentar el potencial de sostenibilidad (WBSR-CE)



Fuente: Elaboración propia

Figura 10. Esquema del enfoque ecohidrológico en la microcuenca de la quebrada San Pedro Mártir.



Fuentes: Elaboración propia a partir de información de G. Ramón, comunicación personal, 23 de marzo de 2018 (GAD, 2019), (Gonzaga Vallejo *et al.*, 2018) Fotos: © NCI (2015), Municipio de Paltas (2015).

9. Medidas y acciones ecohidrológicas a demostrar

Con el fin de evaluar la efectividad de las intervenciones implementadas en la MQSPM, proponer nuevas intervenciones o adaptar las ejecutadas, es necesario definir un programa de manejo adaptativo y de monitoreo ecohidrológico de la cuenca. Este programa deberá ir a la par de la implementación de prácticas agroecológicas y agroforestales regenerativas que mejoren el estado, diversidad y productividad del ecosistema, así como de un programa de educación ambiental y participación ciudadana para la implementación de las prácticas de manejo adaptativo.

Entre las acciones que se deberán tomar, están la definición del balance hídrico de la MQSPM, y del rol de los compartimentos naturales y artificiales en el mismo (ej., suelo, cuerpos de agua superficiales, acuíferos, vegetación, etc.). Para esto será necesario el monitoreo continuo de las condiciones hidrometeorológicas de la microcuenca bajo un diseño experimental que permita evaluar el efecto de las diferentes prácticas de manejo sobre los compartimentos del ciclo hidrológico.

A través de métodos hidrológicos-isotópicos y biogeoquímicos se determinarán si las prácticas ecohidrológicas implementadas están fomentando la recarga de los acuíferos y la mayor dotación de agua para la población. Igualmente, será necesario evaluar si las intervenciones tuvieran algún tipo de impacto negativo sobre el ecosistema (ej., descarga) y sus servicios ecosistémicos (ej., cantidad de agua de consumo) y en ese caso tomar las medidas correctivas necesarias para minimizar los impactos. Igualmente, el análisis fisicoquímico y microbiológico del agua luego de diferentes intervenciones permitirá determinar si estas tienen efectos positivos o negativos sobre su calidad.

Luego de las estimaciones del balance hídrico de la microcuenca, se podrán determinar con mayor exactitud las cantidades de agua que puede ser extraída del ecosistema sin que ocasione impactos a las formaciones vegetales aguas abajo. Es necesario evaluar el caudal ecológico en los cauces intervenidos y comparar con sitios de referencia en zonas no intervenidas. Igualmente, sería adecuado comparar el comportamiento de la MQSPM, con el de otras cuencas aledañas con fisiografías y usos del suelo semejantes. Asimismo, se podrá analizar la factibilidad de extrapolar la implementación de las intervenciones ecohidrológicas mejoradas en sectores más amplios para cuantificar su efectividad a nivel de otros ecosistemas y del paisaje.

Sería necesario hacer modelaciones de la respuesta del ecosistema a las intervenciones ecohidrológicas bajo diferentes escenarios de cambio climático, crecimiento poblacional, etc. Estas modelaciones deben ser alimentadas con datos que se obtengan del monitoreo, que debe hacerse a largo plazo y continuamente, para así dar retroalimentación al manejo y propiciar la sostenibilidad de las intervenciones.

El rol de la academia y los actores locales es fundamental para la implementación de este programa de monitoreo ecohidrológico y manejo adaptativo en el sitio demostrativo de Paltas Catacocha. Las universidades Ikiam, UTPL y la UPS a través de sus laboratorios de agua (LNRA) y ecología (LETSE), la CUMADT, y el GIRHA se han comprometido a apoyar en el desarrollo e implementación de las acciones.

10. Desafíos, oportunidades y lecciones aprendidas

Con el objeto de entender el proceso de implementación del sitio demostrativo tomamos como referencia la información presentada en el Proyecto Sembrando agua, manejo de microcuencas: Agua para la parroquia de Catacocha y las comunidades rurales. Implementado en 2005 y presentado por Chiriboga (2009), ver Caja 1.

Caja 1.

Proyecto: Sembrando agua, manejo de microcuencas: Agua para la parroquia de Catacocha y las comunidades rurales.

Eduardo Chiriboga 2009

Objetivo

El objetivo general del proyecto fue manejar de forma consensuada la cuenca alta del Río Playas mediante la protección de la cobertura vegetal y el uso de los suelos para recuperar el recurso hídrico. De esa manera se buscaba abastecer de agua para consumo humano a los pobladores de la ciudad de Catacocha y sus comunidades rurales, así como mejorar la seguridad alimentaria y convertir el manejo de los recursos naturales en una política pública local.

Resultados

Se construyeron e implementaron 72 albardas o lagunas de altura. Esto permitió el almacenamiento de aproximadamente 170.000 m³ de agua que actualmente fluyen a través de los acuíferos. De esta manera, se alimentaron las vertientes y se permitió que las quebradas mantengan caudales para el almacenamiento de agua en los reservorios de verano y pilancones, desde los que se riega nuevas huertas o se reactiva aquellas abandonadas.

Se construyeron reservorios de verano (tajamares) que constan de un pequeño muro de contención de hormigón a lo ancho de los lechos de las quebradas. Los tajamares tienen una compuerta de control que es abierta en invierno para el drenaje libre del agua y es cerrada en verano para el almacenamiento cuando los caudales disminuyen.

Se implementó la protección de vertientes y fuentes de agua para mejorar la calidad y el almacenamiento. Se construyeron pequeños muros de hormigón alrededor de los ojos de agua, para el manejo y conservación del recurso hídrico, lo que fue complementado con cercas de alambre de púas y la construcción de abrevaderos para los animales.

Se fomentó la educación ambiental y la capacitación de líderes locales, hombres y mujeres, mediante talleres periódicos (cada 15 días) en los que se abordaron temas relacionados con el agua en el territorio, liderazgo, manejo parlamentario, manejo de cuencas hidrográficas, entre otros. Estas acciones permitieron la conformación de la asociación de comunidades sembrando agua (ACSA). Además, se realizaron conferencias, exposiciones, programas de televisión y se distribuyeron cartillas, trípticos, afiches y videos sobre el proyecto y sus resultados.

Se impulsó la participación ciudadana en el proyecto a través de la difusión de un programa radial diario, este medio permitió mantener informada a la ciudadanía haciendo transparente el proceso de ejecución, además de analizar diferentes temáticas relacionadas con las microcuencas y sus recursos naturales, buscando sensibilizar a la ciudadanía y procurando su participación en el manejo y conservación de los recursos.

En agosto del 2006 concluyó el proyecto y pasó a funcionar la ACSA como organización jurídica integrada por los representantes de las comunidades rurales participantes que, en adelante, se encargó de coordinar el mantenimiento y seguimiento del proyecto con el municipio.

Aprendizajes

Según Chiriboga (2009), los procesos nacionales y sus efectos en el nivel local se constituyen en oportunidades para los gobiernos locales de buscar alternativas de solución que, partiendo de procesos de planificación de desarrollo local, contribuyan a atender las condiciones de riesgo y desastre.

El carácter participativo en la formulación del plan permitió asumir compromisos compartidos en las acciones priorizadas y con ello avanzar en los objetivos previstos.

El proyecto, abordado desde el manejo ambiental, permitió que los actores pudieran asociar la problemática de las sequías con factores antrópicos, como el inadecuado manejo del territorio por exceso de pastoreo, la tala de los escasos bosques y el cultivo de especies no adecuadas para la zona. Además, permitió identificar las consecuencias negativas que ello representó para el cantón en términos de su desarrollo local, llegando a condiciones críticas no solo en la zona rural sino también en la zona urbana. Las acciones de recuperación demandan de estrategias de dos tipos: unas orientadas al encuentro de soluciones

prontas con resultados de corto plazo, y otras que requieren de esfuerzos adicionales con resultados a mediano plazo, como es el caso del cambio a prácticas insostenibles.

Logros y limitaciones

El Plan de Desarrollo Cantonal, fue el marco de sustento de sembrando agua y surgió ante las exigencias nacionales y seccionales de proveer a los municipios de planes de desarrollo para guiar las inversiones anuales. De esta manera, se buscó justificar el uso de los recursos asignados por ley, en el marco de la Ley de Descentralización y Participación Social que entró en vigencia en el país.

Si bien el riesgo de desastre no fue la pauta que dinamizó el proyecto desde el ámbito local, esta temática logró ser abordada desde las actividades propias del proyecto.

Es importante resaltar que durante el proceso de planificación se activó una importante participación social tanto urbana como rural. Sin embargo, se produjo un distanciamiento entre los intereses de los dos sectores de la población, ya que al momento de la construcción de las obras son las familias del sector rural las que se mantienen vinculadas al proyecto desde su participación en la construcción hasta su organización para el mantenimiento de las mismas. En este sentido, es necesario clarificar algunos roles y grados de participación de los actores locales.

Se generaron capacidades e institucionalidad al interior del municipio a través de la creación de la Dirección de Gestión Ambiental, para continuar atendiendo tanto el tema del agua como otros asociados a la problemática y necesidades ambientales.

El manejo de la comunicación ligada a las comunidades rurales fue una acertada estrategia de imagen para el proyecto, tan efectiva como sembrar agua y luego cosecharla cuando en los ojos de agua de las quebradas y en las llaves de las viviendas urbanas brota el líquido vital, renaciendo el sentido de pertenencia e identidad de la población con el contexto local.

Se dio la instrumentación de un proceso de promoción y debate con los beneficiarios a través de la elaboración de diagnósticos y planes de manejo participativos por cada microcuenca.

Se fomentó un reencuentro entre el saber popular y el saber científico (lo ancestral con lo moderno) para el manejo de la cuenca y el rescate de las lagunas de altura. Fue indiscutible la inserción de la comunidad en todos los procesos (rescatando las tradicionales mingas), lo que permitió seguir con los trabajos planificados evitando su paralización.

Finalmente, pero no menos importante, se afianzó la equidad de género y se propiciaron espacios para la participación de hombres y mujeres de la zona.

Cita de esta caja:

Chiriboga, Eduardo. 2009. Sembrando Agua. Manejo de Microcuencas: Agua Para La Parroquia Comunidades Rurales. Primera Ed. Lima: Secretaría General de la Comunidad Andina.

Datos de contacto

Blgo. Marco Albarracín M.Sc.

Universidad Politécnica Salesiana

Correo electrónico: marcoalbarracin@gmail.com

Carlos Iñiguez Ph.D.

Universidad Técnica Particular de Loja

Correo electrónico: cainiguez@utpl.edu.ec

José Romero

Corporación Naturaleza y Cultura Internacional

Correo electrónico: jromero@naturalezaycultura.org

Referencias bibliográficas

- Aguirre M, Z.; Kvist, L. P.; Sánchez T, O. (2006). Bosques secos en Ecuador y sus plantas útiles. *Botánica Económica de Los Andes Centrales*, January, 188–204.
- Albarracín, M. (2014). Effects of physical characteristics and nutrient ratios (N:P:Si) on diatoms and Cyanobacteria in freshwater: A meta-analysis. In *Water Science and Engineering: Vol. Máster of (Issue WSE-EH 14.15)*. UNESCO - IHE.
- Albarracín, M.; Gaona, J.; Chicharo, L.; Zalewski, M. (2018). *Ecohidrología y su Implementación en Ecuador*. EDILOJA.
- Albarracín, M.; Ramón, G.; González, J.; Iñiguez-Armijos, C.; Zakaluk, T.; Martos-Rosillo, S. (2021). The Ecohydrological Approach in Water Sowing and Harvesting Systems: The Case of the Paltas Catacocha Ecohydrology Demonstration Site, Ecuador. *Ecohydrology & Hydrobiology*.
- Álvarez-Litben, S. G. (2021). Cultural sustainability and community water management in coastal Ecuador: jagüeyes or albarradas and small dams or detention ponds. *Sustainability in Debate/Sustentabilidade Em Debate*, 12(1).
- CAN. (2009). Sembrando agua. In P. Comunidad Andina de Naciones (ed.), *Manejo de microcuencas: Agua para la parroquia Catacocha y las comunidades rurales*, Vol. 4, Issue 4, p. 28.
- Carpenter, S. R.; Mooney, H. A.; Agard, J.; Capistrano, D.; DeFries, R. S.; Díaz, S.; Dietz, T.; Duraiappah, A. K.; Oteng-Yeboah, A.; Pereira, H. M. (2009). Science for managing ecosystem services: Beyond the Millennium Ecosystem Assessment. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(5), 1305-1312.
- Chiriboga, E. (2009). *Sembrando Agua. Manejo de microcuencas : Agua para la parroquia comunidades rurales (Primera Ed)*. Secretaría General de la Comunidad Andina. https://doi.org/http://www.comunidadandina.org/predecan/doc/libros/SISTE22/EC/EC_CATACOCCHA.pdf
- GAD, G. A. D. del C. P. (2019). *Plan de desarrollo y Ordenamiento Territorial*.
- GAD Paltas (2017). *Formulario de Postulación al Premio Verde del Banco del Estado 2017. Plan de manejo de la microcuenca San Pedro Mártir y de la reserva Pisaca, como zona de recarga de las fuentes que abastecen de agua para consumo humano a la ciudad de Catacocha*.
- Giraldo, L. (2002). MEMORIAS: HIDROLOGÍA FORESTAL (Influencia de los bosques). 11–12.
- Gonzaga Vallejo, S. L.; Serrano Ojeda, J. A.; & Benavides Muñoz, H. M. (2018). Investigación y extensión universitaria. *Gestión de aguas subterráneas en la comunidad de Catacocha, Ecuador*. +E, 7. Ene-dic, 280–289. <https://doi.org/10.14409/extension.v0i7.7072>
- Holling, C. S. (2013). Resilience and stability of ecological systems. *The Future of Nature: Documents of Global Change*, 4(1973), 245-256. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.04.110173.000245>
- MEA, M. E. A. (2005). *Ecosystems and human well-being: current state and trends*. Millennium Ecosystem Assessment, Global Assessment Reports.
- Ministerio del Ambiente (MAE). (2013). *Sistema de Clasificación de Ecosistemas del Ecuador Continental*. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53, Issue 9).
- Myers, N.; Mittermeier, R. A.; Mittermeier, C. G.; Da Fonseca, G. A. B.; & Kent, J. (2000). Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 403(6772), 853.
- OEA, S. G. (1994). *Plan integral de desarrollo de los recursos hídricos de la provincia de Loja*. Loja: Departamento de Desarrollo Regional y Medio Ambiente.
- PHILO (1994). *Plan Integral de Desarrollo de los Recursos Hídricos de la Provincia de Loja*.

Ramón, G. (2015). Quilanga: Historia y perspectiva. Casa de la Cultura Ecuatoriana Benjamín Carrión, Núcleo de Loja.

Ramón, G. (2017). Presentación del Manejo de la cuenca San Pedro Mártir ante Jurado Calificador del Premio Verde del Banco del Estado, M. Albarracín (ed.).

Román, C. J.; González, A. (2014). Implementación de las Competencias Exclusivas del Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Paltas para Garantizar la Conservación, Recuperación y Manejo de Fuentes y Zonas de Recarga Hídrica para Consumo Humano de la Ciudad de Catacocha [Universidad Nacional de Loja]. In Área Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables: Vol. Máster en file:///Users/macintosh/Downloads/Ing. Cristian Jorge Román Prado_Tesis.pdf

TEEB (2010). The Economics of Ecosystems and Biodiversity: Mainstreaming the Economics of Nature: A synthesis of the approach, conclusions and recommendations of TEEB.

Zalewski, M. (2000). Ecohydrology-the scientific background to use ecosystem properties as management tools toward sustainability of water resources. *Ecological Engineering*, 16(1), 1-8.

Zalewski, M. (2018). Ecohidrología como un marco para la mejora del potencial de sostenibilidad de cuencas hidrográficas. In M. Albarracín, J. Gaona, L. Chicharo, & M. Zalewski (eds.), *Ecohidrología y su Implementación en el Ecuador*, pp. 51-59. EDILOJA.

Página web

WEATHERSPARK (15 de 03 de 2021). WEATHERSPARK. Obtenido de WEATHERSPARK: <https://es.weatherspark.com/y/19330/Clima-promedio-en-Catacocha-Ecuador-durante-todo-el-a-%C3%B1o>

Capítulo 5

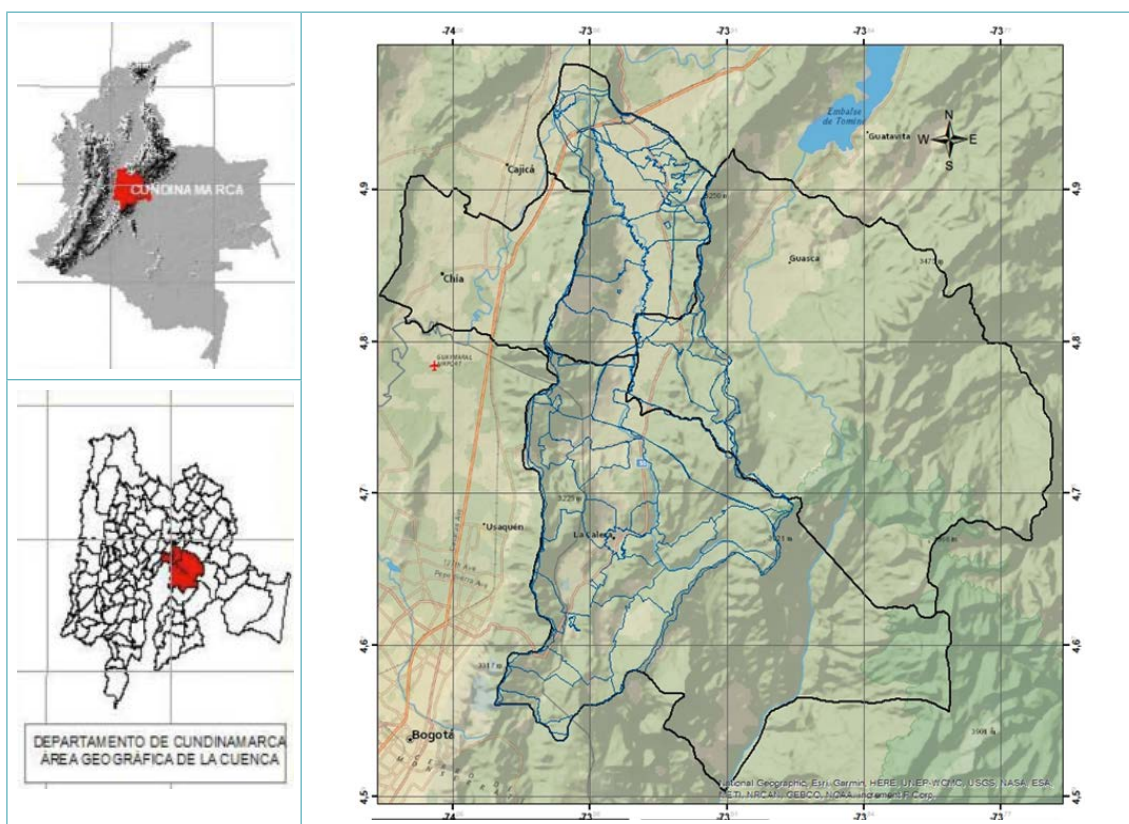
Sitio demostrativo Cuenca del Río Teusacá

José Gaona ⁽¹⁾, Claudia Ramírez, Lina Zuluaga

1. Ubicación

La cuenca del Río Teusacá se encuentra localizada en el altiplano Cundiboyasence. Presenta una forma alargada y bien direccionada con aguas que fluyen desde los altos del Verjón y Los Tunjos en dirección sur-norte hasta desembocar en el sector sureste del Río Bogotá. El valle de la cuenca es una unidad indivisible enmarcada en los municipios de Chía, Choachí, Guasca, La Calera, Sopó, Tocancipá, Ubaque y el Distrito Capital; cuya planificación de los recursos naturales, el uso del suelo y el ordenamiento debe realizarse de manera integral para el manejo conjunto de la cuenca, garantizando el uso del recurso hídrico a la vez que se controla su degradación (Planeación ecológica & Ecoforest, 2006) (Figura 1).

Figura 1. Cuenca del Río Teusacá y los límites de los municipios, Cundinamarca



Fuente: Elaboración propia.

(1) jose.gaona@riomagdalena.org

Dentro de la cuenca hay jurisdicción de seis municipios y 4 autoridades ambientales diferentes (CAR, SDA, CORPOGUAVIO y CORPORINOQUIA), condición que ha llevado a que se presenten falencias en la cooperación interinstitucional para brindar una solución a la problemática ambiental y la resolución de algunos conflictos de competencias en cuanto al otorgamiento de permisos y concesiones, como se evidencia en el diagnóstico de la cuenca llevado a cabo por Planeación ecológica & Ecoforest (2006).

Entre los municipios de La Calera, Sopó y Guasca suman cerca del 90 % del total del territorio de la subcuenca, haciendo la salvedad que entre los dos primeros suman el 98 % de la población de la subcuenca debido a que aportan sus zonas urbanas (Figura 1). La mayor participación la presenta La Calera con el 53 %, seguido por Sopo con casi 28 % y en orden descendente por Guasca, el Distrito Capital, Tocancipá, Choachí, Chía y Ubaque.

El proceso de gobernanza del agua que se ha dado desde 2015 por medio del programa Gran Cuenca del Río Teusacá, liderado por la Asociación de Usuarios Prestadora de Servicios Públicos del Río Teusacá, Progresar E.S.P., ha evidenciado unas fortalezas y debilidades en el manejo del ciclo del agua en la cuenca. La principal fortaleza observada surge del fuerte proceso de cohesión social que invita a una gestión del territorio de abajo hacia arriba (*bottom-up approach*). La principal debilidad observada es la carencia de estudios de caso y ejemplos monitoreados para demostrar buenas prácticas (*best management practices* -BMP) para el mejoramiento del ciclo del agua desde una perspectiva de las soluciones basadas en la naturaleza. El sitio demostrativo de la cuenca del Río Teusacá es un espacio que permitirá profundizar las fortalezas y transformar las debilidades observadas, con un eje articulador: la ecohidrología.

2. Organización formal a cargo

Hay dos aliados estratégicos que conjuntamente buscan cumplir los objetivos planteados tanto a nivel académico/educativo como a nivel de infraestructura para demostrar las diferentes herramientas y soluciones ecohidrológicas. La Asociación de Usuarios Prestadora de Servicios Públicos del Río Teusacá, Progresar E.S.P. y la Universidad Piloto de Colombia son las dos instituciones a cargo del sitio demostrativo. Cada uno de ellas juega un papel dentro del territorio con una importante presencia; una de ellas reconocible la prestación de varios servicios públicos que cuenta con un acueducto que deriva las aguas del cauce principal del Río Teusacá para abastecimiento, y la otra mediante la implantación de un campus universitario con 10 aulas, sin presencia permanente de estudiantes. Cada parte se rodea de diferentes asesores y aliados para dar cumplimiento a sus objetivos dentro del proyecto de largo plazo, convirtiéndose en actores, no solo con interés en el manejo integrado de la cuenca, sino con influencia para la toma de decisiones.

Se ha logrado consolidar un proyecto de ciencia ciudadana a través de dos redes de monitoreo participativo que involucran a más de 110 ciudadanos que habitan la cuenca, quienes de manera voluntaria registran y reportan periódicamente información relacionada con la calidad del agua del Río Teusacá y la biodiversidad presente en el territorio, en favor de la comprensión de las dinámicas locales.

La Universidad Piloto desea generar un laboratorio de innovación en ecohidrología en un lugar de la cuenca, para que la comunidad educativa pueda experimentar desde diferentes materias de varias carreras universitarias y entender cómo los humedales pueden usarse para el tratamiento de agua (calidad y cantidad).

3. Características generales

3.1. Aspectos hidrológicos

Teniendo en cuenta que las cuencas son un sistema integral de interacción ecosistémica y social, estos espacios se convierten en una unidad territorial para la planificación, por esto, es importante conocer las características de las mismas, en el sentido que insta a los diferentes actores a unificar criterios, políticas y herramientas que permitan el uso sostenido de las mismas. Su reconocimiento fomenta y promueve la participación de las comunidades, organizaciones, instituciones con el compromiso tácito de regular los usos.

Para el caso puntual de la cuenca del Río Teuscá, se llevó a cabo el análisis morfométrico de la cuenca mediante la modelación de algunos de los parámetros relevantes. Es importante mencionar que las formas de procesamiento generan variabilidad de datos en comparación con aquellos que en muchas ocasiones son aportados por las entidades gubernamentales. El estudio permite dar cuenta del territorio circundante, y sus características variables como el relieve que posee una cota máxima de 3.624 y una mínima de 2.550 m.s.n.m, con una superficie estimada de 356 km², una altitud media de 3.097 m.s.n.m, y una pendiente con valor del 5 % (Tabla 1).

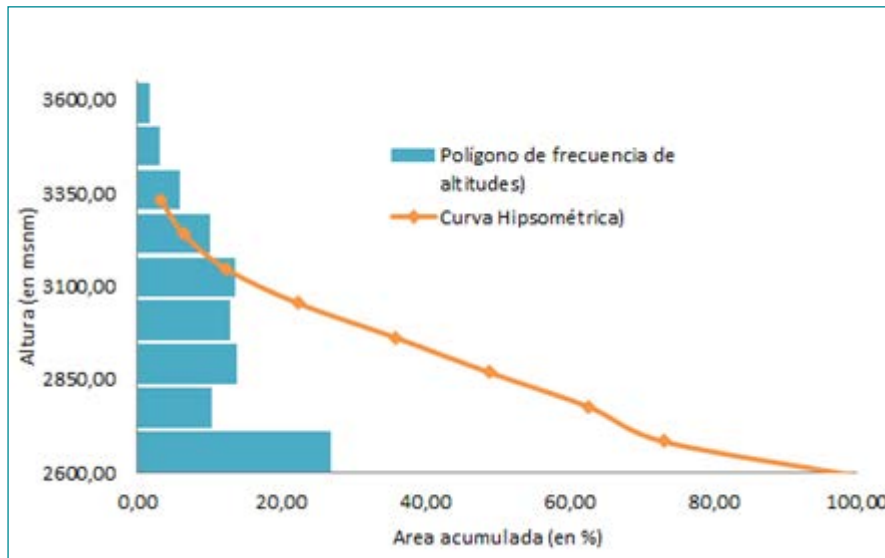
Tabla 1. Parámetros morfométricos cuenca Teuscá

Descripción	Unidades	Valor
De la superficie		
Área	km ²	356
Perímetro de la cuenca	km	128
Cotas		
Cota máxima	msnm	3624
Cota mínima	msnm	2550
Centroide (PSC:wgs 1984 UTM)		
X centroide	m	1013329
Y centroide	m	1020694
Z centroide	msnm	3097
Altitud		
Altitud media	msnm	3097
Altitud más frecuente	msnm	3425
Pendiente		
pendiente media de la cuenca	%	5,38
De la Red Hídrica		
Longitud del curso principal	km	67
Orden de la Red Hídrica	UND	4
Longitud de la red hídrica	km	1200
Parámetros Generados		
Tiempo de concentración	min	856
velocidad	m/s	1,30

Fuente: Elaboración propia.

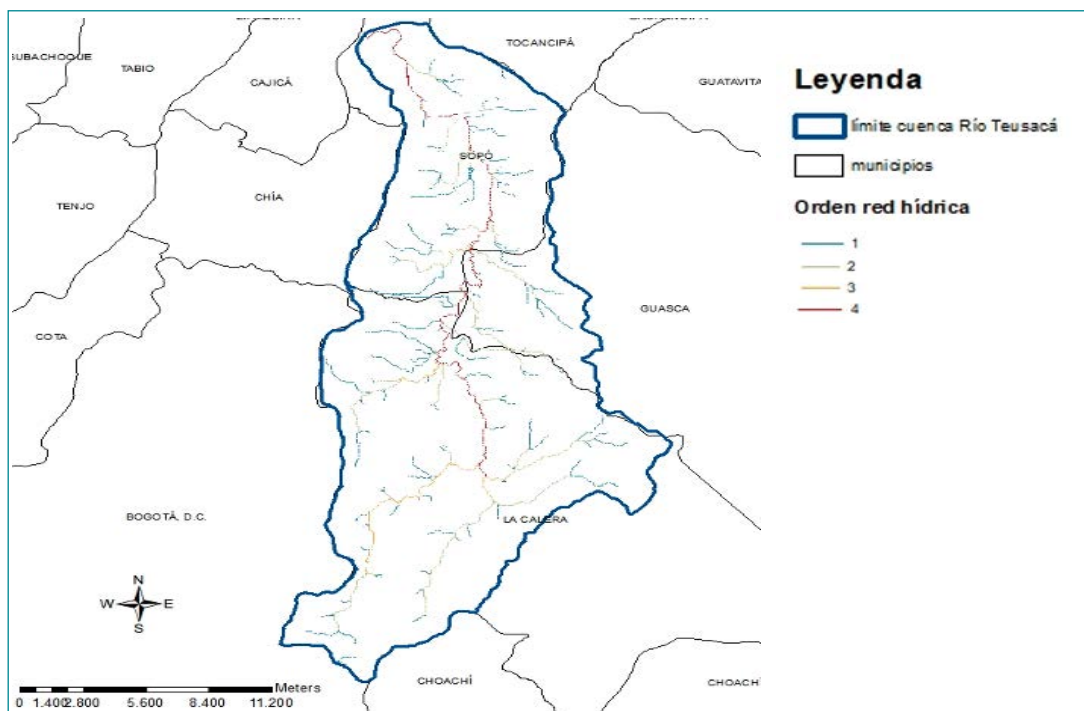
La curva hipsométrica según Strahler (1952) (Figura 2) se asocia a una cuenca de tipo sedimentario (p. 1117). Por lo anterior, los parámetros de tiempo de concentración y velocidad hidrológica se sitúan con valores de 856 min (14,2 h) y 1,3 m/s respectivamente, lo cual permite una dinámica que no representa una amenaza mayor a la hora de establecer escenarios de riesgo. Vale la pena resaltar que para determinar realmente estos escenarios deben modelarse otras variables como el cambio de aptitud y uso de los suelos, la precipitación asociada al cambio climático, temperatura, entre otros, por ello, no son concluyentes los valores aquí relacionados con respecto a la gestión del riesgo.

Figura 2. Curva hipsométrica y frecuencia clasificada de alturas



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3: Longitud de cauce principal y orden de la red hídrica



Fuente: Elaboración propia.

El índice de escasez es alto para periodos secos y medio-alto para periodos húmedos (CAR, 2006). Determinado individualmente para las unidades de suelo (compuesto por texturas moderadamente finas, estructuras moderadas, densidades aparentes medias en suelos originados a partir de rocas y bajas en aquellos que son producto de la evolución de cenizas volcánicas y una alta susceptibilidad a la erosión hídrica cuando son desprovistos de vegetación – CAR, 2006), muestra que para el año seco las condiciones hidrológicas no son las mejores pues se evidencia que existe una fuerte presión sobre el recurso debido a la baja disponibilidad de agua. De acuerdo a resultados obtenidos (Muñoz y Beltrán, 2010) es posible evidenciar que en el año seco se presenta déficit en todos los meses del año, alcanzando un valor de -349,64 mm anuales lo que indica que las precipitaciones tan bajas como las de estos años no suplirían las necesidades mínimas para el abastecimiento de los diferentes usos de los habitantes de la subcuenca del Río Teusacá. En el año medio, las condiciones hidrológicas mejoran un poco, no obstante, el déficit sobrepasa el exceso en un 40 %, haciendo que las condiciones de abastecimiento tampoco sean las más favorables.

4. Reconocimiento socio espacial

El Río Teusacá es considerado una fuente de alta importancia para el suministro de bienes y servicios, desde su nacimiento en el Páramo del Verjón, hasta su desembocadura en el Río Bogotá (Alcaldía La Calera, s.f.) lleva un recorrido que permite a las comunidades de la zona la captación y abastecimiento de recursos para la subsistencia. Desde una visión antropocéntrica, es la función más importante. Adicionalmente hay un sinnúmero de funciones que cumple como cualquier cuerpo de agua

En términos de los resultados de clasificación obtenidos, es posible observar que poco más de la mitad del área de la cuenca (de la distribución de pendiente) se encuentra entre 0 y 10 % (Tabla 2). Esto muestra una distribución espacial relativamente plana y medianamente accidentada en una parte importante de la cuenca. No obstante ello, el 44 % restante presenta pendientes relativamente altas, lo cual genera las características típicas de un río de montaña, ya que gran parte de este porcentaje se concentra en los rangos de pendiente correspondiente a 10-15 %, 15-20 %, y 20-35 %, oscilando entre las clasificaciones de accidentado y escarpado (Solano, 2018).

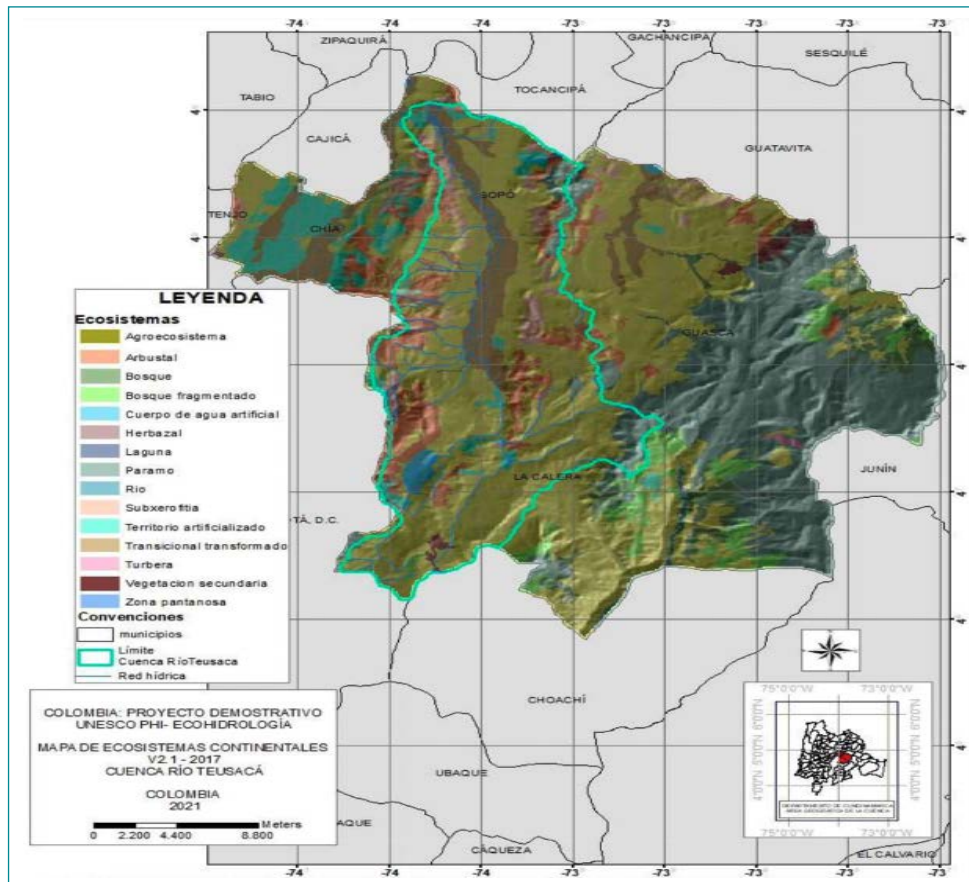
Tabla 2. Distribución y clasificación de pendientes en términos del área abarcada por clase en la cuenca del Río Teusacá

Rango de pendiente %	Número de Celdas	Área (Ha)	% Área	Clasificación
0.0 - 5.0	806565	12602.6	35.718	Llano/Suave
5.0 - 10.0	473446	7397.6	20.966	Accidentado Medio
10.0 - 15.0	389619	6087.8	17.254	Accidentado
15.0 - 20.0	251872	3935.5	11.154	Fuertemente Accidentado
20.0 - 25.0	160204	2503.2	7.095	Fuertemente Accidentado
25.0 - 30.0	93287	1457.6	4.131	Escarpado
30.0 - 35.0	48212	753.3	2.135	Escarpado
35.0 - 50.0	21831	341.1	0.967	Escarpado / Muy Escarpado
> 50.0	13081	204.4	0.579	Muy Escarpado
	2258117	35283.1		

Fuente: Solano, 2018.

De acuerdo a la modelación de los parámetros morfométricos el área total de la cuenca es de 356 km², la longitud del drenaje principal corresponde a 67 km, presentando una pendiente media de 5,3 %, en un territorio que alberga gran diversidad ecosistémica, por lo cual, requiere de un proceso de planificación responsable para lograr la conservación y uso sostenible de la cuenca y la zona circundante (Figura 4).

Figura 4. Mapa de ecosistemas de Colombia. Fuente: IDEAM, 2017



Fuente: Mapa ecosistemas Continentales 100K V2.1, 2017, modificado de IDEAM, 2015.

Como se indicó en la introducción, la subcuenca del Río Teusacá cubre una gran extensión territorial de varios municipios incluyendo la capital del país. Según Planeación ecológica & Ecoforest (2006) “la subcuenca del Río Teusacá es una unidad indivisible enmarcada bajo los municipios de Chía, Choachí, Guasca, La Calera, Sopó, Tocancipá, Ubaque y el Distrito Capital” y hace parte de algunos ecosistemas como páramo, ecosistemas acuáticos y bosques.

En cuanto a las zonas altitudinales, en la subcuenca del Río Teusacá se describe la existencia de dos zonas subpáramo y Andina integrando dos biomas, bosque altoandino y bosque andino, que albergan gran variedad de especies animales dentro de las que se relacionan 307 especies de la Clase Aves, 53 de la Clase Mammalia, 19 de la Clase Reptilia, 9 de la Clase Amphibia y 11 para la Clase Peces. Dentro de la vegetación natural (Figura 4) se relaciona frailejónal (*Calamagrostis* sp – *Espeletia grandiflora*) matorrales de clima frío, rastrosjos. (Planeación ecológica & Ecoforest. 2006). Es importante resaltar que gracias a sus características climáticas, condiciones ambientales, franja altitudinal, entre otros, se presenta gran variedad de especies endémicas.

En este contexto, es importante reconocer que la subcuenca es proveedora de importantes recursos y servicios ambientales, ecológicos, culturales, entre otros, favoreciendo a una parte de las comunidades que está en su ronda. El embalse de San Rafael regula cerca del 50 % de los caudales de la subcuenca del Río Teusacá, lo cual garantiza el abastecimiento a los acueductos presentes en la zona (Empresas Públicas de Medellín –EPM– & Ingenieros Consultores –INGETEC– 2012).

Sin embargo, debido a los cambios en el uso del suelo en los municipios circundantes se presenta una alteración en la cantidad y calidad de los recursos naturales de la zona. Algunos motores de cambio están intrínsecamente relacionados con pastos para ganado, avance de la frontera agrícola y explotación minera, de los más graves, por esto se requiere de procesos de planificación predictiva que no gestionen solamente la protección de los ecosistemas sino que en lugar de “protegerlos” se abogue por aplicar los objetivos y principios de la ecohidrología que son conservar, restaurar, reconocer y gestionar ecosistemas prístinos y modificados para aumentar la prestación de servicios en términos de recursos hídricos y resistencia al cambio global (Della Sala *et al.*, 2018). La problemática de la subcuenca está asociada a la falta de protección de la ronda del río a lo largo de todo el cauce, permitiendo el aporte de concentraciones altas de coliformes debido al intenso pastoreo (Planeación ecológica & Ecoforest, 2006, p. 8).

Uno de los mecanismos para la regulación, manejo y uso de las cuencas es la desarrollada por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Minambiente) a través de la Gestión Integral del Recurso Hídrico (GIRH), que “promueve la gestión y el aprovechamiento coordinado de los recursos hídricos, la tierra y los recursos naturales relacionados” (Minambiente s.f.) así como el Plan de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCA) que se consolida como el instrumento en el cual se establecen los procedimientos para la “planeación del uso coordinado del suelo, de las aguas, de la flora y la fauna y el manejo de la cuenca, en el que participa la población que habita en el territorio de la cuenca” (Minambiente s.f.). Básicamente este o cualquier otro instrumento que se utilice para la regulación de los espacios y/o actividades antrópicas requiere de la voluntad administrativa, ya que son las entidades gubernamentales las que tienen la responsabilidad directa de la gestión. Cabe resaltar que existe un gran interés por parte de la comunidad para conservar la subcuenca así como los ecosistemas aledaños, lo cual es aprovechado por entidades académicas y generadoras de servicios de la zona.

5. Incidencia del cambio climático

Entendiendo que el concepto de cambio global, se define como un conjunto de cambios y transformaciones a gran escala producto de las actividades antropogénicas que afectan a nuestro planeta (Centro de Cambio Global Universidad Católica de Chile). Ello conlleva a una gran modificación de la biosfera dando lugar a un desbalance que da lugar a un sinnúmero de impactos que van desde la pérdida de especies vegetales y animales, variabilidad en los niveles del mar, aumento en los índices de morbilidad y mortalidad por contaminación, enfermedades para la población y especies, disminución de las tasas de productividad de los suelos. Por esto, es importante analizar de manera más detallada los pronósticos realizados para Colombia con el fin de comprender las dinámicas venideras para adaptar medidas que contribuyan en la mejora de la calidad medioambiental.

El Panel Intergubernamental de Cambio Climático indica que los cambios a gran escala en el sistema climático persistirán al menos durante algunos decenios provocando importantes perturbaciones en los sistemas humanos y naturales (IPCC, 2013). Partiendo de esta premisa es importante considerar que el actuar humano requiere de un gran compromiso inmediato para la implementación de políticas tanto a escala mundial como nacional para hacer frente a este grave fenómeno. Es así como Colombia creó el proyecto piloto nacional de adaptación al cambio

climático (INAP). A partir de los diferentes estudios globales se ha generado información que permita la adopción de medidas de adaptación a los impactos del cambio climático. El IPCC generó escenarios mediante modelación de emisiones globales así como también las probables circunstancias que podrían ocurrir en el futuro basándose en el consumo de combustibles fósiles, el comportamiento de la economía y el crecimiento de la población mundial (IDEAM, 2010, p. 12).

La base para la generación de información en Colombia está dada por los escenarios Special Report on Emission Scenarios (SRES). Para la modelación en prospectiva es necesario tener en cuenta “cuatro familias básicas de escenarios de emisiones de gases efecto invernadero determinadas por las posibles futuras realidades en cuanto a carácter demográfico, económico, uso de energía, sostenibilidad” (IDEAM, 2010, p. 33).

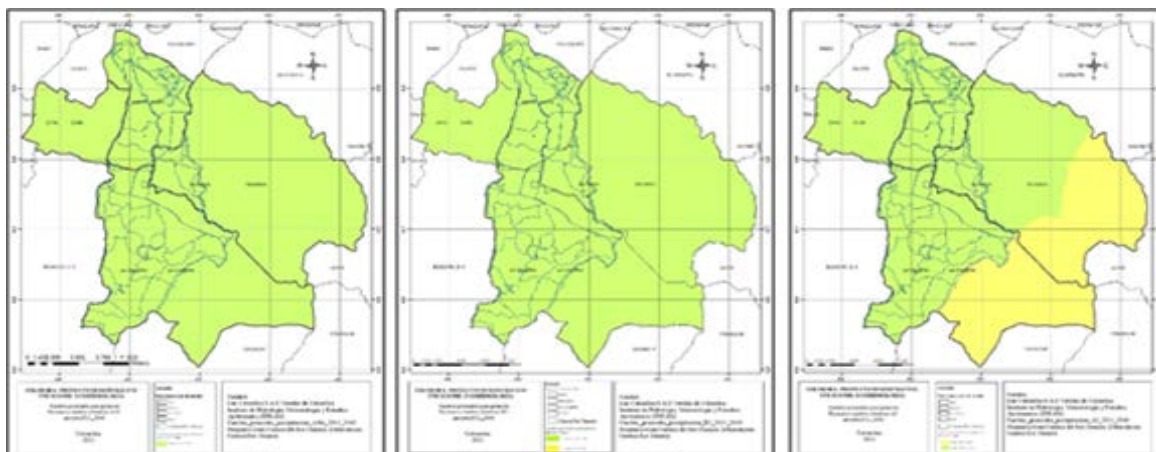
A continuación, se describen las características de cada escenario descritas por el IDEAM en la guía de escenarios de cambio climático:

1. Familia A = economía básicamente no influenciada por la sostenibilidad, es decir, por actividades antropogénicas alejadas de la filosofía de cuidado del medio ambiente y restricción en las emisiones de contaminantes al aire y al agua.
2. Familia B = economía que apunta a la sostenibilidad del medio ambiente
3. Familia 1 = La población del mundo disminuye después de un máximo en 2050
4. Familia 2 = La población del mundo continúa creciendo (en A2 más rápido que en B2)

Se tiene en cuenta el tipo de combustible predominante para definir escenarios con variaciones en este sentido así:

5. T = Combustibles renovables.
6. B = Combustibles basados en mezclas.
7. FI = Combustibles fósiles.

Figura 5. Cambio promedio de precipitación escenarios A1B, A2, B2, periodo 2011-2040



Fuente: Cambio promedio de precipitación escenarios A1B, A2, B2, periodo 2011-2040. Modificado de IDEAM (2015).

Tabla 3. Características de los escenarios

Característica	B1	A1T	B2	A1B	A2	A1F1
Población máxima	X	X		X		X
Crecimiento demográfico constante			X		X	
Economía regionalmente orientada			X		X	
Servicio global e información de la economía		X		X		X
Desarrollo rápido y convergente	X	X		X		X
Desarrollo lento, regional y fragmentado			X		X	
Énfasis en la sustentabilidad	X		X			
Energía basada en hidrocarburos						X
Energía mixta			X	X	X	
Energía basada en combustibles renovables	X	X				

Fuente: IDEAM, 2010, Guía de procedimiento para la generación de escenarios de cambio climático regional y local a partir de los modelos globales. Consultado el 20 de febrero de 2021.

En este contexto y con el propósito de hacer un reconocimiento a las posibles variaciones que se presentarán en la zona objeto del presente análisis se utilizó la modelación realizada por el IDEAM. A continuación se contextualizan los resultados para los escenarios A1B, A2, B2 para el periodo 2011-2040 (Figura 5, Tabla 4).

Tabla 4. Cambio promedio de precipitación escenarios A1B, A2, B2, periodo 2011-2040

NOMBRE	CATEGORÍA A1B	CATEGORÍA A2	CATEGORÍA B2	CAMBIO PROMEDIO PP
Río Bogotá	Entre -30 % a -10 %	Entre -30 % a -10 %	Entre -10 % a 10 %	-10 % a 10 %
Embalse del Guavio	Entre -30 % a -10 %	Entre -10 % a 10 %	Entre -10 % a 10 %	-10 % a 10 %

Fuente: Elaboración propia a partir de información de IDEAM, 2010.

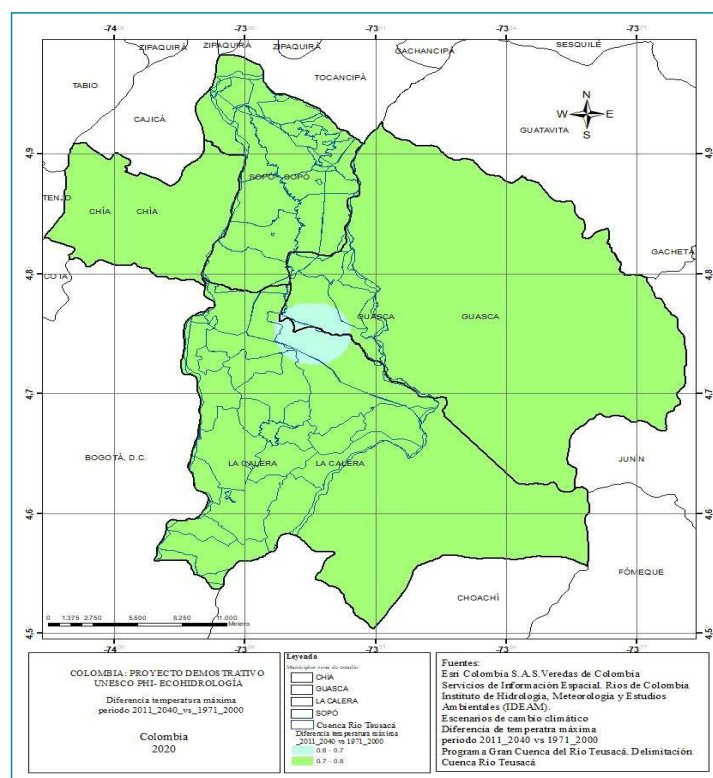
Las categorías analizadas muestran para el escenario A1B una tendencia negativa entre -30 % a -10 % para el total de la zona analizada, puntualmente se refiere a una proyectada disminución de la precipitación con las drásticas consecuencias que ello implica. Para la categoría A2 el escenario anterior se mantiene para la zona correspondiente al Río Bogotá, sin embargo, para los tres restantes sectores hay una oscilación entre -10 % a 10 %. La incertidumbre del comportamiento tiene variabilidad de aumento y disminución en las mismas características de la modelación, considerando que parte de esa oscilación depende de la disponibilidad y calidad de la información empleada para el proceso.

Para la categoría B2 se presenta la mayor variabilidad de los tres escenarios, siendo el más representativo aquel para el sector del Río Guatiquia con un valor entre 10 % a 30 % dando lugar a un aumento significativo de la precipitación. Teniendo en cuenta la relación con las demás zonas de análisis es importante resaltar que este río que si bien nace en el páramo de Chingaza, su recorrido es hacia el departamento del Meta donde las condiciones ambientales y ecosistémicas varían totalmente, siendo un lugar cálido, de planicies, praderas y diferentes ecosistemas a los presentes en los demás sectores de estudio. Respecto a las tres zonas restantes, el valor arrojado varía entre -10 % a 10 % manteniendo concordancia con los resultados obtenidos en el escenario A2. Finalmente, el IDEAM realizó una modelación del cambio promedio de precipitación multiescenario para estimar la variabilidad del país. Para el presente análisis se usó la información

correspondiente al periodo 2011- 2040 obteniendo como resultado valores de -10 % a 10 % el cual es un valor tendencial y casi constante en relación a los indicados en la descripción de las anteriores categorías.

Con relación a la diferencia de temperatura máxima en los periodos 2011-2040 vs. 1971-2000 los incrementos varían en un rango de aumento del 0,6 °C a 0,8 °C (IDEAM, 2015) (Figura 6). Estos valores representan una grave y permanente amenaza para los ecosistemas de la zona debido a la fragilidad que poseen, lo cual incide directamente en los servicios que ofrecen. Según las proyecciones realizadas por el IDEAM “los posibles valores promedio, máximo y mínimo del cambio de la temperatura media en Colombia para los periodos 2011-2040, 2041- 2070 y 2071-2100, mostrarían los aumentos más significativos en la región andina, especialmente en las zonas de alta montaña” (IDEAM *et al.*, 2017).

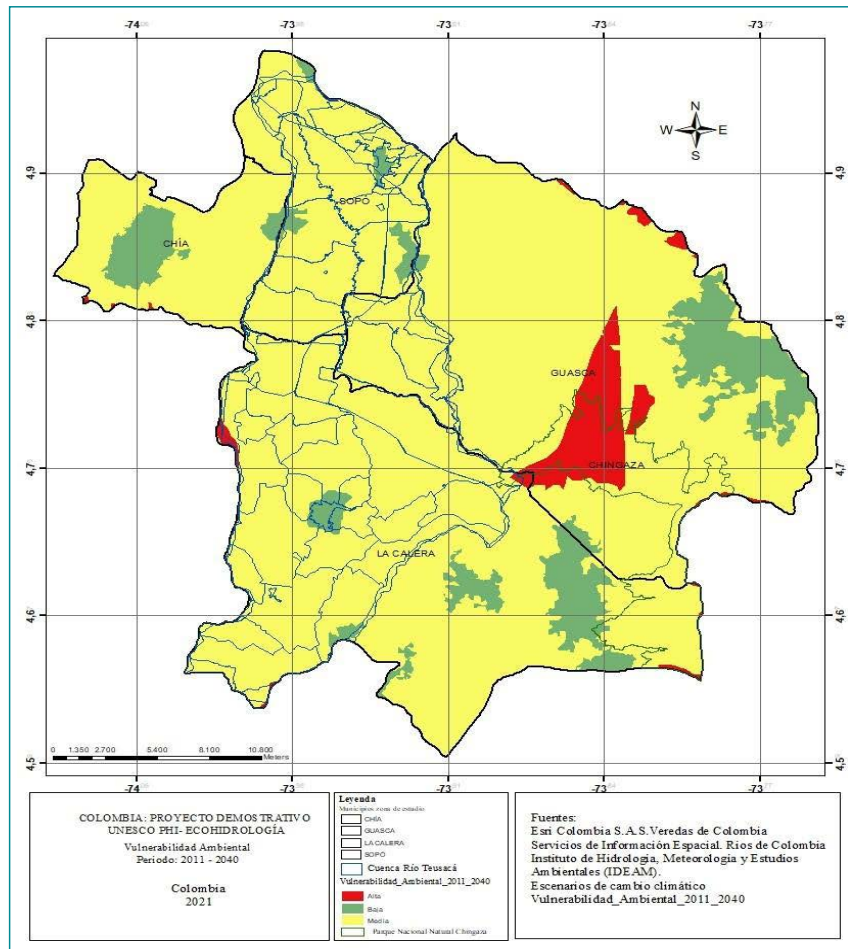
Figura 6. Temperatura máxima en los periodos 2011-2040 vs. 1971-2000



Fuente: Modificado de IDEAM, 2015.

Conservación Internacional (s.f.) manifiesta que las variaciones de este tipo generarán cambios significativos en la estructura y por ende funcionalidad ecológica de cerca del 70 % de estos ecosistemas, incidiendo directamente sobre la producción y regulación hídrica de la cual dependen las actividades productivas y el abastecimiento para el consumo de un alto porcentaje de la población colombiana. La vulnerabilidad ambiental (Figura 7) muestra en proyección cual sería la incidencia directa en los ecosistemas de la zona por lo cual en ningún escenario las modificaciones proyectadas en precipitación y temperatura son alentadoras. La posible variación tiene una gran escala dado que repercutirá enormemente en los territorios teniendo en cuenta la variabilidad, fragilidad, calidad de los ecosistemas, entre otros, por lo cual es urgente que las instituciones aúnen esfuerzos y tomen acciones que favorezcan realmente la adaptabilidad al cambio climático. Así mismo, y teniendo en cuenta que la población tiene una relación intrínseca con el medio, estas políticas no solo deben favorecer la conservación y uso sostenido de los recursos, sino que a su vez deben disminuir la presión sobre el ambiente logrando la cobertura de las necesidades básicas.

Figura 7. Mapa de vulnerabilidad ambiental.



Fuente: Mapa de vulnerabilidad ambiental periodo 2011-2040. Modificado de IDEAM, 2015.

6. Descripción ecológica

La subcuenca del Río Teusacá se caracteriza por presentar un elevado potencial de nacimientos de agua, especialmente en lo concerniente a los ecosistemas de la vereda El Hato, el Parque Ecológico Matarredonda, bosques de la vereda Canavita. El bosque altoandino se encuentra representado por los relictos de bosque secundario y primario de la Reserva Forestal de Pionono. La presencia del embalse San Rafael le da a la subcuenca un potencial hídrico importante para la ciudad de Bogotá. Los ecosistemas típicos de esta subcuenca se representan por: Bosque altoandino de la Vereda El Hato, Bosque altoandino Reserva Forestal de Pionono, Embalse San Rafael, Páramo el Verjón y Parque Ecológico Matarredonda Bosques de la Vereda Canavita Humedales de El Fraylejonal (Planeación ecológica & Ecoforest, 2006).

De acuerdo con lo planteado en estudios que respaldan la formulación del POMCA del Río Bogotá (Planeación ecológica & Ecoforest, 2006), la problemática de la subcuenca está asociada a la falta de protección de la ronda del río a lo largo de todo el cauce permitiendo el aporte de concentraciones altas de coliformes, debido al intenso pastoreo. En cuanto a la presencia de coliformes fecales, en el año de 1988 este parámetro alcanzó un valor promedio de 53.190,74 (NMP/100ml), y para el año 2008 alcanzó un valor promedio de 353.833,33 (NMP/100ml), lo que revela un exagerado deterioro de la calidad del agua por presencia de coliformes totales (Muñoz y Beltrán, 2010).

En la parte alta de la subcuenca se presentan actividades agropecuarias intensivas mediante cultivo de papa principalmente, y en la parte baja se concentran actividades agroindustriales de ganadería y cultivos de flores. La consecuencia es que los monocultivos son más vulnerables a las perturbaciones hidroclimáticas y ecológicas. Por ejemplo, los monocultivos son menos capaces de hacer frente a los extremos climáticos, como las sequías, lo que conduce a ciclos de retroalimentación positiva en los que los climas más húmedos se vuelven más húmedos y los climas más secos se vuelven más secos, y estos a su vez se ven agravados por el cambio climático (Huntington, 2006 en Leiva *et al.*, 2020).

7. Contexto socioeconómico

Para finales de los años treinta la extensión de la ganadería y la deforestación en las laderas de los cerros era evidente. La expansión urbana, el avance de industrias contaminantes, la utilización de agroquímicos y pesticidas para mejorar la producción agrícola tomaban protagonismo en la cuenca del Río Teusacá (Van der Hammen, 1998 y CIFA 1999, en Carrero, 2012). Luego en los años cincuenta y sesenta, las autoridades ambientales de la época empiezan a desarrollar proyectos de restauración del ecosistema boscoso de los cerros, con la plantación de especies foráneas como pinos (*Pinus patula*), eucaliptos (*Eucalyptus globulus*), cipreses (*Cupressus spp.*) y acacias (*Acacia spp.*), bajo el supuesto de proteger las cuencas y devolver la cobertura vegetal a las áreas taladas y deterioradas desde la época de la colonia (Camargo, 2001 y Contreras 2004 en Carrero, 2012). De igual forma, esta iniciativa cumplía un segundo propósito el cual estaba encaminado a promover las plantaciones forestales para la producción de pulpa para papel y madera (DAMA y Bachaqueros, 2000; Camargo, 2001).

Según reporta CIFA (1999), en la cuenca del Teusacá, durante los años ochenta y noventa se recrudecen los procesos de loteo ante la presión de la ocupación urbana. Este fenómeno promovió la creación de barrios obreros y de escasos recursos, específicamente en el borde de los cerros, en inmediaciones del territorio de los verjones, aprovechando la creciente urbanización de estos espacios a partir del loteo de grandes fincas y de la actividad minera registrada en la zona desde las primeras décadas del siglo XX. A finales de 1980 y comienzo de los noventa, el proceso de fragmentación predial sigue creciendo en gran parte del territorio. Paralelamente la actividad pecuaria continúa su incremento en la cuenca evidenciado por los estudios de paisaje de Puentes (2003), Contreras (2004) y Lozano (2007) donde dominaban las coberturas de pastizales asociadas a parcelas de cultivos agrícolas en su mayoría monocultivos de papa. De igual forma, [...] aumentan los dueños ausentistas que contaban en sus predios con plantaciones forestales ya sea para la producción de pulpa para papel o madera, actividad presente hasta inicios del siglo XXI (Carrero, 2012, pág. 36).

El índice de necesidades básicas insatisfechas para la cuenca del Río Teusacá es más alto en promedio para la zona rural que para la zona urbana con una diferencia de 8 puntos porcentuales, lo que demuestra una situación de desequilibrio entre estos sectores (Planeación ecológica & Ecoforest, 2006). Hay 50 planteles educativos distribuidos en 22 urbanos y 28 rurales, de los cuales 18 son privados y 32 son públicos. La Calera es quien más aporta planteles educativos con un total de 27 con 9 urbanos y 18 rurales.

El 90,9 % de los predios de esta área de drenaje tienen entre 0 y 5 hectáreas de superficie y a pesar de esta amplia mayoría ocupan apenas cerca del 27 % del área total. El 6,96 % de los predios tiene entre 5 y 20 hectáreas y ocupan la mayor superficie de la subcuenca con 30 % de su área. Se cuenta con 39 predios de más de 100 hectáreas que ocupan el 23,9 % de la subcuenca (Planeación ecológica & Ecoforest, 2006). Respecto la tenencia de la tierra la concentración se

ve reflejada en la siguiente reflexión dentro del componente general en la formulación del plan de ordenamiento territorial del municipio de La Calera: “Existe una diferencia muy marcada entre la tenencia de la tierra donde en la parte plana se encuentran grandes haciendas dedicadas tanto a la agricultura como a la ganadería en las cuales los propietarios tienen recursos suficientes para una buena tecnificación. En las laderas, por el contrario, la mayoría de los predios agropecuarios son pequeños con familias que tratan de subsistir en medio de la pobreza y necesidades, sin tener recursos para atender debidamente la defensa de los terrenos. Explotan y destruyen la capacidad productora que la naturaleza demoró siglos en formar, invirtiendo cada vez menos dinero y esfuerzo en la producción de las cosechas, ejerciendo a la vez una gran presión de uso sobre los terrenos”.

Para el caso colombiano, la violencia resulta uno de los temas de mayor sensibilidad y expresión de violencia sistemática, pudiéndose indicar que en 2019 se alcanzó la cifra de 64 asesinatos a líderes defensores del agua (Global Witness, 2020). Dicha circunstancia, más que replegar a las comunidades ha promovido el fortalecimiento y visibilización de la agenda comunitaria en defensa del territorio y sus recursos en procesos organizativos y de acción colectiva (Cortés, 2019). En la cuenca del Río Teusacá no ha habido asesinatos de líderes ambientales, sin embargo, el 8 de noviembre de 2018 fue asesinado Carlos Barón, líder social y presidente de la Junta de Acción Comunal de la vereda Tunjuaque.

8. Comunidad y actores gubernamentales

La preocupación mundial por los recursos naturales y su gestión ha estado latente particularmente en las dos últimas décadas; adicionalmente, la incapacidad de resolver el bienestar de los seres humanos por la superposición del desarrollo económico, ha tenido implicaciones en el deterioro constante de los ecosistemas del planeta (Rodríguez y Cubillos, 2012). El papel de la gobernanza como marco de gestión de los recursos naturales en el Programa de la Gran Cuenca de Río Teusacá se plantea como respuesta a la preocupación permanente de progresar para contribuir activamente en el cuidado y protección de la cuenca, apoyado en los procesos participativos locales.

Por otra parte, se considera que los mecanismos de gobernanza pueden partir de la comprensión de diversas dimensiones que requieren atención y no son necesariamente compatibles o están relacionadas con el desarrollo económico de una región (Pahl-Wostl *et al.*, 2013). Se considera pertinente entonces partir de la aclaración conceptual de los dos elementos: la gobernabilidad y la gobernanza.

En el Congreso Internacional de Gobernabilidad y Gobernanza de los Territorios en América Latina, se define la gobernabilidad como la capacidad de las sociedades para mejorar sus instituciones a través de modalidades del poder, es decir la consolidación de la democracia como eje rector en la toma de decisiones de los Estados. Por su parte Global Water Partnership, la define como la capacidad social, económica y administrativa de las comunidades, organizaciones e instituciones, para gestionar el manejo de los recursos hídricos y de los servicios asociados al agua a distintos niveles sociales; incluyendo también los procesos y mecanismos a través de los cuales estos actores, articulan sus intereses comunes, a partir del establecimiento de derechos, normas y obligaciones (Guerrero y Zuluaga, 2017).

El concepto de gobernanza parte de una comprensión más integral, en la que intervienen no solamente el hecho biofísico de los recursos, sino que a su vez reconoce los sistemas que interactúan en torno a ella. Se plantea entonces un escenario en el que los recursos se investigan y planean desde la lente del gobierno entendido como la administración de estos por parte de los actores y sistemas complejos que generan presión sobre el recurso (Roger y Hall, 2003). Del

mismo modo, Brondizio, Ostrom y Young (2009), presentan una visión holística del ambiente, en la que se identifican muchas dimensiones interactuando con el entorno entre sí y, a diferentes niveles y escalas espacio temporales; se concibe el territorio como un sistema conformado por unos niveles de complejidad que implican la interacción permanente de los agentes vinculados. Los autores resaltan la importancia de la dimensión social y la interconectividad, ya que son estas interacciones las que definen la trayectoria de los ecosistemas en el tiempo. Se concluye entonces que el diseño de una gobernanza multinivel implica incorporar las dinámicas que se deben revisar y ajustar permanentemente, haciendo énfasis en el valor de las instituciones, de la generación de confianza y legitimidad (Guerrero y Zuluaga, 2017).

La gobernanza no es una ciencia o una disciplina, es un proceso social. Aunque el término parece nuevo o poco familiar, no se trata de un fenómeno propio de nuestra época; la gobernanza es inherente a toda sociedad porque siempre es necesario tomar decisiones (Andrade *et al.*, 2011). Todas las sociedades establecen sus propios procesos de toma de decisión, sistemas de poder, mecanismos de resolución de conflictos y sus propias normas, reglas e instituciones (FFLA, 2015). La gobernanza ambiental está relacionada con la conservación de los recursos naturales y las áreas protegidas, contemplando también otros espacios como la gobernanza indígena e incluso puede insertarse en el debate socio-ambiental y político sobre el cambio climático (Andrade *et al.*, 2011). Assmus (2015) sugiere que se incentiven espacios de reflexión conjunta entre el Gobierno, la sociedad civil y el sector privado, y este en particular que se plantea en la Cuenca del Río Teusacá, servirá para contribuir a puntualizar la gestión ambiental hídrica con horizontes de conservación y progreso que permitan otorgarle a su gobernabilidad un norte claro, transparente, participativo y de manejo integral coherente con el desarrollo.

Progresar a través del programa socioambiental Programa de la Gran Cuenca de Río Teusacá tiene como fin último la transformación de la cuenca desde la gobernanza mediante un enfoque por medio del cual se reconoce que en el territorio hay diferentes actores y diferentes dimensiones que interactúan entre sí. Por lo tanto, hay un entendimiento que hay diferentes miradas e intereses con respecto a los recursos de uso común. La aproximación que se tiene es propositiva y busca generar soluciones para que todos los actores presentes en el territorio realicen acciones articuladas en favor de la sostenibilidad del recurso hídrico.

A partir de la comprensión objetiva de lo que está sucediendo en la cuenca los mismos ciudadanos son capaces de modificar las prácticas para trabajar en favor de la sostenibilidad basados en ciencia ciudadana.

La calidad del agua y hábitat son elementos dinámicos y variables a lo largo de la cuenca y en la medida que la ciudadanía comprende la información cuantitativa generada por la comunidad facilitará la comprensión de las dinámicas de la cuenca favoreciendo el tejido social en permanente evolución. Se concluye luego de varios años de movilizar a la gente, que generar conocimiento genera mejores comportamientos. Para construir mancomunadamente el futuro de la cuenca se trabaja con 5 segmentos de la sociedad con una mirada incluyente:

- Sociedad civil
- Academia
- ONG
- Sector público
- Sector privado

9. Servicios ecosistémicos que presta

El cauce principal del río es la fuente de agua para uno de los acueductos de la Cuenca, el de Progresar E.S.P, por lo que se tiene que el principal servicio ecosistémico de este cuerpo de agua es el de abastecimiento. Sin embargo, no es solamente el cauce principal prestador de servicio ecosistémicos, en la cuenca hay biomas de nevado, superpáramo, páramo, subpáramo, bosque alto andino y bosque andino, los cuales contienen ecosistemas que prestan los servicios de regulación hídrica, purificación del aire, fertilidad del suelo, purificación de agua y suelo, favorecimiento de la diversidad de microbiota y materias primas, regulación de la temperatura, prevención de la erosión, fijación de carbono, producción de agua, retención de suelo, provisión de alimento, provisión de diversidad y fecundación de cultivos (Barrera, 2018). El daño causado a estos biomas afecta los servicios ecosistémicos mencionados lo cual fue verificado mediante un trabajo de tesis que empleó Modelo SWAT concluyendo que en las zonas donde la mayoría de los usos correspondían a actividades agrícolas, las tasas de generación y almacenamiento hídrico disminuían (Solano, 2018).

Estos cambios en el uso del suelo si no se ven acompañados de una estrategia, seguirán un rumbo sin ningún resultado positivo para el sistema socio-ecológico de la cuenca del Río Teusacá, dando paso a una grave crisis, alineada con el agotamiento de la capacidad de resiliencia del sistema (ya excedida en muchos ecosistemas del mundo (Rockström *et al.*, 2009) y por tanto si se excede el rango de autodepuración que puede tener el ecosistema (medido por la diferencia entre el límite alto y el bajo de tolerancia a una condición externa (i.e. temperatura, contaminación, etc.) el ambiente se encontrará en un estado de estrés más frecuentemente (Chapin, 2011, p. 342). Alternativamente, si la resiliencia ecosistémica es una meta a largo plazo y se plantean estrategias para reducir los periodos de estrés en el sistema (i.e. menos tiempo de estrés hídrico medido por un balance hídrico negativo en época de sequía) ello puede lograrse mediante sistemas de recarga en épocas de lluvia.

10. Objetivos

Los Sitios Demostrativos tienen como objetivo reducir las brechas de conocimiento para abordar los problemas ecohidrológicos relacionados con los ecosistemas acuáticos, aspecto que se propone desarrollar mediante actividades en esta cuenca. Así también, se busca demostrar cómo un mejor conocimiento de las interrelaciones entre el ciclo hidrológico, los medios de vida y los ecosistemas puede contribuir a una gestión del agua más rentable y respetuosa del medio ambiente. Finalmente se pretende cumplir el objetivo de transferir tecnología a través de los vínculos Academia-Empresa para armonizar el potencial del ecosistema con las necesidades de la sociedad.

Cada caso de estudio dentro de la cuenca tendrá sus objetivos específicos; por ejemplo, en el caso de los estudios del laboratorio de innovación se pretende medir las reducciones de los picos de lluvia que se observarían así como la implicación que ello implicaría dentro del ciclo hidrológico en situaciones de estiaje. Para este como para cualquier otro caso de estudio dentro de la cuenca se van a generar guías de implementación de soluciones ecohidrológicas con un enfoque educativo para formar a los diferentes actores de la cuenca en el manejo de agua lluvia y las formas en las que se puede estudiar para tener mejores prácticas con relación a las convencionales. Visibilizar el ciclo del agua a la comunidad y la importancia del estiaje en el mismo y demostrar cómo se puede gestionar el agua para autogestionar la biota, volviendo más resiliente el ecosistema.

Finalmente, se promoverá la gobernanza del agua en la cuenca abarcando las interacciones entre estructuras, procesos y tradiciones que determinan cómo son ejercidos el poder y las responsabilidades, cómo se toman las decisiones y cómo tiene voz los ciudadanos y otros interesados.

11. Modelo conceptual de funcionamiento

Para entender mejor cómo la ecohidrología puede aportar al desarrollo y gestión territorial es importante entender el concepto como un factor para maximizar las oportunidades para la rehabilitación de los hábitats acuáticos. Por medio de diferentes métodos se convierten (o eliminan) las amenazas en oportunidades. ¿Cuáles serían las amenazas? Por ejemplo la mitigación del balance hídrico negativo (sobre todo de agua subterránea), de la contaminación, la mitigación de sequías e inundaciones catastróficas. O la aproximación tradicional de los ecosistemas desde un punto de vista mecanicista y no evolutivo/ecosistémico. Por ejemplo, si se habla del tema de las inundaciones, cuando hay precipitaciones intensas y un cambio de cobertura vegetal y se eliminan los bosques para transformar el paisaje a potreros o urbanizaciones, para alimentar animales o para recreo, se está disminuyendo el potencial de infiltración en el suelo en porcentajes importantes y consecuentemente las gotas de agua lluvia van a llegar mucho más rápido a los cursos de agua y lo harán a mayor velocidad mayor alcanzando logares propensos a una inundación, inclusive arrastrando una mayor cantidad de sedimento cuya depositación disminuirá la capacidad de transporte de las aguas. Ello por lo genera da lugar a intervenciones de adecuación hidráulica clásica (canalización).

Por el contrario en el caso de la mitigación de las sequías, bajo el mismo esquema de transformación del paisaje, la disminución del enraizamiento y la compactación del suelo disminuirá la capacidad de la infiltración de agua superficial y consecuentemente de la percolación limitando la recarga de las aguas subterráneas y el caudal base. La reversión de estos procesos como una medida concreta permitirá que los ecosistemas sean más resilientes a los periodos de estiaje, promoviendo a la vez la renaturalización de los cuerpos de agua, con los consecuentes beneficios en paralelo.

En la medida en que las comunidades entiendan estos conceptos por medio de una demostración física, se evidenciará la posibilidad de brindar ayuda con casos prácticos, y por ejemplo mitigar inundaciones en las épocas de lluvias favoreciendo el almacenamiento de agua en las aguas subterráneas y subsuperficiales para las épocas secas. La ampliación de oportunidades se asocia al uso de las propiedades del ecosistema como una herramienta de gestión, por medio del mejoramiento de la capacidad de asimilación del ecosistema mediante regulación de procesos bióticos y abióticos. En la Figura 8 se resume el funcionamiento anteriormente mencionado.

Figura 8: Biofiltro secuencial. En la parte izquierda, el agua pasa por un filtro biogeoquímico compuesto por piedra caliza y dolomita: por la capacidad de fijar biopelículas microorganismos. con una relación de 10 (caliza) a 1 (dolomita)



© José Gaona, Claudia Ramírez y Lina Zuluaga

Para el Sitio Demostrativo se han identificado dos grandes intervenciones que deberán monitorearse en la cuenca del Río Teusacá. La primera de ellas es el sistema de biofiltro secuencial que comprende tres zonas (Figura 8). La zona de sedimentación está delimitada por un dique de arcilla que sobresale 50 cm de la superficie. El filtro biogeoquímico está compuesto por grava gruesa acomodada en malla metálica. El humedal construido es de flujo horizontal construido sobre una base de grava gruesa de un metro, seguido por un geotextil permeable y luego tierra negra con vegetación seleccionada para que no tenga que ser irrigada y pueda resistir a las épocas sin lluvia, gracias al flujo constante de agua subsuperficial que trae la pendiente. Tendrá una compuerta para manejar el agua que llega a la primera zona. Este biofiltro puede ser implementado en varios lugares de la cuenca donde haya un arroyo semi permanente. Adicionalmente, se tendrá un recorrido interpretativo para los estudiantes/habitantes de la zona que visiten el lugar. Se desarrollará un sistema de monitoreo continuo de parámetros fisicoquímicos y de cantidad de agua retenida midiendo el tiempo que está se retiene. Así mismo como también con mediciones de la entrada y salida se podrá determinar la cantidad de agua que se percola. Este actividad formará parte de un proceso de gobernanza.

La segunda intervención está relacionada con la restauración de los parches del bosque que habían sido transformados en la cuenca alta a pastizales. Se instalaron 3 parcelas de restauración, diseñadas a partir de relictos de bosques cerca del predio de intervención:

Parcela 1. Santa María de la Hoya del Teusacá, vereda Verjón Bajo - Ubicado en la cuenca Alta del río Teusacá. El objetivo de esta intervención fue brindar cobertura vegetal a la ribera de la quebrada Santos afluente del río Teusacá. La instalación de la parcela contempló la plantación de 500 plántulas de especies nativas. El cambio de uso del suelo es una de las características más importantes, dado que se cambió de ganado a bosque.

Esta intervención, se centra en la optimización de la estructura de las zonas de ecotono, como zonas ribereñas de amortiguación, como una herramienta importante para la reducción de la transferencia de nutrientes desde la cuenca del río aguas abajo y otros beneficiarios.

Foto 1: Voluntarios sembrando plántulas. Cortesía programa gran cuenca del río Teusacá.



© José Gaona, Claudia Ramírez y Lina Zuluaga

Parcela 2. Wuabaca, vereda el Rodeo - cuenca alta del río Tusacá: Enriquecimiento del hábitat de especies endémicas del alto valor ecológico en la región enfocada en aumentar la biodiversidad, especialmente del ave endémica Chamiserito cundiboyacense (*Synallaxis subpudica*). Se plantaron (250 individuos) de especies nativas.

La elección de este sitio se debe a que en esta vereda se tienen registros históricos de la presencia de esta ave emblemática de la región.

Parcela 3. Santa Ana de la Hoya del Teusacá - vereda Verjón Bajo: Ubicado en la cuenca Alta del río Teusacá se encuentre el predio para controlar una especie invasora (retamo espinoso). Se plantaron 500 individuos de especies nativas. Adicionalmente se realizó un taller de siembra de semillas dirigido a niños.

Esta intervención tiene lugar muy cerca de la primera, incentivando el patrón de aumentar la conectividad ecológica del paisaje.

En resumen, la cuenca alta se ha identificado como el lugar estratégico para incrementar la infiltración de agua lluvia y de esa forma aumentar el flujo hidrológico de forma vertical y reducir el flujo horizontal del agua lluvia. Con varios beneficios paralelos como la construcción de la comunidad y la apropiación del monitoreo comunitario con visión a largo plazo.

12. Medidas y acciones ecohidrológicas a demostrar

En las dos intervenciones (i.e. biofiltro secuencial y procesos de restauración ecológica) se quiere estimar la vulnerabilidad de los ríos, embalses, estuarios, etc. que dependen del patrón estacional del ciclo hidrológico y procesos bióticos los cuales pueden ser modificados (o adaptados) por la influencia de la sociedad. Se generará una alianza con un grupo de restauración donde se identificaron 20 puntos de interés ambiental con diferentes criterios:

- sitios que presentaban calidad de agua mala o muy mala vs buena o muy buena,
- riberas sin vegetación vs. riberas con vegetación,

- especies que estuvieran en algún nivel de riesgo.

Con el propósito de mejorar ciertos flujos ecológicos o hidrológicos o de potenciar lo que esté bien, se partió con la hipótesis de que a mayor biodiversidad de especies nativas hay mayor provisión de servicios ecosistémicos. Para comprobar la hipótesis de trabajo se realizó una caracterización de la fauna y la flora del predio antes de la intervención para tener una línea base. Se tiene previsto realizar jornadas de monitoreo análogas cada 6 meses para evaluar los cambios. Se prevé un incremento de las observaciones con relación a la línea base.

Este ejercicio ha permitido materializar el concepto de gobernanza descrito anteriormente. Por ejemplo, los aliados principales son: Bosques y semillas, Silveragro y Cámara Ambiental del Plástico, Progresar E.S.P. (Empresa privada), CAR - Autoridad ambiental (entidad pública). El programa gran cuenca del Río Teusacá genera una plataforma de interacción entre actores involucrados en la gestión integrada de la cuenca.

Otra acción ecohidrológica a demostrar es la regulación dual: la uniformidad de las plantas en las áreas boscosas se ha relacionado con cambios en las precipitaciones al alterar el equilibrio entre el almacenamiento de agua local y la escorrentía y la contribución de la evaporación dentro de una región a la precipitación en otros lugares, con diferentes consecuencias en diferentes zonas climáticas (Levia, 2020). Los legisladores internacionales actuales a menudo consideran los bosques en gran medida en términos del ciclo del carbono sin tener en cuenta las implicaciones para el ciclo del agua. En este sitio demostrativo se pretende demostrar los beneficios de la regulación dual mediante:

Aumento en la infiltración durante temporada de lluvias para mejoramiento de la cantidad y calidad del agua subterránea.

Proceso de implementación:

1. Continuar con el monitoreo comunitario participativo
2. Construcción del sistema de biofiltro secuencial en algún lugar de la cuenca.
3. Implementación de Soluciones Basadas en la Naturaleza en diferentes puntos.
4. Consolidación de aula ambiental y coordinación con diferentes carreras y posgrados de la Universidad para incluir prácticas de temas ecohidrológicos en las clases

Actividades demostrativas pasadas, actuales y futuras:

- Pasadas: Se generó el proyecto escolar artístico llamado Agua-Cero <http://www.aguacerogc.com/items/browse>
- Actuales: Diseños del Laboratorio de Innovación en Ecohidrología - Hacienda San Cayetano y Monitoreo Participativo Comunitario.
- Futuras: Sistema de tratamiento de agua residual con una solución basadas en la naturaleza y aula ambiental- Vereda Yerbabuena. También se modelará con diferentes **softwares** (i.e. InVEST y RIOS) los lugares con mayor potencial para desarrollo de SbN en la cuenca.

Mediciones, investigaciones, y soluciones implementadas:

Red de monitoreo de calidad del agua y biodiversidad en 21 puntos a lo largo de un tramo de 69 km del río donde más de 100 vigías monitorearán desde diferentes puntos seleccionados para tener un análisis de los impactos que ejercen las diferentes presiones que se ejercen sobre el río. Cada 15 días se colectaran muestras de agua para medición de 4 parámetros físico-químicos: temperatura, conductividad eléctrica, pH y oxígeno disuelto. Y una vez al mes se hará un recorrido en uno de los 21 puntos para realizar monitoreo de especies asociadas a diferentes grupos biológicos (hongos,

aves, anfibios, reptiles, insectos y mamíferos. Se tienen identificadas 877 especies en la cuenca, alguna de las cuales presentan algún tipo de amenaza.

Se producirán mensualmente mapas con los resultados del monitoreo participativo comunitario ploteando la calidad del agua del río con los criterios definidos por el IDEAM, registrando el inventario de la biodiversidad encontrada a efectos de socializar los resultados con los diferentes actores de la región, incluyendo entidades gubernamentales, empresas privadas, colegios, universidades, ONG y sociedad civil. Dentro del territorio se han desarrollado varias tesis de maestría y pregrado. Por ejemplo las mencionadas en este texto de Solano (2018), Muñoz y Beltrán (2010) y (Carrero, 2012).

13. Desafíos, oportunidades y lecciones aprendidas

El mayor desafío está dado por la aproximación que ha dado la autoridad ambiental para la adecuación hidráulica del río donde se ha realizado una intervención que dista del enfoque ecohidrológico. “La autoridad ambiental no desconoce que los ríos deben ser vistos como un ecosistema integral, y es consciente de la preocupación que las comunidades, ciudadanos activistas y organizaciones ambientales, tienen respecto a la afectación que recae sobre la biodiversidad. Sin embargo, es importante mencionar que la entidad adelanta el respectivo inventario de fauna y flora para realizar la correspondiente compensación, que una vez realizada en términos de reforestación, permitirá que la fauna que emigró regrese de manera natural atraída por la vegetación ya restaurada” (CAR, 2020). Procesos de renaturalización, acompañados de programas educativos a diferentes niveles se sitúan como la principal oportunidad en la cuenca. Adicionalmente, la oportunidad se centrará en el interés de las empresas privadas por visibilizar sus acciones ambientales y de esa forma articular acciones con los objetivos de largo plazo de las actores gubernamentales.

Las lecciones aprendidas están relacionadas con 3 hipótesis de trabajo de estudios de ecohidrología que ayudan a aclarar el concepto y su aplicación (2000):

- Lograr la comprensión profunda del régimen hidrológico (disponibilidad de agua) y la distribución de la biota en sistemas de corrientes de agua (cuenca).
- Utilización de información ecológica obtenida a escalas menores inferir procesos hidrológicos a escalas mayores.
- Los índices correspondientes a la planificación predictiva y gestión de los recursos hídricos deben basarse en los datos locales e inferencias hidrológicas de procesos a gran escala.

Referencias bibliográficas

Alcaldía de La Calera . (s. f.). Información hidrográfica. Consultado el 21 de febrero de 2021. <https://www.lacalera-cundinamarca.gov.co/MiMunicipio/Paginas/Ecologia.aspx>

Andrade, K. (2011). Gobernanza ambiental en Bolivia y Perú: gobernanza en tres dimensiones: de los recursos naturales, la conservación en áreas protegidas y los pueblos indígenas. Flacso-Sede Ecuador.

Assmus, G. C. (2015). Gobernabilidad del agua en Colombia: dimensiones y contexto. Revista Educación y Desarrollo Social, 9(2), 124-135.

- Barrera, V. (2018) AGUA-CERO: Plataforma digital de arte, educación y curaduría alrededor de la problemática ambiental de la cuenca del Río Teusacá (Cundinamarca). Universidad de Los Andes.
- Brondizio, E. S.; Ostrom, E.; Young, O. R. (2009). Connectivity and the governance of multilevel social-ecological systems: the role of social capital. *Annual review of environment and resources*, 34, 253-278.
- Canchari, E. (2013, 16 de enero). Propiedades Morfométricas Cuenca Hidrográfica con ArcGIS 10 [video]. https://www.youtube.com/watch?v=qmldnqtV_Do&ab_channel=EdmundoCanchari
- CAR (2020). Con obras hidráulicas, CAR busca prevenir tragedias como la registrada hace 9 años en Útica, sin afectar condiciones naturales de los afluentes. <https://www.car.gov.co/saladeprensa/con-obras-hidraulicas-car-busca-prevenir-tragedias-como-la-registrada-hace-9-anos-en-utica-sin-afectar-condiciones-naturales-de-los-afluentes>. (Visitado por última vez el 29/03/2021)
- Carrero, L. (2012). Reconstrucción histórica e interpretación de los procesos de transformación en el uso y manejo del paisaje en la cuenca alta del Río Teusacá. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá.
- Centro de Cambio Global Universidad Católica de Chile (s.f.). Cambio global. Consultado el 1 de marzo de 2021. <https://cambioglobal.uc.cl/comunicacion-y-recursos/que-es-el-cambio-global>
- Chapin III, F. S.; Matson, P. A.; Vitousek, P. (2011). *Principles of terrestrial ecosystem ecology*. Springer Science & Business Media.
- Conservación Internacional (s. f.). Cambio climático. Consultado el 4 de marzo de 2021. <http://www.conservation.org.co/programas/Cambio-climatico/>
- Corporación Autónoma Regional del Guavio & Corporación Autónoma Regional (2016). Formulación del plan de ordenamiento del recurso hídrico de la unidad hidrográfica del embalse de Tominé del cual hacen parte los ríos Siecha – aves y principales tributarios, y de la unidad hidrográfica del Río Teusacá y principales tributarios en las jurisdicciones de la CAR y CORPOGUAVIO las cuales pertenecen a la cuenca del Río Bogotá. Consultado el 17 de febrero de 2021. <https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/handle/20.500.11762/27707>
- Cortés, G. (2019). El Congreso de los Pueblos, acción colectiva intercultural y subjetividades políticas emergentes. Universidad Externado de Colombia. Bogotá.
- Cundinamarca, C. A. R. (2006). Plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica del Río Bogotá.
- Esri Colombia S.A.S. (2020, 1 de septiembre). Veredas de Colombia. <https://datosabiertos.esri.co/datasets/veredas-de-colombia>.
- Fundación Futuro Latinoamericano (FFLA). *Gobernanza para el Manejo de los Recursos Naturales y las Áreas Protegidas*. Ecuador, 2015.
- Guerrero, A.; Zuluaga, L. (2017). Reflexiones en torno a la gestión del recurso hídrico a escala rural, una mirada desde los sistemas socio-hídricos en el valle del Río Blanco. Bogotá.
- Huntington, T. G. (2006). Evidence for intensification of the global water cycle: Review and synthesis. *Journal of Hydrology*, 319(1-4), 83-95.
- IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLEERÍA. 2017. Tercera Comunicación Nacional De Colombia a La Convención Marco De Las Naciones Unidas Sobre Cambio Climático (CMNUCC). Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático. IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLEERÍA, FMAM. Bogotá D.C.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (2010). Guía de procedimiento para la generación de escenarios de cambio climático regional y local a partir de los modelos globales. Consultado el 20 de febrero de 2021, <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Gu%C3%ADa+Escenarios+Cambio+Climatico.pdf/72eae24f-04ea-4ce2-9a4b-e551559c48fc>
- Ingenieros consultores & Empresas públicas de Medellín (2012, 18 de diciembre). Proyecto nueva esperanza. Consultado el 16 de febrero de 2021, https://www.epm.com.co/site/portals/descargas/acuerdomunicipal/C_3.3_EIA_230_kV_V00_DIC17.pdf

IPCC (2013). Glosario, Planton, S. (ed.), en: Cambio Climático 2013. Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, Stocker, T. F.; D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York.

Levia, D. F.; Creed, I. F.; Hannah, D. M.; Nanko, K.; Boyer, E. W.; Carlyle-Moses, D. E.; ... Bruen, M. (2020). Homogenization of the terrestrial water cycle. *Nature Geoscience*, 13(10), 656-658.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (s.f.). Gestión Integral del Recurso Consultado el 16 de febrero de 2021 Hídrico. Disponible en línea: <https://www.minambiente.gov.co/index.php/gestion-integral-del-recurso-hidrico>

Muñoz Real, S. L.; Beltrán Carvajal, D. C. (2010). Perfil ambiental de la subcuenca del Río Teusacá de la cuenca alta del Río Bogotá. Tesis Pregrado en Ingeniería Ambiental y Sanitaria, Universidad de la Salle. Bogotá.

Planeación ecológica & Ecoforest (2006). Elaboración del Diagnóstico, Prospectiva y Formulación de la Cuenca Hidrográfica del Río Bogotá Subcuenca del Río Teusacá, 2120-13. Consultado el 17 de febrero de 2021. <https://www.car.gov.co/uploads/files/5ac25d4c03bce.pdf>

Rockström, J.; W. Steffen, K. Noone, Å. Persson, F. S. Chapin, III, *et al.* (2009). A safe operating space for humanity. *Nature* 461:472-475.

Rodríguez, P. C.; Cubillos, A. (2012). Elementos para la valoración integral de los recursos naturales: un puente entre la economía ambiental y la economía ecológica Una revisión de bibliografía. *Gestión y Ambiente*, p. 77-90.

Roger, P.; Hall, A. (2003). Effective water governance. Estocolmo: Technical Advisory Committee (TAC).

Solano, C. (2018). Evaluación de impactos en servicios ecosistémicos de abastecimiento y regulación hídrica, por medio de la implementación del modelo SWAT. Caso de estudio: Cuenca del Río Teusacá. Tesis presentada como requisito parcial para optar el título de Magister en Ingeniería Ambiental. Universidad de Los Andes.

Strahler, A. N. (1952). Hypsometric area-altitude analysis of erosional topography. *Bulletin of the Geological Society of America* 63, pp. 1117.

Zalewski, M. (2000). Ecohydrology-The scientific background to use ecosystem properties as management tools toward sustainability of water resources. *Ecological engineering*, 16 (1), 1-18.

Capítulo 6

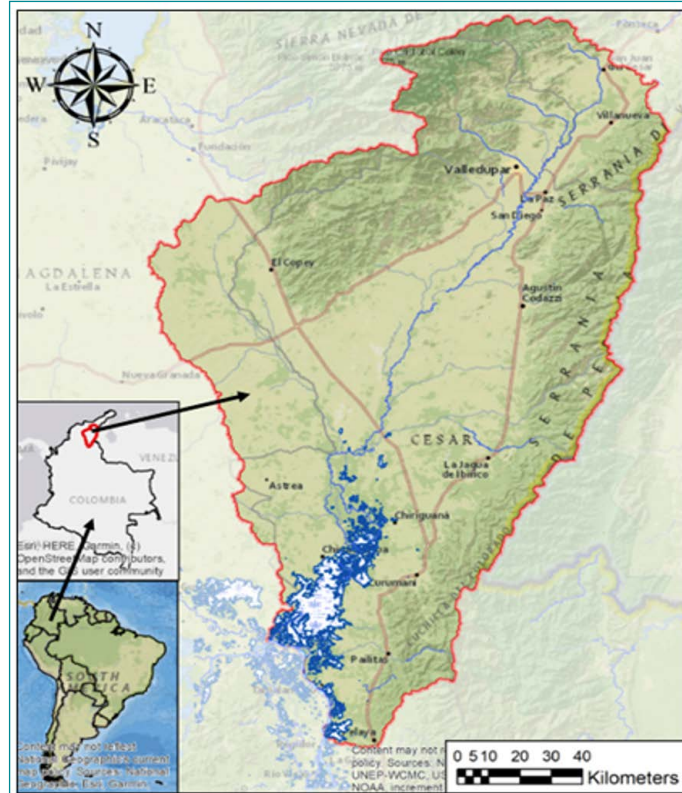
Modelación e Implementación de Alternativas de Restauración Ecohidrológica en el Complejo Cenagoso Zapatosa

Beatriz Hernández Castillo ⁽¹⁾, Jeffer Cañón H ⁽²⁾, Martha C. Díaz B. ⁽³⁾, Carlos A. Fuentes C ⁽⁴⁾, Ángela Gutiérrez ⁽⁵⁾, Iván H. Reina M ⁽⁶⁾, Juan Carlos Alonso G ⁽⁷⁾.

1. Ubicación

El complejo cenagoso Zapatosa (CCZ), es el reservorio natural de agua dulce más grande de Colombia - Suramérica, ubicado en el norte del país, en los departamentos del Cesar y Magdalena, en el delta del Río Cesar en su desembocadura sobre el Río Magdalena, este último, constituye la cuenca de mayor desarrollo del país (Figura 1).

Figura 1. Localización del sitio demostrativo CCZ-Colombia

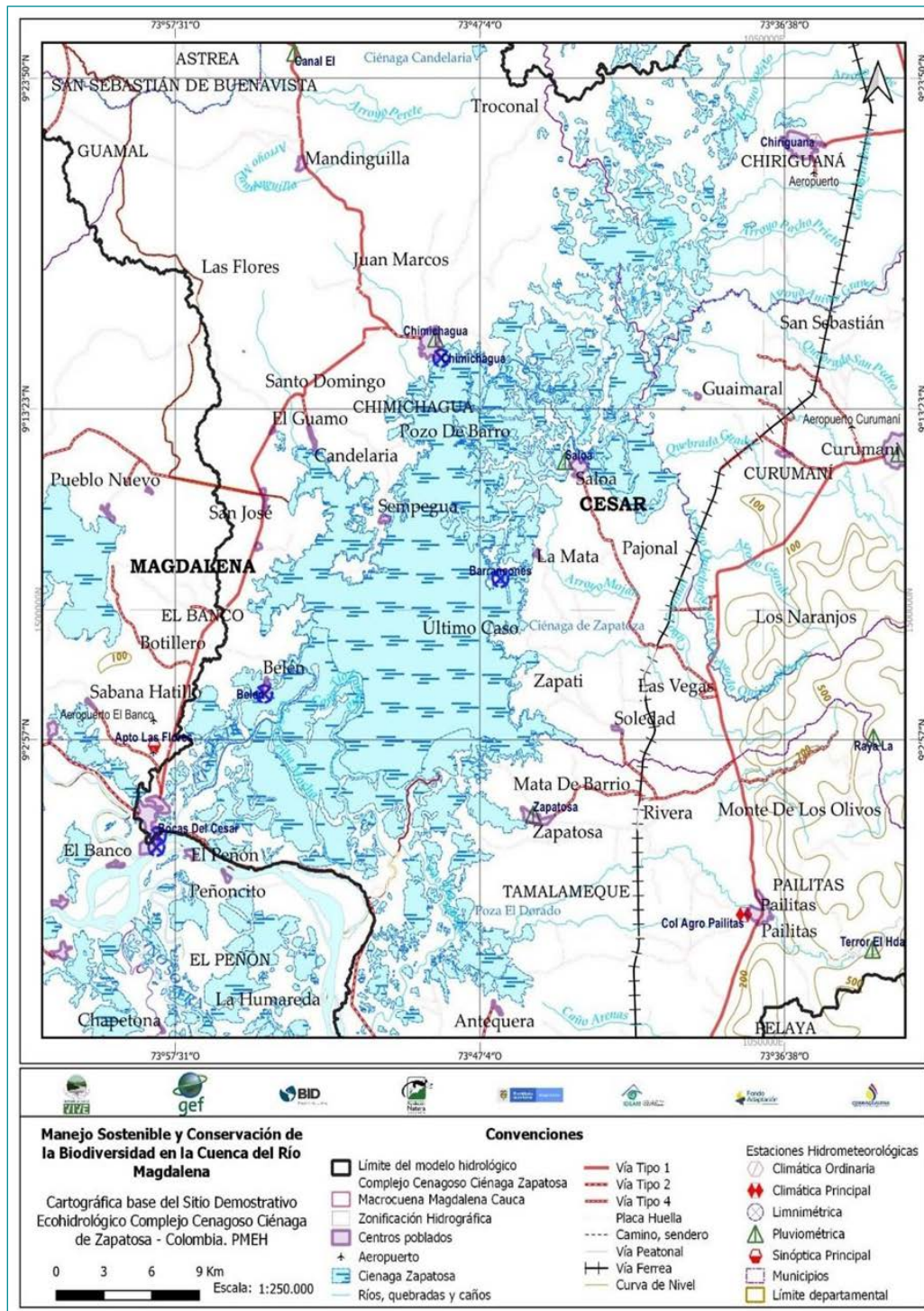


Fuente: Elaboración propia, 2019.

(1) beacajuan@gmail.com - bhernandez@natura.org.co, (2) jeffercanon@gmail.com, (3) mcdiazb@gmail.com, (4) cafuentes@unal.edu.co, (5) angelagutierrezc@gmail.com, (6) ivanremo79@gmail.com, (7) juancarlos.alonsogo@gmail.com - jalonso@natura.org.co

Es un sistema de ciénagas interconectadas entre sí a través de caños y canales cuya conectividad hídrica hace que se extienda desde tan solo 250 km², en épocas de estiaje, hasta 600 km² en época de agua alta, con interacciones y conectividad hídrica entre el Río Cesar y el Río Magdalena, con alta presión antrópica, por las poblaciones allí asentadas, lo cual se muestra en la Figura 2.

Figura 2. Poblaciones localizadas en el sitio demostrativo CCZ-Colombia e hidrografía



Fuente: Elaboración propia en el marco de PMEH proyecto GEF MCV F.N., 2020.

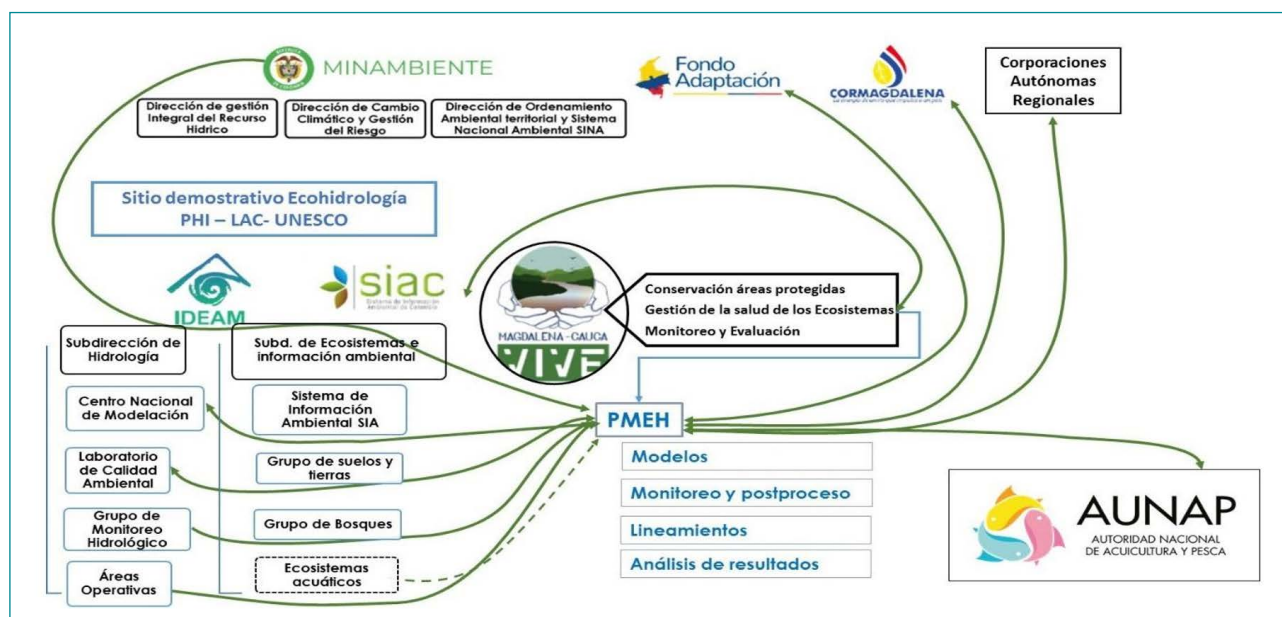
2. Organización formal a cargo del Sitio Demostrativo Instituciones, contexto institucional e implementación

El complejo cenagoso Zapatosa mediante decreto 1.190 del 12 de julio de 2018, se designó para ser incluido en la lista de Humedales de Importancia internacional RAMSAR. Por otra parte, el Acuerdo n.º 001 de 18 de diciembre de 2019 es el instrumento “Por el cual se declara, reserva, delimita y alindera el área protegida denominada Distrito Regional de Manejo Integrado (DRMI) complejo cenagoso de Zapatosa CCZ en los municipios de Chimichagua, Tamalameque, Curumaní y Chiriguana en el departamento del Cesar y el Banco en el departamento del Magdalena, en jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional del Cesar - CORPOCESAR y la Corporación Autónoma Regional del Magdalena - CORPAMAG”.

En el año 2017 se realizó la formulación del Plan de Ordenación y Manejo de la cuenca hidrográfica Río Bajo Cesar - Ciénaga Zapatosa (Código 2805-02), sobre el cual se encuentra inmersa el área del complejo cenagoso de Zapatosa declarada bajo una figura de protección, siendo que en el proceso de zonificación ambiental, fueron identificadas áreas de conservación y protección ambiental, donde destacan que la vocación de conservación y protección ambiental de la cuenca que posee áreas conservadas, con una amplia oferta ecosistémica y de provisión del recurso hídrico, requiere de acciones encaminadas para su preservación, logrando cumplir el escenario deseado al 2027 en la variable Conservación de Ecosistemas Estratégicos, con la inclusión del humedal bajo una categoría de conservación a nivel regional y en el Plan de ordenación y manejo de cuenca- POMCA Bajo Cesar.

Por otra parte, el proyecto GEF (Fondo del medio ambiente Mundial, por sus siglas en Ingles) Magdalena Cauca, ejecutado por la Fundación Natura-Colombia, en el marco del cual se desarrollan las actividades para el sitio demostrativo de ecohidrología, como son el modelamiento ecohidrológico, el trabajo con las comunidades en el territorio, acciones de destaponamiento de caños, viveros, restauración, así como patios productivos, presenta una organización y relacionamiento con entidades gubernamentales que se muestra en el siguiente diagrama de la Figura 3.

Figura 3. Organización y relacionamiento con entidades gubernamentales del sitio demostrativo CCZ



Fuente: elaboración propia, 2020.

3. Características generales

3.1. Aspectos hidrológicos (cuenca, subcuenca, tramo de río, área costera, lago, mar)

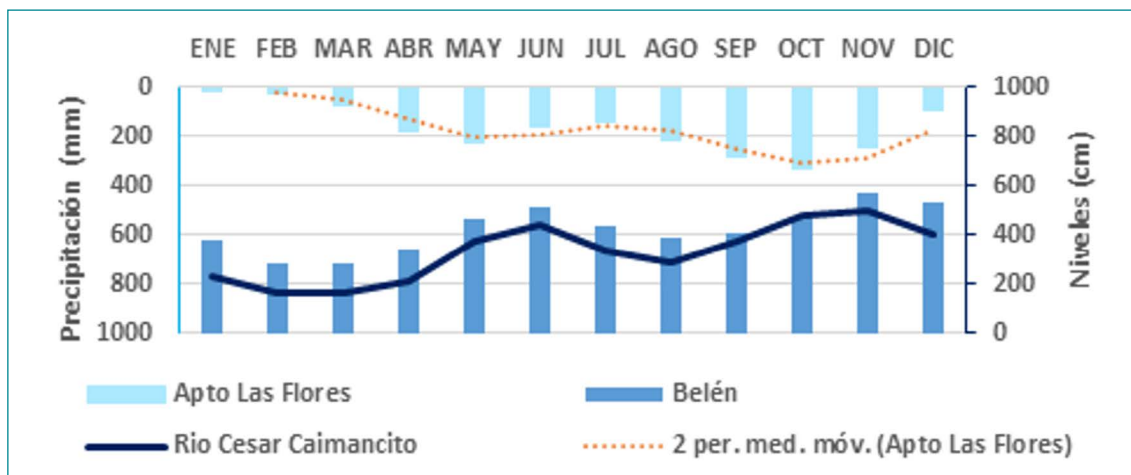
El Complejo Cenagoso de Zapatosa conformado por más de 1500 ciénagas menores, que lo definen como el complejo cenagoso continental más grande de Colombia, se localiza en la región Caribe colombiana, entre la depresión Momposina y el delta del Río Magdalena.

Es alimentado por los ríos Cesar y Magdalena, así como por otras corrientes menores como son los ríos la Mula, Anime Grande, Animito y Rodeo Hondo; caños Largo, Blanca Pía, Jobito, Las Vegas, Platanal, Mochila San Pedro, Viejo y Tamalacué; quebradas Quiebradientes, La Floresta y Alfaro; se forma unos pocos kilómetros antes de la desembocadura del R. Cesar al R. Magdalena, por la margen derecha de este último; se suceden en este ecosistema acuático movimientos y aportes de agua bidireccionales, de acuerdo a la época del ciclo hidrológico dentro del año, en un intercambio de corrientes y nutrientes que favorecen los ciclos reproductivos de peces migradores por lo que se constituye en el eje de la economía piscícola de las poblaciones aledañas, además de ser uno de los principales centros de biodiversidad del país, convirtiéndolo en un ecosistema irremplazable debido al papel que juega local y regionalmente en la adaptación y mitigación frente a posibles efectos del cambio climático, todo lo cual apporto en su reconocimiento como área protegida.

El complejo Cenagoso presenta diversidad de profundidades, que pueden llegar a 1 metro en estiaje y superar los 9 metros en aguas altas, asociadas a la temporada hidrológica, como al ingreso y presencia de afluentes, pero fundamentalmente del Río Cesar, por cuyo recorrido al interior de la Ciénaga, se registran las mayores profundidades del cuerpo cenagoso

La ciénaga colinda con otras zonas ecológicas como la Serranía del Perijá, el valle del Río Cesar y el valle del Río Magdalena alberga un importante volumen de por lo menos 1.000 millones de metros cúbicos de agua y en épocas de inundaciones llega a cubrir cerca de 60.000 hectáreas, cumpliendo una función reguladora en época de aguas altas, que se ve afectada por el taponamiento de caños y la construcción de diques artificiales que obstaculizan el flujo normal de agua.

Figura 4. Variación de la precipitación y niveles- sitio demostrativo CC Zapatosa



Fuente: Elaboración propia, 2021.

Se caracteriza por un clima cálido seco y las siguientes condiciones climáticas:

- Promedio de la biotemperatura anual 28,4 °C
- Precipitación media anual – PPT = 1.000 – 2.600 mm
- Evapotranspiración potencial PET = 900 – 1.600 mm

Régimen de Lluvias Bimodal; el periodo más seco se registra en el primer semestre del año y el más lluvioso en el segundo semestre, lo cual se evidencia en la figura 4 de la variación de la precipitación y niveles de la ciénaga Zapatosa.

3.2. Descripción ecológica

Corresponde a una clasificación ecológica que se establece a partir de la temperatura promedio (biotemperatura °C) y la pluviosidad promedio anual (mm). Los límites climáticos generales con una temperatura media superior a 24 °C y un promedio anual de lluvias entre 1.000-2.600 mm (Provincia de Humedad Subhúmedo).

La ciénaga de Zapatosa, corresponde al bosque seco tropical bs-T de la región caribe colombiana, con una vegetación y la composición de especies de la flora similar con variación de acuerdo con la posición fisiográfica, es decir taxones florísticos asociados a humedales ubicados en esta zona de vida. Este ecosistema cenagoso es el hábitat de numerosas aves migratorias y de la región Caribe, así como una zona de reproducción y alimentación de peces, cuyos ciclos biológicos están adaptados a las condiciones hidrológicas del complejo río-ciénaga, de aves, mamíferos, cuya presencia ya es reducida, de reptiles y otras especies.

Se encuentran dos tipos de hábitats:

- a. Acuáticos: cuerpos de agua lóticos (quebradas, riachuelos, caños) o lenticos (ciénaga, jagüey, charcas temporales y/o permanentes).
- b. Terrestres: bosque que incluye todas las áreas boscosas no asociadas a cuerpos de agua como son el bosque mixto con vegetación arbórea y palmares de *Attalea butyracea*, aledaños a la ciénaga de Zapatosa, algunos sectores presentan dosel semiabierto y en otros es cerrado, bosques en recuperación; bosques nativos conformados por vegetación de tipo arbóreo con estratos arbustivos y herbáceos se han conformado luego de los cambios que han sufrido por las actividades agropecuarias, después de ser abandonados se produjo una regeneración natural de las especies; vegetación de ribera, arbustiva y herbácea pequeño parche de bosque ripario propio de las riberas de quebradas o caños existentes, y son considerados como protectores de los cuerpos de agua e importantes en los procesos de infiltración, absorción y retención temporal de agua, así mismo, protegen los suelos de los procesos erosivos y áreas totalmente transformadas como cultivos, rastrojos, potreros, construcciones humanas, carreteras y cercas vivas.

3.3. Contexto socioeconómico

Los principales actores involucrados que hacen uso del recurso y también invierten el tiempo para protegerlo está constituido por los Pescadores, ganaderos, agricultores, artesanos, autoridades municipales (cinco alcaldías municipales), juntas de acción comunal, asociaciones comunitarias, autoridades ambientales territoriales (2 corporaciones autónomas CAR –CORPOCESAR Y CORPAMAG), gobernaciones departamentales (2 Cesar y Magdalena), instituciones educativas municipales, ministerios (de ambiente, de agricultura, de minas y energía, de salud, entre otros), Autoridad Nacional de Acuicultura y Pesca –AUNAP–, ONG, Academia.

Gran parte de la población de la zona vive en condiciones de pobreza, dedicada a actividades extractivas de subsistencia como la pesca artesanal, la caza de fauna silvestre, así como la recolección de leña y fibras vegetales, para hacer artesanías.

El Banco y demás poblaciones ribereñas han tenido una fuerte tradición cultural, cuyo máximo exponente ha sido el banquero José Benito Barros (1915-2007), compositor de obras clásicas del folclore colombiano y latinoamericano. Barros compuso cerca de un millar de obras entre cumbias, porros, fandangos, paseos, bambucos, pasillos, baladas, boleros, tangos, rancheras, currulaos, puyas, merengues y garabatos. Por otra parte existen festivales locales que resaltan las tradiciones del territorio como son el del bocachico, el de la tambora y el de la cumbia.

Las principales problemáticas ambientales son:

- Contaminantes y nutrientes: Contaminación del agua, por sedimentos, vertimientos de aguas servidas de las poblaciones próximas sin tratamiento, residuos sólidos.
- Uso intensivo del suelo: Transformación del ecosistema por cambio de uso del suelo para uso agropecuario, ganadería extensiva, monocultivos y sobrepesca, entre otros
- Sobre explotación del recurso hídrico: Pérdida de la conectividad de caños y ciénagas menores del complejo; desviación de algunos afluentes para riego de cultivos.
- Inundaciones: Arrastre de sedimentos e incorporación de contaminantes sin control.
- Especies invasoras: Repoblamiento con peces exóticos, tapones de macrófitas, enredaderas sofocando árboles.
- Pérdida de hábitat: Tumba y quema para leña, caza y producción agropecuaria, taponamientos
- Pérdida de capacidad de retención vegetal: Pérdida de la cobertura vegetal protectora de orillas y zona de manejo y preservación ambiental de las ciénagas y caños afluentes.

4. Servicios ecosistémicos que presta

Este ecosistema no solo constituye un reservorio de agua, sino que es decisivo en la dinámica de amortiguamiento de la cuenca del Río Cesar al regular las crecientes cíclicas (pulsos de inundación), reciclar los nutrientes y contribuir a la producción pesquera, no solo con la oferta de hábitats de cría y engorde de peces, sino mediante la acumulación de materia orgánica proveniente de las macrófitas, principalmente *Eichhornia carssipes* (tarulla) y *Paspalum repens* (gramalote), que es el principal componente del alimento de las especies detritívoras como el bocachico, que constituye el mayor aporte de biomasa de pesca comercial y de consumo de la cuenca del Magdalena.

Ofrece gran cantidad de servicios ecosistémicos entre los que se destacan:

- Amortiguación de inundación
- Regulador del clima
- Trampa de sedimentos
- Captación de agua
- Receptor de agua residual
- Área de oxidación de materia orgánica
- Inmovilización de carbono (bosques y arbustales marginales)
- Reservorio de biodiversidad (banco de genes)

- Hábitat para especies de fauna y flora
- Aprovechamiento de alimento
- Caza (babilla y tortuga entre otras)
- Pesca
- Aprovechamiento de materias primas (madera y fibra)
- Proveedor de agua dulce
- Servicios culturales para tradición y folclor
- Turismo

Es importante resaltar que existe alta presión antrópica sobre este complejo ecosistémico, que se expresa en actividades como la tala (sobreexplotación de la madera –no hay recuperación de los bosques), pesca (sobrepesca –máximo rendimiento sostenible y pesca incidental), interrupción de la conectividad (carreteras, diques, tapadas en caños de menor tamaño –taponamiento de caños), introducción de especies exóticas (tilapia), galapagueo (caza de tortugas mediante quema de gramalote), la agricultura, la ganadería en especial la introducción de búfalos y la minería de balastos de menor escala.

5. Objetivos

Establecer un laboratorio a escala natural a través del sistema ciénaga-río-cuenca para el caso de la ciénaga de Zapatosa que facilite la promoción y consolidación de los procesos generación, transferencia y apropiación social del conocimiento ecohidrológico en Colombia en el contexto de ciénagas y humedales y complejos río-ciénagas a partir de un enfoque de sistemas socioecológicos, de sostenibilidad, interdisciplinar tipo *problem-oriented* y de gestión del riesgo, del cambio climático y bajo los principios de la gestión integral del recurso hídrico.

Los objetivos específicos son:

- Proveer evidencia empírica de las bondades y retos del paradigma de monitoreo y modelamiento ecohidráulico en Colombia, facilitando así no solo el diseño e implementación de las soluciones que ofrece la ecohidrología a la problemática hídrica de varios hidrosistemas del país, sino también en el diseño, evaluación y actualización de los instrumentos de gestión integral del recurso hídrico tales como la Política nacional de gestión integral del recurso hídrico- PNGIR, los programas del plan hídrico nacional, los planes estratégicos de macrocuenca, los planes de ordenación y manejo de cuencas-POMCA, los planes de manejo ambiental de humedales, ciénagas y acuíferos, y los planes de ordenamiento pesquero, entre otros.
- Contar con un sitio demostrativo que brinde un marco de trabajo de articulación, tanto para la armonización de instrumentos y organización de los diferentes actores claves de la institucionalidad ambiental del país, como para los procesos de educación ambiental y de buenas prácticas en relación a la gestión de recursos naturales.
- Apoyar y/o facilitar el trabajo a desarrollar según hoja de ruta que defina el Comité Nacional del Programa Hidrológico Intergubernamental de la UNESCO en Colombia - CONAPHI-COLOMBIA.
- Aportar en el conocimiento de la salud de los ecosistemas de la región buscando mejorar la calidad de vida de la población.

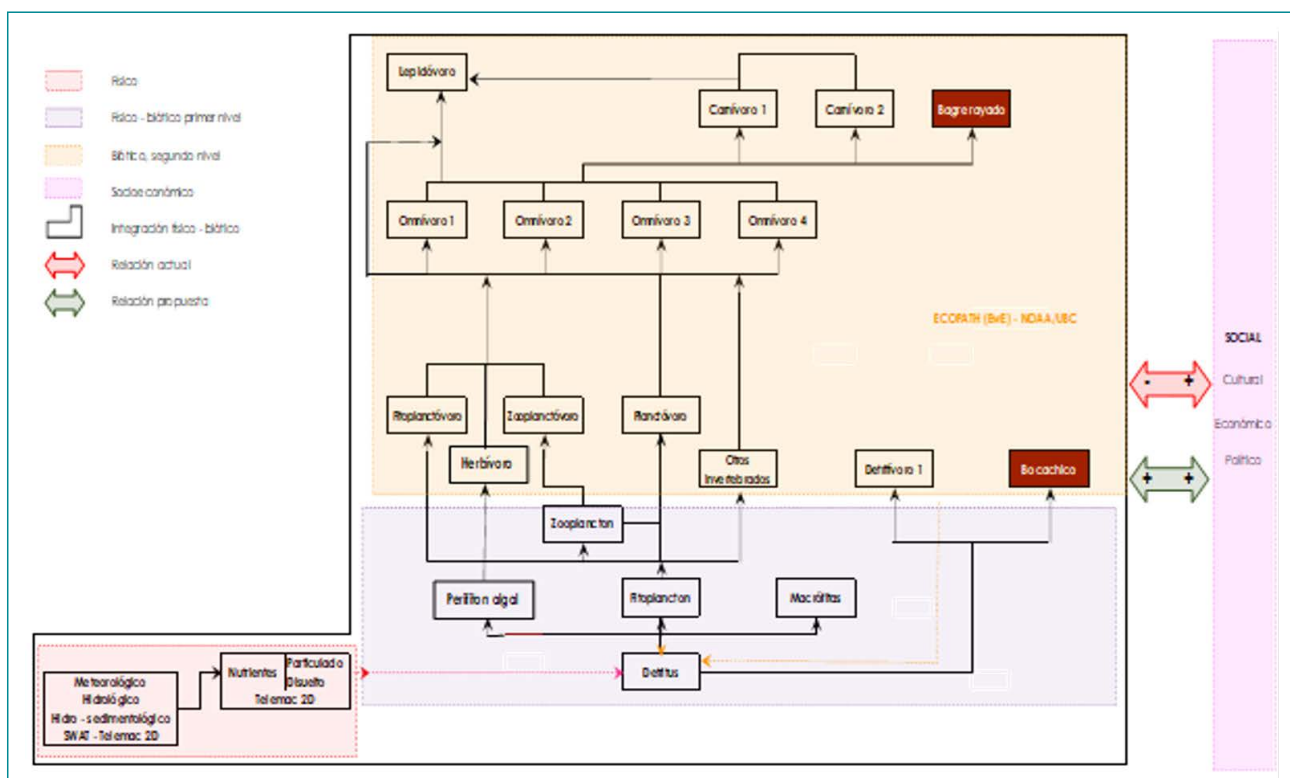
6. Modelo conceptual de funcionamiento

En este caso particular se pretende vincular la meteorología, el ciclo hidrológico y la hidrosedimentología (sistema físico) con los macroelementos carbono (C), nitrógeno (N) y fósforo (P), presentes en sedimentos y disueltos en el agua, su movimiento, la variación espaciotemporal (en caso que exista) y su influencia sobre los productores primarios: fitoplancton (PP) perifiton algal (incluye algas bentónicas) (PP), vegetación riparia (PP), las macrófitas (PP), que no solo ofertan abundante materia orgánica para los procesos de descomposición (producción secundaria –PS1–), sino sustratos para algas del perifiton (PP), áreas de refugio y/o reproducción para especies de peces (PS2) e invertebrados.

La reducción en el ingreso y permanencia de agua dentro del sistema cenagoso (ciclo hidrológico) incide sobre las comunidades biológicas (no solo los productores primarios (PP) y los descomponedores (PS1)); en el periodo seco como posible respuesta a una reducción del oxígeno disuelto (menor volumen de agua, con abundantes macrófitas y altas tasas respiratorias por aumento de temperatura), las especies de peces migratorios (migraciones cortas y largas), remontan por los tributarios hasta el periodo de lluvias cuando regresan e ingresan los inmaduros y juveniles a la ciénagas a iniciar su crecimiento. En la Figura 5 se plantea el modelo conceptual para la ciénaga de Zapatos.

Para cada una de las especies componentes del stock de pesca (en este caso el bocachico: *Prochilodus magdalenae*; y bagre rayado: *Pseudoplatystoma magdaleniatum*, los dos marcados con color anaranjado oscuro en la Figura 5) y de acuerdo con la información secundaria existente, puede modelarse alguna variable asociada al ciclo hidrológico que incide en el comportamiento, la disponibilidad de alimento, áreas de anidación y refugio. En caso de introducción de una especie carnívora y con adecuada información secundaria disponible, podría modelarse la variación en la depredación de otras especies.

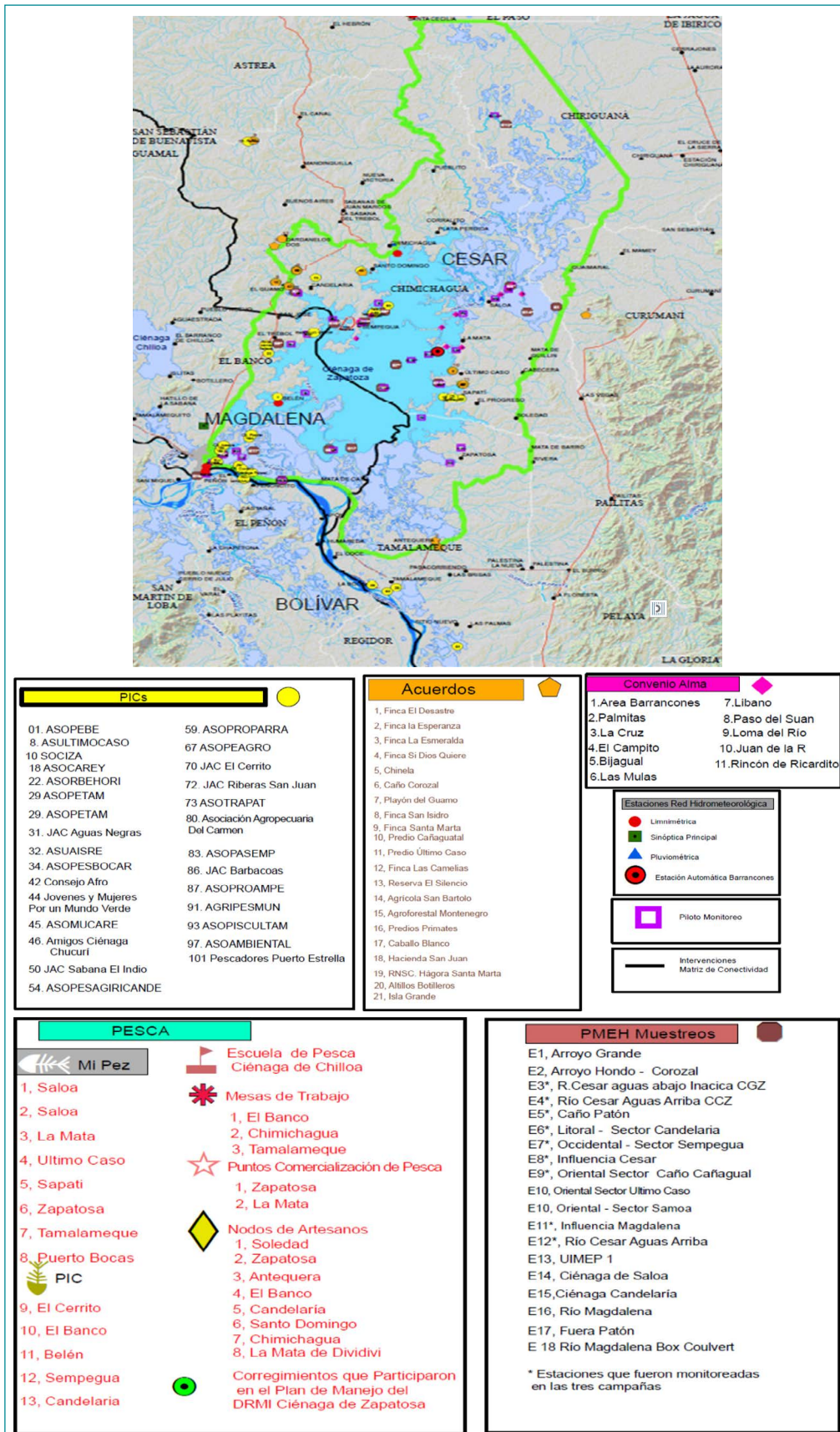
Figura 5. Modelo Conceptual base computacional



Fuente: Juan Carlos Alonso González, 2019.

7. Medidas y acciones ecohidrológicas a demostrar

Figura 7. Acciones integrales en implementación en el complejo cenagoso Zapatoza



Fuente: Juan Carlos Alonso González, 2021.

El sitio demostrativo Complejo Cenagoso Zapatososa - CCZ aplica los principios de ecohidrología EcH que se refiere a la Cuantificación de los procesos hidrológicos a escala de cuenca y el mapeo de los impactos, Gestión de biota para el control de procesos hidrológicos y viceversa, así como la Identificación de áreas potenciales de conservación, para llegar a una solución ecohidrológica que incluye infraestructura ecohidrológica, fitotecnología para la restauración, uso de plantas para aumentar la retentividad del agua, para mejorar la resiliencia acuática, para regular la dinámica de nutrientes en la cuenca y modelación hidráulica, hidrológica, biótica y social.

En cuanto a la implementación de acciones que se están adelantando en territorio, también se trabaja con las comunidades, dando apoyo técnico y económico del Proyecto GEF-Magdalena-Cauca, se implementan otras acciones que se detallan y se resumen en la Figura 7.

8. Actividades demostrativas pasadas, actuales y futuras

Se pueden mencionar:

- Existencia de Línea base de estudios de caracterización o Diagnostico del Complejo Cenagoso, adelantados por las dos Corporaciones Autónomas Regionales con el apoyo de la Academia.
- Declaración del Sitio RAMSAR 2018 por parte de las dos Corporaciones Autónomas Regionales
- Adopción Distrito Regional de Manejo Integrado –DRMI, 2019– con el apoyo del proyecto GEF Magdalena Cauca Fundación Natura.
- Formulación y adopción del Plan de Manejo del Distrito Regional de Manejo Integral -DRMI 2021 por parte del proyecto GEF Magdalena Cauca Fundación Natura.
- Elaboración del Modelo conceptual ecohidrológico, por parte del Programa de Modelación Ecohidrológica PMEH del proyecto GEF Magdalena Cauca Fundación Natura, con el apoyo del Centro Nacional de Modelación del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), autoridad hidrológica Nacional, adscrita al Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- Realización de modelamientos hidráulico malla no estructurada, ecohidrológico, social.
- Realización de muestreos bióticos, fisicoquímicos, hidrobiológicos, biogeoelementos (N, P y C), con el apoyo del laboratorio de calidad ambiental del IDEAM.
- Simulación de escenarios; iniciativas comunitarias de conservación, estrategias de restauración, lineamientos de uso, manejo conservación. Ver figura 7 de localización de acciones implementadas con las comunidades.

Con base en los resultados de la modelación ecohidrológica se empiezan a formular Lineamientos para toma de decisiones sobre uso, manejo y conservación del Complejo Cenagoso Zapatososa-CCZ con enfoque socioecosistémico.

Transferencia de conocimientos, resultados y experiencias obtenidas durante el proceso de modelación a los actores del territorio, tanto entidades (autoridades ambientales, alcaldías municipales, ministerios, Autoridad Nacional de Licencias Ambientales - ANLA) como comunitarios, a través de un diplomado diferencial y una herramienta informática instalada en la web del IDEAM, para acceso al público.

9. Mediciones, investigaciones, y soluciones implementadas

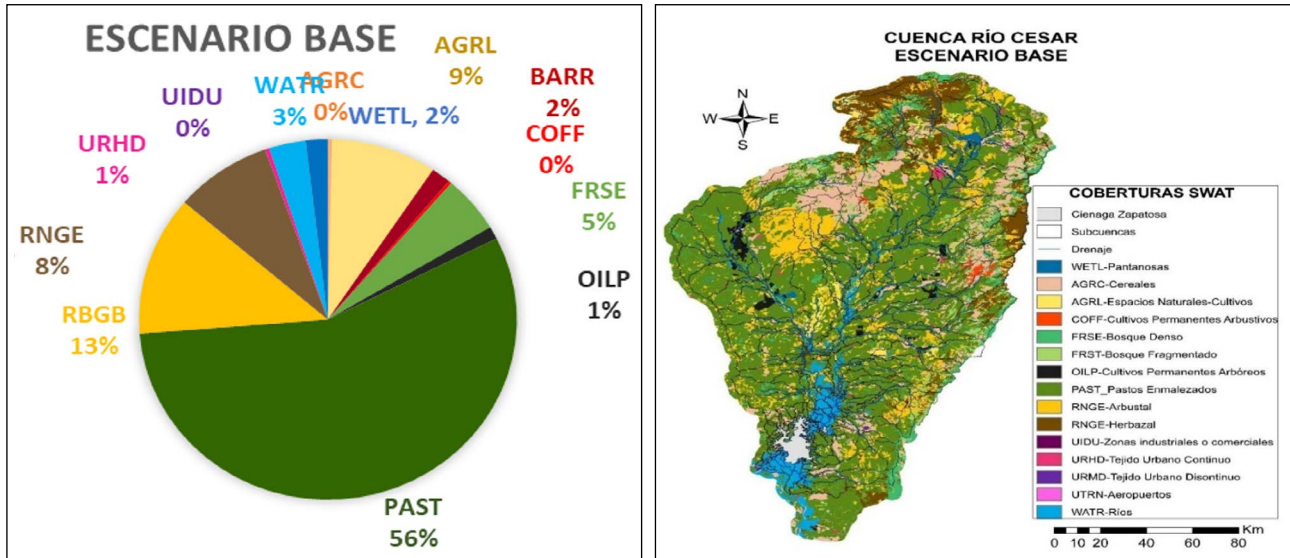
Con el propósito de conocer la situación, comportamiento y tendencias futuras del complejo Cenagoso, el equipo del Programa de Modelación Ecohidrológica PMEH del proyecto GEF Magdalena Cauca Fundación Natura, con el apoyo del Centro Nacional de Modelación del IDEAM, ha desarrollado la modelación sincrónica de procesos ecológicos, hidrológicos y sociales que determinan la salud ecosistémica del complejo cenagoso Zapatosa (CCZ). Se está en la definición o establecimiento de escenarios prospectivos de manejo, buscando mejorar la calidad de vida, del recurso pesquero base de la economía local, la conservación de la biodiversidad acuática y los servicios ecosistémicos del CCZ; también se está realizando la implementación de alternativas de restauración ecohidrológica con el conocimiento y apoyo de las Corporaciones Autónomas Regionales y se acompaña a las comunidades en la implementación de pequeñas iniciativas, que cuentan con viveros de especies nativas, destaponamiento de caños, acciones de restauración de las rondas de caños y del Complejo cenagoso, establecimiento de patios productivos, que mejoran la seguridad alimentaria, que cobran importancia en el territorio en momentos de crisis por la calamidad mundial de salud. Ver Figura 7 de localización de acciones implementadas con las comunidades.

Se desarrollaron metodologías, para ajustar el modelo de elevación digital (DEM), que permitieron utilizar imágenes satelitales que nos apoyaron la calibración del modelo hidrodinámico, así como se levantó información topográfica y batimétrica del complejo cenagoso para profundizar en el conocimiento de su dinámica hidráulica

Con información primaria y secundaria, se realizó la caracterización socioeconómica y cultural del Sitio demostrativo de Ecohidrología Complejo Cenagoso Zapatosa, igualmente se realizó el modelamiento socioeconómico para diversos escenarios futuros, relacionados con los escenarios hidrológicos, hidrodinámicos y bióticos.

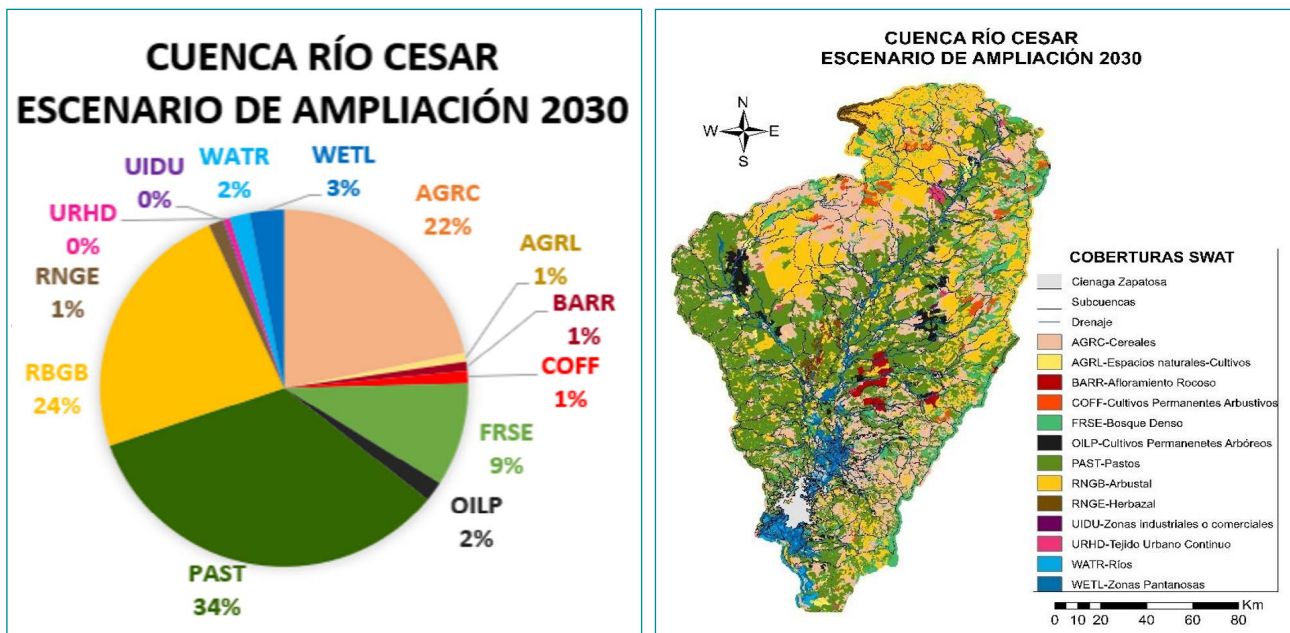
Se desarrolló y se dispone de un modelo hidrodinámico, hidrológico, biótico-trófico (se utilizó el modelo ECOPATH-ECOSIM) y social, para el complejo cenagoso. Estos modelos se han alimentado entre sí y son condición de entrada al modelo hidrodinámico utilizando el modelo open Telemac, que ha permitido conocer profundidades, velocidad, flujos de corrientes, temperatura, tiempo de residencia del complejo cenagoso, comportamiento de los sedimentos, de las macrofitas. Se cuenta con escenarios al 2030, 2050 y 2100 de cambio climático, uso y cobertura de suelos y demanda de agua, utilizando el modelo hidrológico SWATT. Una muestra de los resultados obtenidos se presenta en las figuras 8A y 8B y Figura 9.

Figura 8 A . Escenarios de cambio de uso del suelo y coberturas. Proyecciones CCZ



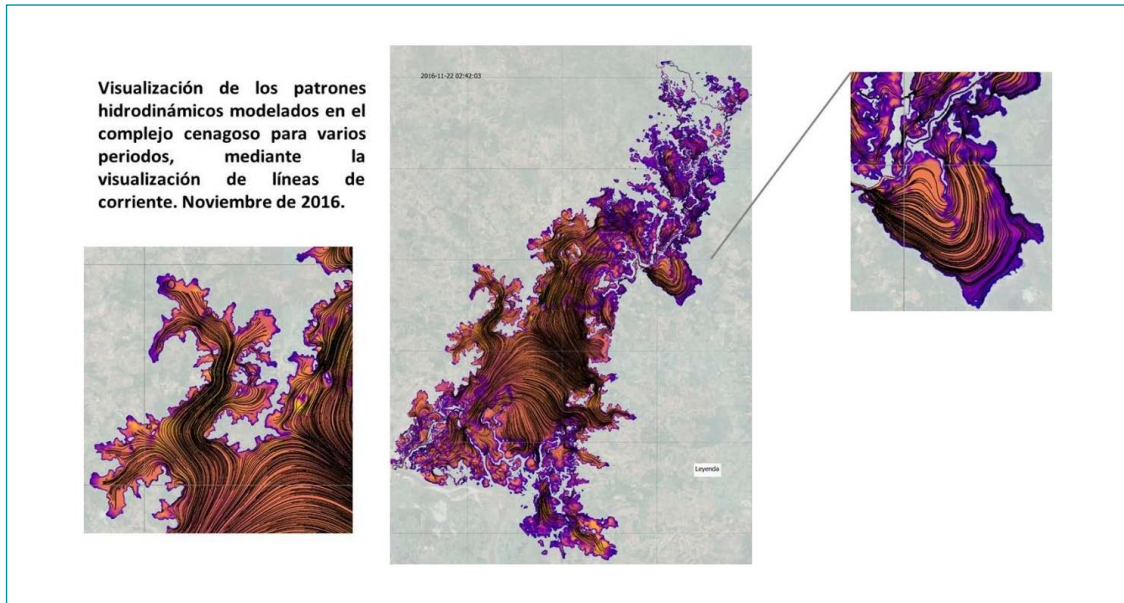
Fuente: Juan Carlos Alonso González, 2021.

Figura 8 B . Escenarios de cambio de uso del suelo y coberturas. Proyecciones CCZ



Fuente: Juan Carlos Alonso González, 2021.

Figura 9. Modelos Hidrodinámicos: Sitio demostrativo ECH – CCZapatososa.



Fuente: Juan Carlos Alonso González, 2021.

Se apoya la campaña de campo para el mantenimiento de las estaciones de la red hidroclimática nacional del IDEAM en el área del complejo Cenagoso y su cuenca aferente Río Cesar, que incluye la respectiva campaña de aforo, que aportaran a la curvas de gasto respectivas de los afluentes de la cuenca Cesar.

Se instaló dentro de la Ciénaga, una estación automática para medir precipitación, temperatura, viento, humedad relativa, radiación solar, en la isla de Barrancones, como se muestra en la Figura 10, que también forma parte de la red Nacional de estaciones hidroclimáticas, manejada por el IDEAM; la información es enviada teleméricamente al sistema de recepción, donde puede ser consultada y utilizada por el público usuario para diversos fines.

Figura 10. Estación Automática Sitio demostrativo de ecohidrología Complejo Cenagoso Zapatososa- Barrancones Colombia.



© IDEAM/Oscar G. Martínez Sarmiento.

Finalmente lo que se pretende lograr:

- Lineamientos para toma de decisiones sobre uso, manejo y conservación del CCZ con enfoque socioecosistémico.
- Modelo de procesos ecológicos, hidrológicos y sociales que determine la salud ecosistémica CCZ.
- Establecimiento de escenarios prospectivos de manejo, buscando mejorar la calidad de vida de la población en cuanto a:
 1. Recurso pesquero base de la economía local,
 2. conservación de la biodiversidad acuática y
 3. servicios ecosistémicos del CCZ.

10. Lecciones aprendidas

La modelación ecohidrológica requiere de insumos específicos que garanticen la calidad y representatividad de la información. La ausencia de estos insumos, hace que se innove en los caminos y las rutas para llegar a los mismos, de esta forma la modelación enseñó que es indispensable contar con un modelo de elevación digital (DEM) detallado para toda la ciénaga que permita modelar los diferentes tipos de conectividad hídrica y todos los procesos que en ella ocurre.

Así mismo, quedó claro que la innovación en metodologías de manejo y uso de la información tradicional (topografía en tierra y batimetrías en áreas acuáticas) son una solución costo efectiva que permite proveer DEM de detalle para todo el complejo cenagoso, sistemas lenticos.

La información observada histórica, mediciones de precipitación, temperatura, velocidad del viento, temperatura del agua, densidad de comunidades hidrobiológicas es fundamental para soportar la modelación ecohidrológica, y la oportunidad de poder coleccionar información primaria enseñó lo relevante del diseño del plan de muestreo y su plan de análisis de tal forma que se brinde información de caracterización, de línea base, de calibración y de validación para los diferentes modelos, enseñó además la relevancia de información continua espacial y temporalmente que conlleva a explorar diferentes herramientas para suplir esta información como son el procesamiento de imágenes satelitales así como la necesidad de instalación de estaciones que permitan medir variables ecohidrológicas.

En ecosistemas tan diversos, complejos y sensibles la forma es a través de la comunidad, (aproximadamente 167.000 habitantes) que vive en los municipios asentados en la ciénaga o en sus alrededores y se beneficia del ecosistema acuático, que en la medida en que se mantenga y conserve el ecosistema acuático este abastecerá muchas de las necesidades de la comunidad y esa conservación parte de iniciativas de restauración de la comunidad y de proyectos de desarrollo sostenible a la luz del cuidado del ecosistema que provee.

Las autoridades ambientales territoriales y Nacionales, son fundamentales para la definición e implementación de medidas y acciones de mejoramiento de los ecosistemas y deben estar vinculadas de manera permanente a cualquier desarrollo de proyectos en el territorio y constituyen la trazabilidad de estos procesos; ellas deben sentarse a pensar el ecosistema de manera conjunta, sin importar el sector del gobierno Nacional al cual pertenezcan a fin de optimizar recursos y avanzar en el cumplimiento de las metas Plan de desarrollo.

Las autoridades civiles locales, constituidas principalmente por las alcaldías de los municipios ribereños (ver Figura 7), quienes dependen de las dos gobernaciones (Cesar y Magdalena), elaboran sus planes de desarrollo de manera autónoma, pero referidos a los planes departamentales de desarrollo y estos a su vez al Plan de desarrollo Nacional, también se deben involucrar, en estas acciones porque la información derivada de estas experiencias da soporte al conocimiento del territorio y conducen la toma de decisiones y permiten justificar los presupuestos de inversión en lo ambiental y además deben articular con los planes de acción de las dos Autoridades Ambientales (CAR), con incidencia en el complejo cenagoso a fin de proveer recursos para la implementación de la línea estratégica del Plan de manejo del complejo cenagoso, pero también de hacer seguimiento a las acciones que cada sector debe desarrollar en el marco de sus competencias, que también involucra las acciones estratégicas definidas en el Plan de ordenación y manejo de la cuenca del Río Cesar.

Se hace necesario que las entidades involucradas establezcan diálogos para aportar desde su competencia en la implementación de la línea estratégica de los instrumentos de Planificación y se aúnen os esfuerzos presupuestales conducidos hacia mejorar el ecosistema y garantizar la seguridad hídrica, aunque algunas de las entidades pertenezcan a diversos sectores además del ambiental, como por ejemplo al ministerio de agricultura.

Datos de contacto

Beatriz Hernández Castillo. Coordinadora Componente 2 “Gestión de la Salud de los ecosistemas” Proyecto GEF Magdalena Cauca VIVE, Fundación Natura Colombia. Programa de modelación ecohidrológica. bhernandez@natura.org.co y beacajuan@gmail.com.

Juan Carlos Alonso G. Coordinador Proyecto GEF Magdalena Cauca VIVE, Fundación Natura Colombia, jalonso@natura.org.co y juancarlos.alonsogo@gmail.com

Coautores del trabajo – Referencias: Jeffer Cañón H (1), Marta C. Díaz B. (2), Carlos A. Fuentes C (3) Ángela Gutiérrez (4), Iván H. Reina M (5), Juan Carlos Alonso G (6).

(1) Ingeniero Modelador hidrológico, (2) Coordinadora programa de modelación ecohidrológica proyecto GEF (3) Ingeniero modelador hidrodinámico, (4) Bióloga Modeladora trófica, (5) Antropólogo Modelador social, (6) Biólogo Jefe proyecto GEF Magdalena Cauca F. Natura – Colombia (2017-2021)

Referencias bibliográficas

Abbaspour, K.C. (2007). User manual for SWAT-CUP, SWAT calibration and uncertainty analysis programs, Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, EAWAG, Dubendorf, Switzerland, 2007.

Angelini, R., Agostinho, A. (2005). Food web model of the Upper Paraná River Floodplain: description and aggregation effects. *Ecological Modelling*, 181: 109-121.

Angelini, R., Aloísio, R., Carvalho, A. (2010). Mixed food web control and stability in a Cerrado river (Brazil). *Pan-American Journal of Aquatic Sciences*, 5 (3): 421-431.

Angelini, R., Gomes, L. C. (2008). O artesao de ecosistemas: construindo modelos com dados- Editorial Maringá. 173 pp.

Arnold, J. G., R. Srinivasan, R. S. Muttiah, and J. R. Williams. 1998. Large-area hydrologic modeling and assessment: Part I. Model development. *J. American Water Resour. Assoc.* 34(1): 73-89 SWATT model. Descarga y recursos: <https://swat.tamu.edu/>

Cañón Hernández, J. (2021). Modelación hidrológica Cuenca del Río Cesar, resultados, informe final contrato FN 041-20. Octubre - Bogotá- Colombia. Proyecto GEF Magdalena Cauca.

Christensen, V.; Walters, C. J. (2004). Ecopath with Ecosim: methods, capabilities and limitations. *Ecological Modelling*, 172: 109-139.

Christensen, V.; Walters, C. J.; Pauly, D. (2005). *Ecopath with Ecosim: a User's Guide*. Fisheries Center, University of British Columbia/ICLARM, Vancouver, 154 pp.

Corporación autónoma Regional del Cesar - CORPOCESAR (2017). Plan de Ordenación y Manejo de la cuenca hidrográfica Río Bajo Cesar - Ciénaga Zapatosa (Código 2805-02).

Corporación autónoma Regional del Cesar - CORPOCESAR (2019). Acuerdo n.º 001 de 18 de diciembre de 2019, instrumento "Por el cual se declara, reserva, delimita y alindera el área protegida denominada Distrito Regional de Manejo Integrado (DRMI) complejo cenagoso de Zapatosa CCZ.

Decreto 1190 del 12 de julio de 2018, mediante el cual se designó para ser incluido en la lista de Humedales de Importancia internacional RAMSAR, el complejo cenagoso Zapatosa.

Fuentes Cabrejo, C. A. (2021) Documento Memorias de construcción resultados de simulaciones del modelo hidrodinámico TELEMAC Sitio demostrativo Ecohidrología Complejo Cenagoso Zapatosa. Informe final contrato n.º FN 035-2019. Octubre - Bogotá- Colombia. Proyecto GEF Magdalena Cauca.

Galland, J. C., Goutal, N., Hervouet, J. M. (1991). TELEMAC: A new numerical model for solving shallow water equations. *Advances in water resources*, 14(3), 138-148.

Gutiérrez Cortés, Á. L. (2021). Documento de memorias de construcción y simulaciones de los modelos de ECOPATH Y ECOSIM Sitio Demostrativo Ecohidrología Complejo Cenagoso Zapatosa Informe final (Contrato n.º FN-037-20) Octubre - Bogotá- Colombia. Proyecto GEF Magdalena Cauca.

Obregón Neira, N., Hernández Castillo, B. (2018). Elementos conceptuales y desarrollo metodológico modelamiento componente 2 gestión salud de los ecosistemas. Subproductos componente 2 - 2.4, 2.5 y 2.6). Bogotá.

OPEN TELEMAC – MASCARET. The mathematically superior suite of solvers, <http://www.opentelemac.org/>

Programa de Modelación Ecohidrológica – PMEHE (2021). Análisis de resultados muestreo del PMEHE complejo cenagoso ciénaga Zapatosa Junio 2019. Beatriz Hernández, Nelson Obregón Neira, Luisa Fernanda Mendoza Vargas, Carlos Alberto Fuentes, Daniel Trujillo, María del Ángel Martínez, Yesid Rondón, María Carolina Reyes, Javier Poloche, Luis Carlos Porto, Jennifer Guagua, Leidy Meneses, Daniel García, Claudia Ávila, Martha Díaz. Enero.

Programa de Modelación Ecohidrológica – PMEHE (2021). Análisis de resultados muestreo del PMEHE complejo cenagoso ciénaga Zapatosa noviembre 2019. Beatriz Hernández, Nelson Obregón Neira, Luisa Fernanda Mendoza Vargas, Carlos Alberto Fuentes, José Erick Hernández, Nicolás Duque, María del Ángel Martínez, Yesid Rondón, María Carolina Reyes, Javier Poloche, Luis Carlos Porto, Jennifer Guagua, Leidy Meneses, Daniel García, Claudia Ávila, Martha Díaz. Enero.

Programa de Modelación Ecohidrológica - PMEHE (2021). Análisis integral de resultados muestreos PMEHE complejo cenagoso ciénaga Zapatosa, Beatriz Hernández, Nelson Obregón Neira, María Carolina Reyes, Ángela Liliana Gutiérrez, Javier Poloche, Luis Carlos Porto, Jennifer Guagua, Leidy Meneses, Daniel García, Luisa Fernanda Mendoza Vargas, Carlos Alberto Fuentes Cabrejo, Nicolás Duque, Daniel Trujillo, María del Ángel Martínez, Yesid Rondón, Claudia Ávila, Martha Díaz. Febrero.

Programa de Modelación Ecohidrológica - PMEH (2021). Análisis de resultados muestreo del PMEH complejo cenagosa ciénaga Zapatosa marzo 2020. Beatriz Hernández, Nelson Obregón Neira, Carlos Alberto Fuentes, José Erick Hernández, Nicolás Duque, Germán Sopó, María del Ángel Martínez, Yesid Rondón, María Carolina Reyes, Javier Poloche, Luis Carlos Porto, Jennifer Guagua, Leidy Meneses, Daniel García, Martha Díaz. Enero.

Reina Mora, I. H. (2021). Modelación socioeconómica Sitio demostrativo Ecohidrológica Complejo Cenagoso Zapatosa, informe contrato FN 139-19. Septiembre - Bogotá- Colombia. Proyecto GEF Magdalena Cauca.

Capítulo 7

Sitio Demostrativo Pelican Bay - Galápagos

Marco Albarracín ⁽¹⁾⁽²⁾, Erika Lascano ⁽¹⁾, Christian Domínguez ⁽¹⁾⁽⁴⁾, Henry Bayas ⁽⁵⁾, Sandra García ⁽⁶⁾, Noemí d'Ozouville ⁽³⁾⁽⁴⁾, Patricia Jaramillo Días ⁽⁷⁾

1. Ubicación

El Archipiélago de las Galápagos se encuentra en el Océano Pacífico, en Sudamérica, sobre la línea ecuatorial, a una distancia de 1.000 km al oeste de las costas de Ecuador. Está formado por 13 islas grandes (>10 km²), 9 pequeñas y 107 rocas e islotes. Las islas son de origen volcánico y se consideran relativamente jóvenes, con menos de 5 millones de años de formación (d'Ozouville, 2018; PNG, 2014).

Figura 1. Ubicación de la cuenca hidrográfica de Pelican Bay dentro de la Isla Santa Cruz en Galápagos



Fuente: Elaboración propia, 2019

La cuenca hidrográfica de Pelican Bay abarca 43 km², desde el punto más alto de la isla Santa Cruz, el Cerro Crocker (855 m s.n.m.), hasta la bahía de Pelican Bay en Puerto Ayora (Figura 1). Dentro de esta cuenca se encuentran la mayor parte de las áreas urbanas del cantón, incluyendo Puerto Ayora y Bellavista (GADMSC 2015). El área agrícola de la cuenca ocupa 22,5 km², es decir, el 52,3 % de la cuenca se utiliza para fines agrícolas y ganaderos (Mateus et al., 2019). Las

⁽¹⁾ Universidad Politécnica Salesiana, Quito (UPS), ⁽²⁾ Fundación Ecohidrológica, ⁽³⁾ Consejo de Gobierno de Régimen Especial de Galápagos (CGREG), ⁽⁴⁾ Galapagos Islands Integrated Water Studies (GIWS), ⁽⁵⁾ Gobierno Autónomo Descentralizado del Municipio de Santa Cruz, Galápagos y ⁽⁶⁾ Conservación Internacional Ecuador, ⁽⁷⁾ Fundación Charles Darwin.

zonas agrícolas están rodeadas tanto al norte como al sur por áreas de conservación protegidas por el Parque Nacional Galápagos (PNG). La zona urbana de la cuenca tiene 2 km², con la mayor concentración en Puerto Ayora, el mayor asentamiento poblacional del archipiélago. La demanda de recursos hídricos se enfoca en la irrigación y bebederos de ganado en la parte agrícola, así como el suministro de agua dulce para el municipio y los habitantes de Puerto Ayora y Bellavista (d'Ozouville, 2008; Mateus et al., 2019; Pryet et al., 2012).

2. Organización formal a cargo del Sitio Demostrativo

Se han identificado varias instituciones para fines de desarrollo del presente sitio demostrativo de ecohidrología, pudiendo sumarse algunos de acuerdo con la vinculación que la institución presente para asumir el reto de implementación de los conceptos de la ecohidrología en la cuenca hidrográfica de Pelican Bay. Oficialmente, el sitio demostrativo fue presentado formalmente al Programa de Ecohidrología de UNESCO-PHI por el presidente del Consejo de Gobierno de Régimen Especial de Galápagos, con el apoyo del Secretario del Agua en el año 2019. Otras instituciones que se sumaron al esfuerzo de presentación son el Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Santa Cruz, Galápagos, el Parque Nacional Galápagos (PNG), la Fundación Charles Darwin (FCHD), Conservación Internacional Ecuador (CI), la Fundación Ecohidrológica, y las universidades Politécnica Salesiana (UPS) de Quito y École Normale Supérieure – PSL de Francia. Todas estas instituciones han influido en la consecución del reconocimiento del Sitio Demostrativo de Galápagos.

3. Características del Sitio Demostrativo

3.1. Aspectos generales

Las Islas Galápagos se caracterizan por un alto endemismo de flora y fauna, inspirando a Charles Darwin a proponer la teoría de la evolución por selección natural. Darwin ya señaló que las islas estaban casi desprovistas de agua dulce (Darwin 1859).

El Archipiélago de las Galápagos es reconocido por la UNESCO como Patrimonio Natural de la Humanidad desde 1978 y fue declarado Reserva de la Biosfera en 1985. En 2007, las islas fueron incluidas en la Lista del Patrimonio Mundial en Peligro debido a amenazas como especies invasoras, turismo desenfrenado y sobrepesca. Sin embargo, en 2010, el Comité del Patrimonio Mundial de la UNESCO eliminó a las islas de esta lista, considerando los avances significativos realizados por Ecuador para abordar estos problemas (Albarracín et al., 2018; d'Ozouville, 2008; PNG, 2014). En 2019, la UNESCO amplió la Reserva de Biósfera de Galápagos a 14.659.887 ha, incluyendo el área de reserva marina, convirtiendo a Galápagos en una de las zonas marinas protegidas más vastas del mundo.

El 96,7 % de la extensión del archipiélago está designada para la preservación y conservación de ecosistemas naturales, gestionada como Parque Nacional Galápagos (PNG), mientras que el 3,3 % restante corresponde a áreas urbanas y rurales, incluyendo zonas de agricultura y ganadería (PNG 2014). En la isla Santa Cruz, el territorio antrópico es diez veces mayor, con el 70 % de su superficie protegida por el PNG y el 30 % utilizado para actividades agrícolas, ganaderas y poblaciones urbanas (d'Ozouville, 2018).

Las principales islas con asentamientos humanos son Isabela, Santa Cruz, San Cristóbal, Floreana y Baltra, siendo Santa Cruz la de mayor población con 15.393 habitantes según el censo de 2010, representando más del 60 % de los habitantes de las islas (INEC, 2018). Esta isla alberga diversas actividades relacionadas con el turismo, comercio, investigación y conservación. Al norte de Santa Cruz se encuentra la isla Baltra, donde se ubica el aeropuerto principal (Figura 1).

La cuenca de Pelican Bay, con el mayor asentamiento humano del archipiélago, es el área de mayor desarrollo económico, generando una alta presión sobre los recursos hídricos. Para abastecer a Puerto Ayora y Bellavista, se extrae agua subterránea del acuífero basal, aunque las actividades domésticas y agrícolas contaminan estas aguas (d'Ozouville, 2008; Pryet et al., 2012; Mateus et al., 2019). El crecimiento demográfico y la demanda turística están aumentando la presión sobre el frágil ecosistema y degradando el recurso hídrico (d'Ozouville, 2008).

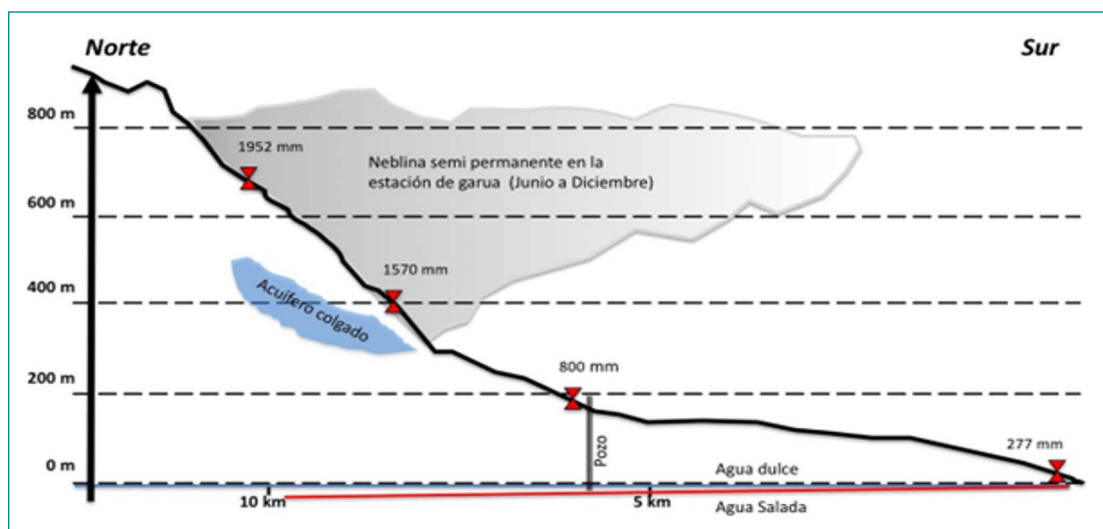
4. Principio hidrológico

Las islas Galápagos están influenciadas por tres factores principales: la interacción de corrientes marinas regidas por la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), la altitud topográfica (hasta 855 m s.n.m.), y los eventos de El Niño y La Niña, que alteran significativamente el clima con períodos de alta precipitación y estaciones secas, respectivamente (Pryet et al., 2012; Trueman y d'Ozouville 2010). Estas variaciones dificultan la definición de un régimen climatológico constante, aunque en la Isla Santa Cruz se han identificado dos estaciones climáticas: la temporada fresca de garúa ($22,6 \pm 3,4$ °C) de junio a diciembre, y el invierno cálido ($26,0 \pm 2$ °C) de enero a mayo, con una temperatura media anual de $24,0 \pm 3,9$ °C. El gradiente de temperatura es de $-0,8$ °C por cada 100 m de elevación (González, 2013; Violette *et al.*, 2014).

El incremento de la temperatura superficial del océano afecta el clima y las precipitaciones en la isla. Las lluvias costeras aumentan con la temperatura del océano, aunque este efecto es menos evidente en las zonas altas. La exposición a los vientos del sureste crea una diferenciación entre las partes barlovento (húmeda) y sotavento (seca) de la isla. La llegada de lluvias en junio marca el inicio del año hidrológico (d'Ozouville, 2008; Percy et al., 2016; Pryet et al., 2012; Violette *et al.*, 2014).

En la sección barlovento de Santa Cruz, donde se encuentra la cuenca de Pelican Bay, la altitud alcanza los 855 m s.n.m. en el cerro Crocker. El enfriamiento adiabático provoca una disminución de $-0,8$ °C por cada 100 m de altitud (Mateus et al., 2019; Violette et al., 2014), lo que influye en las precipitaciones y la presencia de neblina en la zona (Figura 2).

Figura 2. Modelo hidrogeológico en la parte barlovento de la isla Santa Cruz (la presencia del acuífero colgado aún no se ha confirmado). El diagrama fue interpretado de los estudios de Percy, et al. 2016, Pryet, et al. 2012 y de los estudios de GIIWS



Fuentes: Elaboración propia a partir de información de C. Domínguez, comunicación personal, 9 junio 2019; d'Ozouville, 2007, 2018; Percy *et al.* 2016; Pryet *et al.*, 2012 y Violette *et al.*, 2014.

La precipitación y la interceptación de agua de neblina (CWI) por la vegetación arbustiva son las principales fuentes de agua dulce en la cuenca de Pelican Bay (d'Ozouville, 2008; Mateus et al., 2019; Percy et al., 2016; Pryet et al., 2012; Violette et al., 2014). Los datos de precipitación varían según la altitud y las estaciones de garúa o invierno. Cuatro estaciones climáticas en la cuenca han registrado precipitación media anual de 277 mm en la costa y 800 mm en Bellavista (Pryet et al., 2012; Violette et al., 2014) (Figura 2).

El proyecto GIIWS instaló dos estaciones adicionales a 400 m s.n.m. y 650 m s.n.m., registrando precipitaciones anuales de 1.570 mm y 1.952 mm, respectivamente, durante el año hidrológico 2013-2014 (C. Domínguez, comunicación personal, 9 junio 2019).

En Santa Cruz, las precipitaciones pueden triplicarse debido al fenómeno de El Niño (d'Ozouville, 2008; Trueman y d'Ozouville, 2010). La temperatura superficial del océano también influye en las precipitaciones invernales (Pryet et al., 2012). Figura 2 muestra los datos promedio anuales de precipitación y algunos componentes hidrogeológicos y climáticos de la parte barlovento de Santa Cruz.

El agua que puede ser utilizada para actividades antrópicas ingresa al sistema hidrológico por precipitación y por la capacidad de captación de la vegetación mediante la interceptación de agua de neblina (CWI). Debido al escaso espesor del suelo y a su alta permeabilidad, el agua que llega al suelo se infiltra rápidamente (Domínguez *et al.*, 2016) y se percola, recargando dos reservorios subterráneos. En primer lugar, un acuífero colgado de 50 km² ubicado en el lado sur de la isla Santa Cruz a una altitud media (d'Ozouville *et al.*, 2008, Pryet *et al.*, 2011); y, en segundo lugar, el acuífero basal salobre sujeto a intrusión salina, que presenta una capa delgada de agua dulce como consecuencia de un gradiente hidráulico muy débil. Del acuífero basal se extrae agua mediante pozos ubicados en la parroquia Bellavista a unos 6,5 km de distancia desde la costa (Figura 2) (d'Ozouville, 2008; Percy *et al.*, 2016, 2012; Violette *et al.*, 2014).

Con respecto al balance hídrico en la cuenca hidrográfica de Pelican Bay, se deben considerar a las siguientes salidas del sistema: (1) evapotranspiración, (2) infiltración y (3) escorrentía. De acuerdo a d'Ozouville (2007), en un experimento realizado en la microcuenca del Cerro "El Gallito" a 660 m s.n.m., durante el año hidrológico 2005-2006, las principales salidas de agua se dieron por evapotranspiración (59 %), infiltración (32 %), y por escorrentía (9 %); con respecto de estos valores, Violette *et al.* (2014) indican que no se consideró la subestimada evapotranspiración y la cantidad de agua que se aporta al balance hídrico mediante CWI.

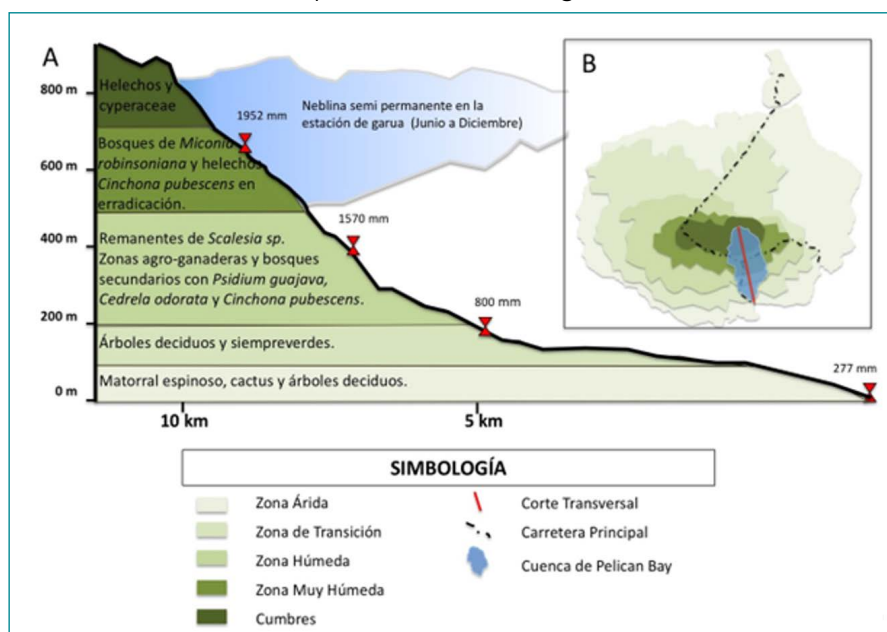
4.1. Acceso y calidad del agua para uso humano

El acuífero basal es accesible en grietas cercanas a la costa en Puerto Ayora. Sin embargo, la proximidad a centros poblados incrementa la contaminación (Mateus et al., 2019). Para mitigar esto, se extrae agua de baja salinidad (< 3000 ppm) de una grieta en "La Camiseta", que luego se desaliniza para consumo humano (Albarracín *et al.*, 2018).

5. Principio ecológico

Las condiciones hidrológicas de Santa Cruz han influenciado la zonación vegetal en la cuenca de Pelican Bay. La isla está claramente dividida entre sotavento (norte, zona árida y de transición) y barlovento (sur, húmeda, incluyendo Pelican Bay y los principales asentamientos humanos) (Figuras 1 y 3).

Figura 3. A. Corte transversal de la cuenca hidrográfica de Pelican Bay en Santa Cruz. B: Mapa de zonas de vegetación en Santa Cruz.



Fuentes: Elaboración propia a partir de información de d'Ozouville, 2007, 2018; Hamann, 1979; Percy *et al.*, 2016, 2012; Violette *et al.*, 2014.

En la parte barlovento de la isla, las condiciones pedológicas, edafológicas e hidrológicas han originado una clara zonación vegetal. Realizando un corte transversal en la cuenca hidrográfica de Pelican Bay, se pueden distinguir cinco formaciones vegetales (Figura 3) que se han desarrollado de manera natural por años de evolución. Sin embargo, en Santa Cruz, los bosques originales de *Scalesia sp.* fueron reemplazados por cultivos, pasturas y bosques secundarios para producción agrícola (Hamann, 1979). En la foto satelital presentada en la Figura 1, se puede observar la magnitud de la intervención humana en la cual de modificaron los bosques originales de la parte Barlovento de la Isla Santa Cruz, especialmente en la Zona Húmeda.

5.1. Zonas de vegetación

Zona Árida: Desde la costa hasta los 50 m s.n.m., con vegetación de arbustos espinosos, cactus y opuntias, y una precipitación promedio anual de 300 mm (Hamann, 1979; Pryet *et al.*, 2012). Los suelos son predominantemente bloques de lava basáltica con capas delgadas de arcilla rojiza (Stoops, 2014).

Zona de Transición: De 50 a 200 m s.n.m., con suelos más profundos y bosques deciduos y siempre verdes, con precipitación de 800 mm (Hamann, 1979; Pryet *et al.*, 2012). Los suelos muestran desgaste por meteorización y presencia de material piroclástico (Stoops, 2014).

Zona Húmeda: De 200 a 450 m s.n.m., originalmente con bosques de *Scalesia sp.*, ahora reemplazados por cultivos y pastos debido a la intervención humana. Precipitación media anual superior a 1500 mm (Hamann 1979; Pryet *et al.*, 2012). Suelos "Marrón de Bosque" y "Podzólicos Marrón-Grisáceos", influenciados por microfauna introducida (Stoops, 2014).

Zona Muy Húmeda: A mayor altitud, con suelos menos profundos y precipitación anual alrededor de 2.000 mm. Dominada por helechos y matorrales de *Miconia robinsoniana*, con suelos de tipo Andosoles y pH entre 10,5 y 11,5 (Hamann 1979; Pryet *et al.*, 2012; Stoops, 2014).

Zona Cumbre: En la parte más alta, dominada por helechos y arbustos de *Miconia robinsoniana*, con suelos Andosoles marrón rojizo (Hamann, 1979; Pryet *et al.*, 2012; Stoops, 2014).

6. Parámetros WBSR-C

La ecohidrología se enfoca en mejorar la sostenibilidad de una cuenca hidrográfica mediante la gestión del agua y la biodiversidad, optimizando seis factores: Agua, Biodiversidad, Servicios Ecosistémicos, Resiliencia, Patrimonio Cultural y Educación (WBSR-CE) (Zalewski et al., 2018).

6.1. Servicios ecosistémicos

Los servicios ecosistémicos son beneficios que las personas obtienen de los ecosistemas, como la producción de alimentos, suministro de agua, regulación del clima y experiencias culturales (TEEB, 2010).

La biodiversidad en Santa Cruz sufre deterioro debido al aumento de población y turismo (Pryet et al., 2012), así como la producción agrícola que reemplaza la vegetación endémica (Domínguez et al., 2016). El Plan de Manejo de las Áreas Protegidas de Galápagos para el Buen Vivir clasifica los servicios ecosistémicos en abastecimiento, regulación y culturales (Jaramillo et al., 2020). Estos servicios se enfocan en la producción agrícola sostenible, control de erosión y restauración de especies endémicas.

En la Tabla 1 se detallan los servicios ecosistémicos en la cuenca de Pelican Bay (Albarracín, 2019; Jaramillo et al., 2020; Michael et al., 2019; PNG, 2014; Pryet et al., 2012).

Tabla 1. Servicios ecosistémicos en la cuenca de Pelican Bay.

Impacto	Efectos	Servicio Ecosistémicos	Solución
Especies invasoras	Impacto económico: pérdida de producción por plagas, importación de productos. Impacto ambiental: alteración de los ecosistemas originales de la isla. Impacto social: abandono de tierras de cultivo.	Servicios de regulación	Restauración ecológica (implementación programas de restauración mediante reforestación). Agricultura sostenible (reducción de importación de productos orgánicos, minimizando el riesgo de introducción de especies y fomentando la seguridad alimentaria).
Sobreexplotación de acuíferos	Contaminación y escasez de agua en el acuífero.	Sistema de abastecimiento	Conservación y protección de bosque naturales como zonas de recarga de acuíferos. Utilización de métodos alternativos de captura de agua para recarga de acuíferos.
Demanda turística. Criadero y hábitat de especies locales.	Ejerce una presión sobre el frágil ecosistema de la isla y aumenta la degradación del agua.	Sistema cultural	Protección de los ecosistemas de Manglar, ya que brindan oportunidades recreacionales y contribuyen a la purificación del agua y protección de las costas, además que ayudan a la captura de carbono.

Fuente: Elaboración propia a partir de información de Albarracín, 2019; Jaramillo et al., 2015; Michael et al., 2019; PNG, 2014; Pryet et al., 2012

6.2. Resiliencia al cambio climático

Las especies y ecosistemas endémicos de Galápagos se han adaptado a la variabilidad climática de las islas. Sin embargo, el cambio climático global amenaza con cambios en temperatura, nivel del mar y patrones de precipitación, afectando la estabilidad del ecosistema (Cazar, 2015). Se proponen soluciones viables y sustentables para enfrentar estos desafíos.

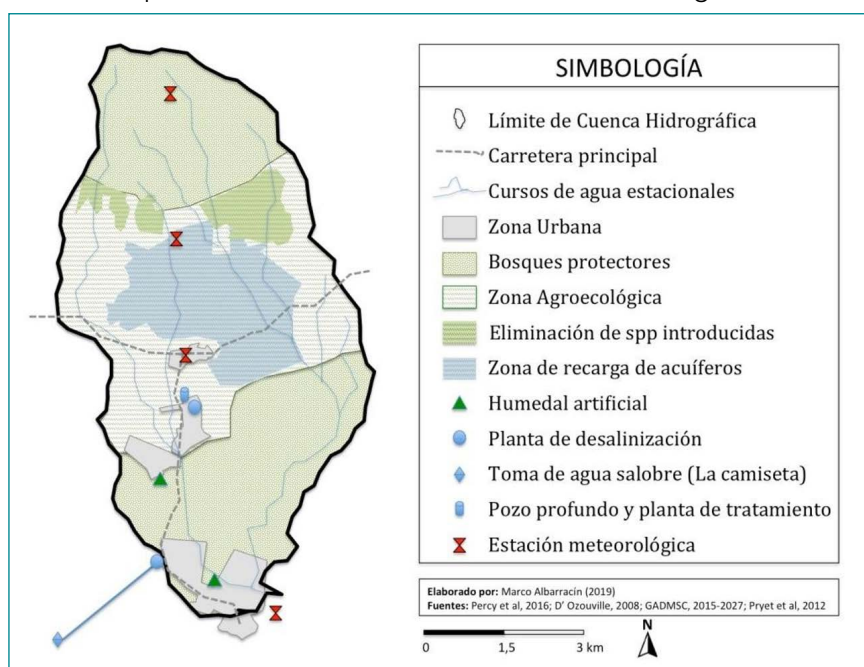
6.3. Aspectos socioeconómicos y culturales

El censo de 2010 registró una población de 25.124 habitantes en Galápagos, siendo Santa Cruz el cantón con mayor concentración, representando el 61,3 % de la población total (Salvador 2015). Puerto Ayora es la ciudad de mayor crecimiento, tanto en población como en infraestructura. Su actividad comercial, cultural, social, económica y científica es la más dinámica del archipiélago (PNG, 2014).

7. Objetivos y modelo conceptual de funcionamiento

Con base en los principios hidrológicos y ecológicos, se propone un esquema de acciones ecohidrológicas para la cuenca de Pelican Bay en Santa Cruz. Los objetivos incluyen la conservación de bosques naturales, reemplazo de vegetación con especies endémicas, implementación de agro-ecosistemas, manejo de agua de lluvia y tratamiento de aguas residuales.

Figura 4. Modelo conceptual del Sitio Demostrativo de Ecohidrología Pelican Bay, Galápagos



Fuente: Albarracín, 2019.

Además, se han identificado tres instituciones con competencia en el manejo e intervención según el uso del suelo y los objetivos mencionados., En primer lugar, la zona de mayor tamaño dentro de la cuenca, es la franja central correspondiente a la Zona Agroecológica en donde se encuentran propiedades privadas principalmente dedicadas a la agricultura y la ganadería. Esta zona está gestionada por el Consejo de Gobierno de Régimen Especial de Galápagos (CGREG) y, adicionalmente, el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), que da soporte técnico para mejorar los procesos agrícolas y ganaderos a los propietarios de fincas (Albarracín, 2019).

En segundo lugar, se encuentran los bosques protectores que son manejados por el Parque Nacional Galápagos (PNG). Estas áreas se encuentran por encima y por debajo de la zona agrícola y ganadera y están dedicadas exclusivamente para la conservación y protección estricta de hábitats naturales. Adicionalmente, se destaca una zona de bosque protector urbano ubicado sobre el pozo profundo de Bellavista y que fue propuesto por el GADMSC (2015) en el Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial Cantón Santa Cruz 2015-2027.

Finalmente, en tercer lugar, se encuentran los asentamientos urbanos en la parroquia urbana de Puerto Ayora y la parroquia rural de Bellavista; estos lugares son manejados por el Gobierno Autónomo Descentralizado del Municipio de Santa Cruz (GADMSC) y tiene la competencia en cuanto a agua potable y tratamiento de aguas residuales.

8. Medidas y acciones ecohidrológicas

8.1. Principio de ingeniería ecológica

De acuerdo con los objetivos presentados anteriormente, se describen las intervenciones ecohidrológicas que se ejecutan en el sitio demostrativo.

8.2. Conservación y protección de bosque naturales como zonas de recarga de acuíferos

El PNG gestiona dos grandes zonas boscosas en la cuenca, contribuyendo a la captación natural de agua, especialmente en la zona superior cercana al cerro Croker (ver Figura 4). En estos sitios, la protección de los sistemas naturales es estricta. No se permite implantación de zonas urbanas ni actividades agrícolas o ganaderas. Además el PNG, dirige iniciativas de eliminación de especies introducidas y reforestación con especies endémicas. El PNG trabaja en conjunto con instituciones como la Fundación Charles Darwin.

8.3. Reemplazo de vegetación en zonas intervenidas con especies endémicas

En las Islas Galápagos en general y en la cuenca de Pelican Bay en particular, existen diversas iniciativas de eliminación de especies introducidas. La Fundación Charles Darwin genera continuamente información científica para guiar las acciones tanto de eliminación de especies introducidas, así como la creación de protocolos de siembra y restauración de ecosistemas degradados, implementados tanto en zonas conservadas como intervenidas, utilizando herramientas de restauración y ahorro de agua.

El Proyecto Galápagos Verde 2050 se centra en la restauración ecológica y la sostenibilidad mediante el uso de tecnologías innovadoras para la restauración y conservación de especies únicas de Galápagos (Jaramillo et al., 2020). Por ejemplo, sistemas ahorradores de agua que aseguran la implantación de especies endémicas son el Cocoon o Growbox y Groasis (ver Figura 5). El sistema Cocoon es 100% biodegradable y está diseñado para proveer agua y refugio a las plantas durante su primer año, estimulando así el desarrollo de una raíz sana y profunda. Así mismo, el sistema Groasis es otra tecnología ahorradora de agua utilizada por el programa Galápagos Verde de la Fundación Charles Darwin. Consiste en un recipiente de propileno que colecta agua durante la época de lluvia, asegurando su provisión a la raíz de las plantas durante la época seca; esto estimula y acelera el crecimiento de las plántulas especialmente en ambientes áridos.

Figura 5. Recuperando especies en peligro de extinción con sistemas ahorradores de agua en Santa Cruz. A: Sistema Groasis. B: Sistema Cocoon y Growbox. C: Plantas de *Scalesia affinis* exitosamente recuperadas.



Fuente: Proyecto Galápagos Verde 2050. Fotos: © Patricia Jaramillo Díaz

8.4. Implementación de agro-ecosistemas con especies endémicas

En la zona agrícola, se destacan proyectos de cultivo de café combinado con *Scalesia pedunculata*, mejorando la captación de agua y proporcionando sombra adecuada para el desarrollo del café y formando parte de la restuaración ecológica rural en fincas (M. Piu, comunicación personal, 2019; Jaramillo et al. 2020). (Figura 6).

8.5. Manejo de agua de lluvia

En Puerto Ayora y Bellavista, así como en fincas agrícolas, se han desarrollado sistemas de captación de agua de lluvia para consumo y riego.

El Ministerio de Agricultura y Ganadería con apoyo de Conservación Internacional Ecuador han desarrollado proyectos que consisten en la construcción de reservorios con geomembrana, que captan en promedio 650 m³ de agua de lluvia para utilizarlo en sistemas de riego y abrevaderos de ganado (Figura 6). Estos reservorios son fundamentalmente importantes no solo en zonas y temporadas donde la precipitación promedio anual son bajas puesto que permite disponer de agua por mayor tiempo, si no también, en aquellas zonas donde no se puede retener el agua en lagunas artificiales debido a la alta permeabilidad del suelo rocoso.

Figura 6. Captura de agua de lluvia para riego y abrevaderos de ganado, apoyados por el Ministerio de Agricultura y Ganadería



© Marco Albarracín en Fincas de Santa Cruz.

Estos reservorios, con algunas mejoras tecnológicas, podrían eventualmente ser utilizados para recargar los acuíferos en períodos de sequías.

8.6. Tratamiento de aguas residuales con humedales artificiales

Se han implementado humedales artificiales para tratar aguas residuales en Puerto Ayora y Bellavista. El municipio está construyendo una planta de tratamiento de aguas residuales urbanas.

En Santa Cruz, existen varias iniciativas de tratamiento de aguas residuales mediante la utilización de humedales artificiales. Estas fueron implementadas tanto por el municipio, como por asociaciones de pescadores. Al momento se identificaron claramente tres plantas. Dos se encuentran ubicadas dentro de la ciudad de Puerto Ayora; la más nueva, en términos de construcción, es operada por la asociación de pescadores de Puerto Ayora y se encuentra junto a la planta de eviscerado de pescado. La más antigua, fue utilizada por el camal municipal; en la actualidad, el camal ha sido reubicado fuera de la cuenca hidrográfica de Pelican Bay. La tercera planta, es operada por el municipio y se encuentra junto al “parque artesanal”, que es un sector creado exclusivamente para actividades de tipo semiindustrial. Aquí se utiliza agua en algunos de los procesos y, conjuntamente con aguas residuales, son tratadas por el humedal artificial.

Adicionalmente, el municipio al momento se encuentra en proceso de construcción de una planta de tratamiento de aguas residuales urbanas que será una importante solución a los problemas de contaminación de los acuíferos.

Por otra parte, la legislación ambiental de Galápagos, exige a los hoteles y botes, el manejo de sus aguas residuales. Esta actividad es controlada por el Parque Nacional Galápagos que es la representación y máxima autoridad ambiental en las islas.

Figura 7. Foto aérea del Humedal Artificial para tratamiento de aguas residuales provenientes de la planta de eviscerado de pescado en Puerto Ayora.



© Henry Bayas.

9. Desafíos, oportunidades y lecciones aprendidas

Los principales desafíos en la cuenca de Pelican Bay son la escasa disponibilidad de agua superficial y la contaminación de acuíferos. Se proponen sistemas no convencionales de captación de agua atmosférica para recargar acuíferos y abastecer usos domésticos y agrícolas.

En este sentido, presentamos una iniciativa de Conservación Internacional Ecuador y la Universidad Politécnica Salesiana de Quito, para estudiar la posibilidad de interceptar neblina, mediante la implementación de redes de captura de neblina en la parte media de la cuenca hidrográfica. Esta iniciativa, está desarrollando un proyecto en el cual se ha solicitado la intervención del grupo de ecohidrología, y hemos visto conveniente el apoyo mediante la realización de un proyecto de fin de carrera de una estudiante de la Universidad Politécnica Salesiana, en la maestría de Manejo de Recursos Hídricos. Es importante indicar, que ya existen estudios previos en otras zonas de las islas Galápagos sobre la posibilidad de captura de agua mediante atrapa nieblas; por ejemplo, Echeverría Garcés (2018), estudió el potencial de la captura de niebla en la Isla San Cristóbal.

9.1. Proyecto piloto para la implementación de redes “Atrapa-Niebla”

La Universidad Politécnica Salesiana con apoyo de Conservación Internacional Ecuador realizó una tesis de grado titulada: “Potencial de captura de neblina mediante el sistema de atrapanieblas en la cuenca de Pelican Bay, Santa Cruz, Galápagos”. La investigación fue ejecutada por la Ing. Erika Lascano. En el estudio, se realizó un monitoreo de siete días, durante la temporada de garúa en fincas ubicadas en Bellavista, en la zona agrícola. En la cual se instalaron cinco redes de neblina verticales de 1 metro cuadrado. En la toma de datos se diferenció la medición de precipitación e

intercepción de neblina. Los resultados del estudio dieron como resultado que la captura de agua, en registro medio, en las redes instaladas dentro de la cuenca hidrográfica fue de 1,23 (l/m²/día). Esta investigación nos da una idea de la posibilidad de captura de neblina en la cuenca; sin embargo, debe ser entendida como un ensayo con resultados específicos para el momento y espacio en el que se ejecutó.

9.2. Análisis comparativo de otras experiencias alrededor del mundo

A continuación, en la Tabla 2, se presentan las experiencias obtenidas por la implementación de atrapanieblas considerando diferentes parámetros en países que han implementado esta tecnología:

Tabla 2. Información recopilada de la implementación del sistema de atrapa-nieblas en varios países.

País	Dimensión (m)	Número de atrapa-nieblas	Costo aproximado (\$/m ²)	Volumen de agua obtenido (l/día/m ²)	Fuente
Perú	1 x 1	3	S/I	1,50	(Vértiz Osores <i>et al.</i> , 2017)
Colombia (Los Santos)	1 x 1	1	S/I	0,50	(Hernández Contreras <i>et al.</i> , 2017)
Colombia (Ráquira)	1 x 1	1	38,80	7,2	(Rodríguez y Molina, 2016)
España	1 x 1	3	S/I	0,97	(Hernández Contreras <i>et al.</i> , 2017)
Guatemala (Purulhá)	1 x 1	1	40,86	1,28	(Ayala, 2017)
Guatemala (Cobán)	1 x 1	1	40,86	1,4	(Ayala, 2017)
Chile (Desierto de Atacama)	1 x 1	1	38,15	1,20	(Tapia <i>et al.</i> , 2019)
Chile (El Tofo)	1 x 1	1	S/I	2,6	(López & Cando, 1989)
Chile (Punta Patache)	1 x 1	1	S/I	8,0	(Cereceda, 2000)
San Cristóbal (Galápagos)	1 x 1	3	50,00	8,5	(Domínguez <i>et al.</i> , 2019)

S/I: Sin información. Fuente: Erika Lascano, 2019

Como conclusión, se puede observar que el potencial de almacenamiento de agua por atrapanieblas dentro de la cuenca de Pelican Bay (1,23 l/día/m²), estaría dentro de un margen aceptable en comparación con algunas experiencias que, como en Ráquira, Colombia alcanza únicamente los 0,50 l/día/m². Sin embargo, comparado con la experiencia de San Cristóbal, este intento de captura de agua es casi ocho veces menor. Por lo que se debe generar investigación más consistente para analizar la real dimensión de aporte de esta técnica de captura de agua.

Datos de contacto

El sitio demostrativo de ecología Pelican Bay de Galápagos es coordinado por:

Marco Albarracín, Universidad Politécnica Salesiana e ISEH.

Correo electrónico: marcoalbarracin@gmail.com

Noemí d'Ozouville, Consejo de Gobierno de Régimen Especial de Galápagos

Correo electrónico: pajarobrujo@gmail.com

Christian Domínguez, Universidad Politécnica Salesiana y Proyecto GIIWS.

Correo electrónico: christian.dominguezg@gmail.com

Patricia Jaramillo Díaz, Fundación Charles Darwin

Correo electrónico: patricia.jaramillo@fcdarwin.org.ec

Referencias bibliográficas

Albarracín, M. (2019). Aplicación del Enfoque Ecohidrológico en la cuenca Hidrográfica de "Pelican Bay" para la Provisión de Recursos Hídricos en Santa Cruz, Galápagos. Reporte Privado.

Albarracín, M.; Gaona, J.; Chicharo, L.; Zalewski, M. (2018). Ecohidrología y su Implementación en Ecuador. EDILOJA.

Ayala, O. A. R. (2017). Implementación de Sistemas Básicos de Captación de Agua de Niebla, Caso de Estudio Las Verapaces. Universidad de San Carlos de Guatemala, 4, 0-123.

Barradas, V. L. (2007). La importancia de la niebla como fuente natural y artificial de agua en la región de las grandes montañas del estado de Veracruz, México. *Foresta Veracruzana*, 2(2), 43-48.

Cazar, S. (2015). Vulnerabilidad ante el cambio climático de los ecosistemas y especies icónicas de Galápagos. 2015.

Cereceda, P. (2000). Los Atrapanieblas, Tecnología Alternativa para el Desarrollo rural. *Medio Ambiente y Desarrollo*. Cipma, XVI(4), 51-56.

d'Ozouville, N. (2007). Etude du fonctionnement hydrologique dans les îles Galápagos: caractérisation d'un milieu volcanique insulaire et préalable à la gestion de la ressource. Paris 6.

d'Ozouville, N. (2008). Manejo de recursos hídricos: caso de la Cuenca de Pelican Bay. January 2007, 158-166.

d'Ozouville, N. (2018). Ecohidrología de la isla Santa Cruz, Galápagos. In M. Albarracín, J. Gaona, L. Chicharo, M. Zalewski (Eds.), *Ecohidrología y su Implementación en Ecuador*, pp. 156-157. NCI, UTPL, GADPaltas, INGERALEZA. EDILOJA.

Darwin, C. (1859). *On the origin of species by means of natural selection, or. The Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life*, London/Die Entstehung der Arten durch natürliche Zuchtwahl, Leipzig oJ.

Echeverría Garcés, P. A. (2018). Potencial de la captura de niebla para uso doméstico rural y riego durante la época seca del año en la isla San Cristóbal, Galápagos, Quito.

Epler, B. (2007). *Turismo, Economía, Crecimiento Poblacional y Conservación en Galápagos*. Elaborado para la Fundación Charles Darwin.

- GADMSC (2015). Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial Cantón Santa Cruz 2015-2027. Imprenta Torrescal.
- Galapagos islands Integrated Water Studies - GIIWS (2016). <http://www.galapagos-hydrology.fr/index.php/observatoireseng/santa-cruz-pelican-bay-watershed>
- González, A. (2013). Cálculo del balance hídrico a nivel de suelo en la zona agrícola de la cuenca Pelikanbay en la isla Santa Cruz-Galápagos, Ecuador.
- Hamann, O. (1979). On climatic conditions, vegetation types, and leaf size in the Galápagos Islands. *Biotropica*, 101-122.
- Hernandez Contreras, C.; Amaya Corredor, C. A.; Duran Ayala, S. J.; Vargas Buitrago, A. J.; Osorio Trisancho, S. L.; Cala Almeida, K. J. (2017). Propuesta De Un Sistema De “ Atrapa-Nieblas ”, Como Fuente De Agua No Convencional En La. July, 19-21.
- Instituto Nacional de Estadísticas y Censos - INEC (2018). Resultados del Censo 2010, <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/resultados/>
- Jaramillo, P., S. Lorenz, G. Ortiz, P. Cueva, E. Jiménez, J. Ortiz, D. Rueda, M. Freire, J. P. Gibbs, and W. Tapia. (2015). “Galapagos Verde 2050: An Opportunity to Restore Degraded Ecosystems and Promote Sustainable Agriculture in the Archipelago.” Pp. 133–43 in *Galapagos Report 2013-2014*, edited by GNPD, GCREG, CDF, and GC. Puerto Ayora, Galápagos, Ecuador.
- Jaramillo, P., W. Tapia, L. Negoita, E. Plunkett, M. Guerrero, P. Mayorga, and J. P. Gibbs. (2020). *El Proyecto Galápagos Verde 2050 (Volumen 1)*. edited by P. Paramillo, W. Tapia, and J. P. Gibbs. Puerto Ayora-Isla Santa Cruz.
- López, J. E.; Cando, W. (1989). Construcción de atrapanieblas *, 41-47.
- Mateus, C.; Guerrero, C. A.; Quezada, G.; Lara, D.; Ochoa-Herrera, V. (2019). An integrated approach for evaluating water quality between 2007-2015 in Santa Cruz Island in the Galapagos Archipelago. *Water*, 11(5), 937.
- Michael, T.; Moity, N.; Costa, M.; Jarrín, J. M.; Oropeza, O.; Aburto, de L. P. S. (2019). Manglares en Galápagos: Estimando su contribución al sustento y buen vivir humanos.
- Percy, M. S.; Schmitt, S. R.; Riveros-Iregui, D. A.; Mirus, B. B. (2016). The Galápagos archipelago: a natural laboratory to examine sharp hydroclimatic, geologic and anthropogenic gradients. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 3(4), 587-600.
- Plan de Manejo de las Áreas Protegidas de Galápagos para el Buen Vivir - PNG (2014). A. Izurieta, W. Tapia, G. Mosquera, S. Chamorro (eds.). Imprenta Mariscal, http://www.galapagos.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2016/07/DPNG_Plan_de_Manejo_2014.pdf
- Pryet, A.; Domínguez, C.; Fuente, P.; Chaumont, C.; Villacís, M.; Violette, S. (2012). Quantification of cloud water interception along the windward slope of Santa Cruz Island, Galapagos (Ecuador). *Agricultural and Forest Meteorology*, 161, 94-106. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.03.018>
- Rodríguez, J. P.; Molina, P. A. (2016). Estudio de prefactibilidad para la posible implementación de atrapanieblas en el municipio de ráquira.
- Salvador, G. (2015). Análisis del sistema de producción y de abastecimiento de alimentos en Galápagos. 106.
- Stoops, G. (2014). Soils and paleosoils of the Galápagos Islands: what we know and what we don't know, a meta-analysis. *Pacific Science*, 68(1), 1-17.
- Tapia, F. C.; Meza, F. A.; Hernández, P.; Alfaro, R.; Muñoz, C. (2019). Estrategia de riego para mitigar el estrés hídrico en olivos cultivados en Taltal, Desierto de Atacama. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Intihuasi, 392, 86.

The Economics of Ecosystems and Biodiversity: Mainstreaming the Economics of Nature - TEEB (2010). A synthesis of the approach, conclusions and recommendations of TEEB.

Trueman, M.; d'Ozouville, N. (2010). Characterizing the Galapagos terrestrial climate in the face of global climate change. *Galapagos Research*, 67, 26-37.

Vértiz Osos, J. J.; Guevara Duarez, M. F.; Vilchez Ochoa, G. L.; Delgado Rodríguez, R. M.; Cucho Flores, R. R.; Vértiz Osos, R. I. (2017). Tecnología para "Atrapar" el Agua: Una Experiencia Exitosa y su Impacto Socioeconómico-Ambiental. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 21-25.

Violette, S.; d'Ozouville, N.; Pryet, A.; Deffontaines, B.; Fortin, J.; Adelinet, M. (2014). Hydrogeology of the Galapagos Archipelago: an integrated and comparative approach between islands. *The Galápagos as a Laboratory for the Earth Sciences*, Edited by: Harpp, KS, Mittelstaedt, EL, D'Ozouville, N.; and Graham, DW, 167-183.

Zalewski, M. (2018). Ecohidrología como un marco para la mejora del potencial de sostenibilidad de cuencas hidrográficas. In M. Albarracín, J. Gaona, L. Chicharo, M. Zalewski (eds.), *Ecohidrología y su Implementación en el Ecuador*, pp. 51-59. EDILOJA.

Capítulo 8

Los humedales costeros tropicales y el desarrollo costero: sitio de demostración de ecohidrología en el Lago Victoria

Kathleen Sullivan Sealey ⁽¹⁾, Jacob Patus ⁽¹⁾, John Bowleg ⁽²⁾

1. Ubicación del Lago Victoria

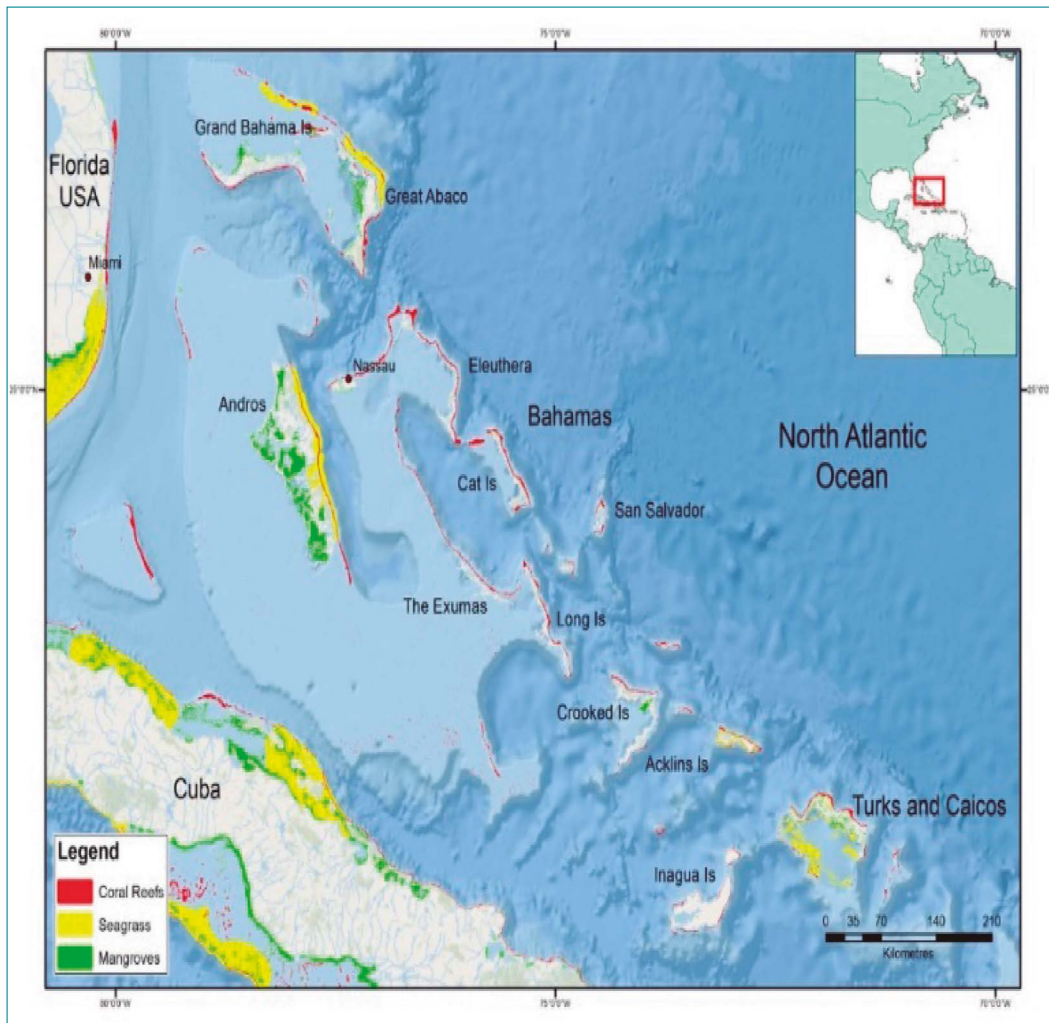
La Mancomunidad de las Bahamas (las Bahamas), situada entre las latitudes 20-28° N y las longitudes 72-80° W, comprende un archipiélago de 260.000 km² de islas carbonatadas bajas, rocas y cayos. El país cuenta con más de 350.000 residentes y más de 4 millones de turistas que lo visitan anualmente. Las orillas poco profundas están dominadas por comunidades de sedimentos blandos, como praderas marinas y planicies de algas. La baja altitud del archipiélago hace que las islas sean especialmente vulnerables al aumento del nivel del mar y a los efectos del cambio climático (Przeslawski *et al.*, 2008). Las comunidades naturales como los arrecifes de coral, los manglares y los lechos de vegetación marina son especialmente valiosos como capital natural que protege a las comunidades insulares de los efectos de las tormentas y estabiliza las costas (Figura 1) (Silver *et al.*, 2019). Los humedales costeros son particularmente valiosos por sus servicios ecosistémicos, los cuales permiten amortiguar las marejadas ciclónicas, reducir las inundaciones, gestionar las fuentes terrestres de contaminación (LBSP, por su sigla en inglés) y estabilizar las costas.

Las Bahamas habían acordado proteger el 20 % de sus recursos marinos en parques nacionales y zonas protegidas para el año 2020, por lo que existen grandes parques y reservas marinas en todo el país. Sin embargo, estos parques en general están alejados de los centros poblados, por lo que no suelen haber humedales costeros valiosos cerca de los asentamientos. El turismo en las Bahamas depende de las playas, el buceo, el submarinismo y la pesca. El crecimiento económico depende en gran medida del desarrollo turístico en las treinta islas pobladas y en muchos cayos de propiedad privada. Existe una gran preocupación por la pérdida de humedales costeros como consecuencia del desarrollo de complejos turísticos costeros y puertos deportivos. Los ecosistemas tropicales de aguas poco profundas son muy sensibles a las alteraciones ambientales, y el estrés de las fuentes terrestres de contaminación ha provocado una eutrofización localizada en hábitats, bahías y embalses de todo el país (Díaz y Rosenberg, 2008) (Sealey, 2004b, Sealey *et al.*, 2014). La inversión en zonas marinas protegidas es importante, pero debe ir acompañada de la protección de los humedales costeros y de comunidades naturales que actúen como barreras dentro y alrededor de los paisajes urbanos de todo el país. El objetivo del Proyecto de Demostración de Ecohidrología en Gran Exuma era integrar la gestión de los humedales en la planificación urbana de George Town.

(1) Laboratorio de Ecología Costera, Departamento de Biología, Universidad de Miami, 1301 Memorial Drive, Coral Gables, FL, EE.UU., 33142.

(2) Water and Sewage Corporation; Chartered Water & Environmental Manager, P.O. Box N-3905 Nassau, N.P., Bahamas

Figura 1. Mapa de la Mancomunidad de las Bahamas con la batimetría y las principales comunidades naturales que proporcionan servicios ecosistémicos para estabilizar las costas ante al aumento del nivel del mar



Fuente: Elaboración propia a partir de información de J. Silver et al., 2019.

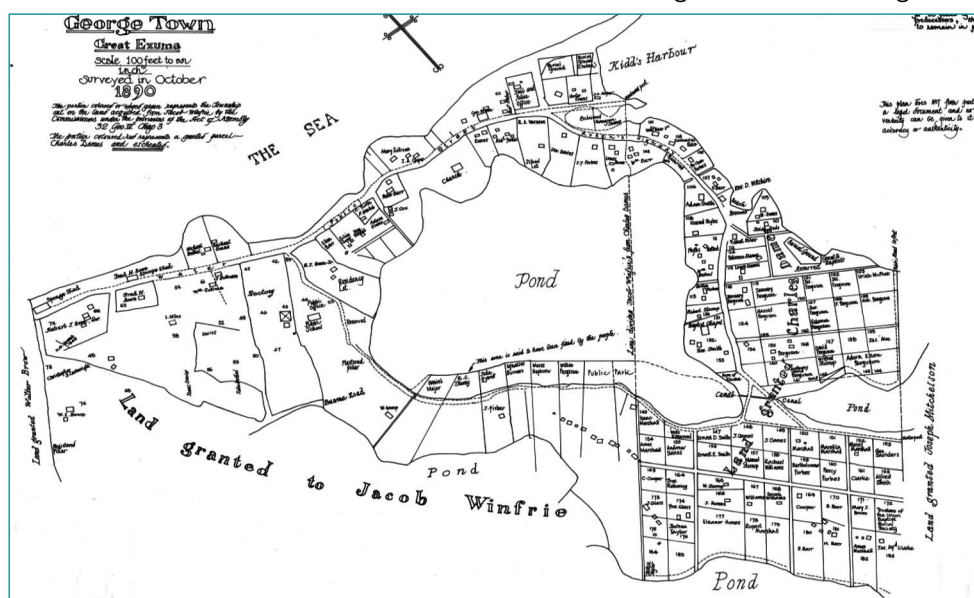
Victoria Pond (“el lago”) es un lago de manglares que forma parte de un gran complejo de humedales costeros y se encuentra en el centro de George Town, Exuma (las Bahamas). La comunidad está construida alrededor del lago, el cual ofrece belleza natural, un hábitat para los peces y acceso a un frente costero. La falta de una gestión coordinada y la existencia de prácticas de desarrollo costero deficientes afectaron al Lago y este se ha deteriorado con el tiempo. Se ha contaminado con las aguas residuales de los pozos negros adyacentes y se ha cubierto de plantas invasoras. Los canales de desagüe del Lago estaban obstruidos con basura y representaban una verdadera amenaza para la salud pública debido a las ratas, los mosquitos y la filtración de aguas residuales sin tratar. El Proyecto de Demostración de Ecohidrología pretende revertir años de mala gestión. El objetivo es reeducar a la comunidad para que deje de verter basura, aguas residuales y efluentes en el Lago Victoria, y crear una mejor administración de los humedales con importantes beneficios para la producción piscícola y el turismo basado en la ecología.

El proyecto de demostración de ecohidrología se centra en el Lago Victoria y el conjunto de humedales adyacente. Este proyecto ha reunido a un equipo de científicos, empresas locales y el consejo del gobierno local de Exuma para lograr la conexión pública entre la gestión de las zonas costeras y la salud de la economía basada en el turismo de Gran Exuma. Este resumen del proyecto describe la degradación ecológica que se ha producido, el costo de los daños ecológicos para la comunidad y el plan de acción del proyecto de restauración, así como los logros alcanzados hasta

la fecha. El proyecto de demostración de ec hidrológica está en curso y representa una oportunidad de aprendizaje sobre el costo de los daños medioambientales para toda la comunidad así como sobre la economía de la prevención frente a la restauración. El componente fundamental para el éxito es la participación de la comunidad en las prácticas de gestión costera más allá de la restauración física de los manglares.

El Lago Victoria (Victoria Pond) es hoy un lago de 6,8 hectáreas que posee manglares que cubren unos 425 metros de su perímetro de 1.010 metros. Menos del 42 % del perímetro conserva dichos manglares linderos, y se ha perdido más de una hectárea por la construcción de estacionamientos, rampas para embarcaciones y puertos deportivos. Históricamente, el Lago Victoria estaba conectado con la Laguna Chen, una bahía menos profunda situada al sureste. La carretera principal (Queen's Highway) que dirige al sur de George Town separaba ambos lagos; con el tiempo, las orillas de los manglares se rellenaron para crear parcelas de casas, lo cual redujo la unión original entre ellos a un estrecho canal con una alcantarilla de 1,2 m bajo la carretera. Las carreteras que rodeaban el lago también bloqueaban el flujo de los humedales efímeros situados al oeste, atrapando el agua en embalses. Se han utilizado zanjas para intentar drenar estos lagos en lugar de restaurar el flujo original del humedal. La subdivisión de la tierra en pequeñas parcelas familiares alrededor del asentamiento original de George Town (Figura 2) promovió la pérdida de las conexiones hidrológicas en torno al Lago Victoria. Las pequeñas parcelas motivaron a sus propietarios a rellenar sus tierras, desplazando a menudo el flujo de agua a otras zonas.

Figura 2. Concesiones históricas de tierras alrededor del Lago Victoria, George Town, Exuma



Fuente: Kathleen Sullivan Sealey a partir de la información de la George Town Public Library, 2012.

Los cambios ecológicos más drásticos se han producido en la calidad del agua y la pérdida de praderas marinas, con una disminución de la diversidad de la fauna marina dentro del propio Lago Victoria. Además, hay impactos más amplios en los arrecifes de parches de coral justo fuera del lago, en el adyacente puerto de Elizabeth, lo que vincula las modificaciones realizadas por los humanos y el uso de la tierra con la degradación de los recursos marinos. El sedimento del fondo poco profundo del lago era de fango arenoso, con vegetación principalmente de praderas marinas y escasas comunidades de sustrato arenoso, con algunos corales dispersos. A medida que se eliminaban secciones de los manglares, la escorrentía de las tormentas depositaba sedimentos más finos con alto contenido orgánico en el lago. Los materiales floculantes se volvían a suspender durante las tormentas o vientos fuertes. La materia orgánica resuspendida causaba la proliferación de algas, lo que aumentaba la turbidez y la demanda biológica de oxígeno (DBO) en el lago,

agravada por una circulación limitada. Las consecuencias de este ciclo son un aumento de la carga orgánica de los sedimentos junto con un flujo menor de luz al fondo para el crecimiento de las praderas marinas (Bell y Elmetri, 1995; Bell *et al.*, 1989; Paul *et al.*, 1995). La calidad del agua se ve especialmente afectada por las tormentas. La escorrentía de la lluvia procedente de las superficies pavimentadas y despejadas de George Town causaba que los sedimentos, nutrientes y otros contaminantes ingresaran directamente en el ecosistema del lago. Las mareas semidiurnas desiguales transportan estos contaminantes a los medios marinos adyacentes, como el puerto de Elizabeth. En 2009, el Lago Victoria no se consideraba apto para el baño, sufría frecuentes floraciones de algas y la pérdida de praderas marinas.

2. Organización formal

Hay tres niveles de jurisdicción y gestión sobre el lugar donde se realiza el proyecto de demostración de ecohidrología del Lago Victoria: 1) Gobierno local, 2) Gobierno central y 3) Organizaciones comunitarias como Exuma Pride. El Consejo del Distrito de Exuma (Gobierno Local) es responsable de la gestión de la basura y el mantenimiento de las zonas públicas alrededor del Lago. Dada la importancia del entorno costero, el Gobierno local ha decidido proteger la singular comunidad de manglares asociada al Lago Victoria y definió una zona de preservación local. La conversión histórica de la tierra ha provocado un aumento de los contaminantes y sedimentos en la escorrentía de las aguas pluviales, como fertilizantes, pesticidas, aceite para motores y metales pesados que se desprenden de las estructuras impermeables, como aceras, carreteras y estacionamientos. El gobierno local puede abordar mejor los problemas de la basura y los vertidos en las inmediaciones del Lago Victoria. Los recursos del gobierno local son limitados a la hora de abordar el creciente problema de los residuos sólidos a medida que cada vez más turistas descubren Exuma. Grupos sin fines de lucro como la Fundación Exuma buscan nuevas fuentes de financiación para limpiar la isla y colocar más contenedores de basura en las comunidades.

El Administrador Insular de Exuma, representante local del gobierno central, es responsable de hacer cumplir las leyes y políticas nacionales relativas a la gestión del muelle gubernamental y las vías navegables alrededor de Exuma. El Administrador Insular puede, en última instancia, identificar nuevas fuentes de financiación para la gestión de George Town por parte del Gobierno Local, en particular en lo relativo a cuestiones de gestión de aguas pluviales y recolección de basura. Por último, la Organización Comunitaria Exuma Pride es un comité dirigido por ciudadanos que identifica proyectos de embellecimiento en George Town y los alrededores de la isla y colabora con el Gobierno local para financiar mejoras. Exuma Pride ha sido financiada a través del Miembro del Parlamento para las Exumas e Islas Ragged y se puede asociar con la Fundación Exuma para recaudar fondos al margen de los recursos gubernamentales.

La gestión de los humedales de todo el país está supervisada por el Comité Nacional de Humedales, que actúa para aplicar una Política Nacional de Humedales. En Bahamas, las amenazas a los humedales se derivan de la falta de concienciación, la mala planificación territorial, la construcción desordenada de puertos deportivos, las especies invasoras, la excavación y recuperación ilegal y una aplicación inadecuada de la ley.¹ Para salvaguardar este preciado recurso, Bahamas se adhirió a la Convención sobre los Humedales (Ramsar, Irán, 1971) en 1997. En virtud del artículo 3.1 de la Convención, las Partes Contratantes acuerdan: “formular y aplicar su planificación de forma que favorezca la conservación de los humedales incluidos en la Lista y, en la medida de lo posible, el uso razonable de los humedales de su territorio”. En 1987, se adoptó la siguiente definición para el término “uso razonable”: “El uso razonable de los humedales consiste en su

1 www.best.bs/wetlands.htm

utilización sostenible en beneficio de la humanidad de forma compatible con el mantenimiento de las propiedades naturales del ecosistema”. El Comité Nacional de Humedales ha buscado oportunidades de colaboración para el sitio del Lago Victoria como proyecto de demostración de ecohidrología, pero no tiene fondos ni jurisdicción sobre la zona.

En cuanto a los océanos costeros y los recursos marinos, varias leyes nacionales importantes ilustran las tendencias recientes. La Ley de la Corporación de Agua y Alcantarillado (1976) se actualiza con frecuencia, ya que constituye el marco regulador de la gestión de los recursos hídricos en Bahamas. Se promulgó para establecer una Corporación de Agua y Alcantarillado con responsabilidades para la concesión y control de los derechos de agua; la protección de los recursos hídricos; la regulación de la extracción, uso y suministro de agua; la eliminación de aguas residuales; y para todo otro fin similar en el país. Esta ley no se aplica directamente al desarrollo, ya que no hay disposiciones sobre el tratamiento de las aguas residuales procedentes de proyectos de construcción. De hecho, la atención se centra más en el uso doméstico del agua y la eliminación de las aguas residuales de las viviendas. En la última década, las Bahamas se han inclinado por la ósmosis inversa como fuente confiable de agua para uso doméstico y se ha abandonado sistemáticamente el uso de pozos en todas las islas. Un porcentaje muy pequeño de la población sigue dependiendo de pozos propios para el agua de uso doméstico. Las Bahamas se enfrenta a costos cada vez más altos con respecto al mantenimiento de los campos de extracción, la creciente contaminación de las aguas subterráneas (sobre todo en Nueva Providencia) y el aumento de la intrusión de agua salada en las frágiles lentes de agua dulce de las islas pequeñas (véase Barton *et al.*, 1994, Cant, 1996).

Un reto aún mayor es el alcantarillado y la eliminación de aguas residuales. Históricamente, las islas, escasamente pobladas, dependían de pozos negros “de absorción” y de inyecciones en pozos profundos, dependiendo así de la disolución (Cant, 1988). El crecimiento de la población humana y el desarrollo de complejos turísticos han creado tanto fuentes puntuales y difusas de contaminación de las aguas residuales costeras, aumentando el riesgo de eutrofización y degradación de los recursos marinos costeros (Joseph y Sealey, 2009). Este reto relativo al tratamiento centralizado y avanzado de las aguas residuales aún no se ha abordado en las Bahamas. Las aguas costeras contaminadas representan una importante amenaza para la salud pública y el turismo con patógenos como el *Staphylococcus aureus* resistente a la meticilina (SARM) (Fleming *et al.*, 2006).

Estrechamente vinculado a la Corporación de Agua y Alcantarillado de las Bahamas está el Ministerio creado por la Ley de Servicios de Salud Medioambiental (1987). Esta Ley se elaboró para promover la conservación y el mantenimiento del medio ambiente en pos de la salud; para el saneamiento adecuado en materia de alimentos y bebidas; y, en general, para la prestación y el control de servicios, de actividades y de otros asuntos relacionados con la salud ambiental. El Ministro responsable tiene la misión de promover y proteger la salud pública y de velar por la conservación y el mantenimiento del medio ambiente en las Bahamas. El Departamento de Salud y Seguridad Medioambiental (DEHS, por su sigla en inglés) tiene una responsabilidad clave en materia de residuos sólidos y gestión de vertederos y basurales. La falta de procesos de eliminación adecuada de los residuos sólidos en todas las islas es probablemente la principal fuente de contaminación de las aguas subterráneas, así como la entrada de residuos sólidos en las aguas costeras (por una gestión inadecuada de los residuos y vertidos ilegales) (Sealey y Smith, 2014). La Ley de Servicios Sanitarios Medioambientales establece específicamente que, para emitir o verter cualquier contaminante en cualquier parte del medio ambiente, primero hay que obtener un certificado de aprobación del director. Este certificado solo se concede cuando el director está convencido de que los métodos o dispositivos que se van a utilizar son adecuados para prevenir o controlar las emisiones o vertidos nocivos. En la práctica, estos métodos o “buenas prácticas” están mal articulados.

Las transformaciones costeras relacionadas con el desarrollo turístico han degradado considerablemente los recursos costeros de las Bahamas, pero este tipo de desarrollo está regulado explícitamente en la Ley de Agricultura y Pesca aprobada por primera vez en 1964, a través de un artículo que habla de las acciones llevadas a cabo durante las fases iniciales del desarrollo que implican la limpieza del terreno. El artículo correspondiente establece específicamente que dentro de las “zonas protegidas” es ilegal plantar, propagar, tomar, arrancar o destruir cualquier especie de planta salvo que se haya expedido una licencia para ello. Por lo tanto, si la actividad de desarrollo se encuentra dentro de un humedal costero protegido, se debe obtener un permiso antes de realizar cualquier acción. La Ley de Recursos Pesqueros (Jurisdicción y Conservación) (1977) contiene disposiciones adicionales relativas a la conservación y gestión de los recursos pesqueros de Bahamas. En esta se amplía los límites de la jurisdicción de las Bahamas sobre los recursos pesqueros contenidos en su Zona Económica Exclusiva (ZEE). La ley establece específicamente que el ministro responsable está autorizado a elaborar reglamentos relativos a la conservación y gestión de los recursos pesqueros y que “las medidas de conservación y gestión se basarán en la mejor información científica disponible”. Aunque no se refiere específicamente al efecto del desarrollo sobre los recursos pesqueros, esta normativa sí establece que las actividades que se lleven a cabo en las Bahamas se deben realizar de forma que la conservación de los recursos pesqueros sea una prioridad fundamental. Recientemente, se han puesto en marcha importantes normativas para proteger a los tiburones, las tortugas y las agrupaciones de desove de los meros de Nassau.

Una ley importante en materia de gestión de las zonas costeras y la protección de los recursos marinos cercanos a la costa es la Ley de Conservación y Protección del Paisaje Físico de las Bahamas de 1997. De todas las leyes medioambientales de las Bahamas, esta ley es la más pertinente para los proyectos de desarrollo costero. Las disposiciones de esta Ley se aplican a: (a) La excavación, explotación de vertederos, canteras o minería de recursos naturales físicos (tales como suelo, roca, cantera, relleno o arena), que excedan las setenta y cinco yardas cúbicas de volumen; (b) la tala de árboles protegidos; y (c) toda excavación realizada por una persona con el fin de desarrollar urbanizaciones turísticas y residenciales de lujo a gran escala. La arena, los áridos y el relleno son ingredientes fundamentales para el desarrollo, y todos ellos son escasos en todo el país. La extracción de áridos y rellenos está estrechamente ligada al desarrollo de puertos y puertos deportivos. El dragado y rellenos ilegales ocurren en todas las islas y provocan daños medioambientales irreparables y costosos de remediar. A menudo, el Gobierno de las Bahamas no tiene más remedio que ejecutar grandes proyectos de dragado, como en el caso de la ampliación del puerto de Nassau para recibir cruceros más nuevos y grandes. Sin embargo, otros proyectos han sido mal ejecutados y no han producido el crecimiento económico esperado para compensar los daños medioambientales.

Tal vez la legislación más importante con respecto a la protección de amplias zonas de recursos marinos y costeros sea la Ley de Fideicomiso Nacional de Bahamas, aprobada en 1959. El reglamento regula todos los parques y reservas terrestres y marinos. Por lo tanto, esta ley solo es aplicable al desarrollo relacionado con el turismo si el terreno que se va a edificar está situado dentro de un parque o una reserva o muy cerca de ellos. La ley contiene algunas estipulaciones fundamentales: a.) Los parques terrestres y marinos han sido designados zonas de repoblación marina para las Bahamas. Se prohíbe la caza, el trampeo, la colocación de redes, la captura o la extracción de peces, tortugas, langostas, caracolas o moluscos, y b.) Se prohíbe el vertido de residuos, aceites o basuras en tierra o en el mar. Sin embargo, el National Trust ha visto su autoridad limitada por otra estipulación: “Con referencia a la propiedad privada, estas ordenanzas no afectan los derechos existentes de toda persona que actúe legalmente en virtud de cualquier derecho de propiedad o interés sobre o relativo a terrenos de los Parques”. Esta estipulación obstaculiza la capacidad del National Trust para gestionar el desarrollo privado en los parques nacionales o en sus inmediaciones.

3. Características generales del proyecto de demostración de ecohidrología en el Lago Victoria

El Lago Victoria se encuentra en el centro de George Town, y el agua fluye tanto por la entrada del canal del este como la del oeste. La característica principal del Lago para los residentes de George Town es que se inunda cuando ocurren tormentas y precipitaciones. Las propiedades de los alrededores del lago se inundan con frecuencia. Este problema se podría mejorar con una mejor gestión de los humedales adyacentes. Las recientes inundaciones han afectado el valor de las propiedades de los alrededores del lago y han incrementado las fuentes terrestres de contaminación de los recursos marinos adyacentes (Figura 3). Sin embargo, es probable que el problema de las inundaciones no se resuelva para aquellas propiedades construidas en las zonas bajas que han sido rellenadas. Para hacer frente a dichas inundaciones los residentes tienen tres opciones: elevar los diques, elevar los edificios o trasladarse fuera de las zonas inundables.

Figura 3: Foto de las inundaciones provocadas por los recientes huracanes en los alrededores del Lago Victoria del proyecto de demostración de ecohidrología. Las inundaciones frecuentes suponen una amenaza para las propiedades, la salud humana y la ecología de los humedales



© Kathleen Sullivan Sealey, 2012.

3.1. Impacto del cambio climático

Las catástrofes naturales, como los huracanes y las inundaciones, cuestan dinero y recursos necesarios para que la Mancomunidad de las Bahamas pueda avanzar para mejorar la vida de sus residentes y gestione las prácticas de construcción nacional en función de la agenda 2030 de las Naciones Unidas. La Agenda de Desarrollo Sostenible incluye 17 objetivos específicos. En esta se reconoce los desafíos específicos a los que se enfrentan los Pequeños Estados Insulares en Desarrollo (PEID), como las Bahamas. Las islas pequeñas son especialmente vulnerables a los efectos del clima y a los impactos de las catástrofes naturales causadas por las numerosas tormentas tropicales que afectan a las Bahamas.

Los Pequeños Estados Insulares en Desarrollo (PEID) son países que sufren las dificultades del desarrollo sostenible debido a que tienen un espacio limitado, altos costos de transporte a las

islas, y una importante vulnerabilidad a los desastres naturales y el aumento del nivel del mar (Kelman y West, 2009).

En los últimos seis años las Bahamas ha sufrido una actividad ciclónica sin precedentes: los huracanes Joanquin en 2015, Matthew en 2016, Irma en 2017 y Dorian en 2019. Las inundaciones se han convertido en el principal problema asociado a los debates sobre el cambio climático en las comunidades insulares locales, incluida George Town.

3.2. Características hidrológicas

El movimiento del agua es el núcleo del sistema ecológico de las islas. En el clima seco y tropical del sur de las Bahamas, el movimiento del agua se realiza a través de las aguas subterráneas y la escorrentía de las aguas pluviales, no hay recursos hídricos superficiales como ríos, lagos o arroyos. La temperatura es fundamental porque puede influir en los niveles de oxígeno disuelto, las tasas de metabolismo de la flora y la fauna, la solubilidad de los solutos (por ejemplo, el carbonato de calcio) y la densidad del agua de mar. En las Bahamas, los niveles de salinidad se pueden ver influidos por la cantidad de agua subterránea que se filtra en las aguas cercanas a la costa, por las altas tasas de evaporación en las orillas poco profundas y por las grandes incursiones de **escorrentía de aguas pluviales**.

Los cambios en los parámetros de calidad del agua derivados de las actividades humanas que afectan la hidrología costera y los patrones de escorrentía varían de forma natural con las mareas y los ciclos diurnos y estacionales, por lo tanto, el lograr documentar los cambios en la calidad del agua costera atribuibles a las modificaciones realizadas por los humanos en las costas puede resultar problemático. En los estudios sobre la calidad del agua en la bahía de Montagu y el puerto de Nassau, adyacentes a Nueva Providencia, se observan concentraciones de nutrientes ligeramente elevadas en comparación con las aguas adyacentes a islas no urbanizadas (Sealey, 2004b). El puerto de Nassau tiene una buena composición de agua oceánica por su geografía abierta. A pesar de las pequeñas elevaciones de la concentración de nutrientes en la columna de agua, las praderas marinas han desaparecido y los arrecifes de parche han perdido el 60 % de sus especies de invertebrados bentónicos (Sealey, 2004a, Lapointe *et al.*, 2004). Sin embargo, la respuesta biótica a las alteraciones costeras es muy diferente: el 100 % de las praderas marinas históricas del puerto de Nassau se han perdido con el desarrollo y han sido sustituidas por llanuras de algas. La eutrofización a largo plazo de esta zona se refleja en el alto contenido de nutrientes en los sedimentos.

La capacidad de detectar y documentar cambios en los nutrientes inorgánicos se ha limitado a muestreos puntuales en ciclos mareales, diurnos o estacionales y solo aparecen valores extremos más altos para parámetros como el nitrógeno total. En cambio, la mayoría de los estudios han documentado los cambios ecológicos en los lechos de algas marinas o en los manglares, en lugar de establecer las fuentes, cantidades y vías de las fuentes terrestres de contaminación difusas (Sealey, 2004a). Las inundaciones arrastran nutrientes terrestres, pesticidas, aguas residuales y otros contaminantes a los ecosistemas costeros. Las fuentes terrestres de contaminación tienen efectos negativos sobre la salud humana, la salud de la fauna, el valor estético y la economía de las costas. Las inundaciones pueden desencadenar la proliferación de algas nocivas que pueden provocar la muerte masiva de peces y perjudicar a las pesquerías locales. Los daños en casas y otras edificaciones liberan escombros en el medio ambiente, como por ejemplo, trozos de metal, madera y cristales rotos que pueden herir a las personas y a la fauna. Los escombros de las tormentas pueden destruir los frágiles hábitats de los humedales, obstruir las vías fluviales y causar erosión costera. La madera tratada químicamente puede filtrar sustancias químicas peligrosas al suelo y al agua.

Las fuertes tormentas, especialmente los huracanes, arrastran residuos sólidos a los entornos costeros, junto con residuos fecales, residuos médicos, objetos punzantes, pilas, mercurio de baterías y aparatos electrónicos, así como toxinas de envases químicos, todo lo cual supone graves amenazas para el medio ambiente y la salud humana. Esto también incluye los plásticos y los bifenilos policlorados (PCB, por su sigla en inglés), que provocan trastornos reproductivos, mayor riesgo de enfermedades y, finalmente, la muerte. Las personas que comen pescado y langostas contaminados pueden absorber los PCB.

La clave para el equilibrio ecohidrológico en las Bahamas es conservar los humedales costeros y las zonas de barreras de vegetación natural para reducir la escorrentía de las tormentas y el ingreso de contaminantes en las aguas cercanas a la costa. Las aguas pluviales se pueden gestionar mediante humedales artificiales planificados que desvíen el agua fuera de las propiedades y utilicen los servicios ecosistémicos naturales de los humedales para atrapar y procesar los contaminantes. Las zonas de barreras de los manglares pueden proteger las costas de las olas y las mareas ciclónicas, pero se debe dejar intacta una superficie considerable de manglares (Guannel *et al.*, 2016). Todos los actores involucrados deben comprender cabalmente el valor de los manglares para proteger la calidad del agua y estabilizar la costa, para lograr cambiar la práctica actual de situar el desarrollo turístico lo más cerca posible de la orilla.

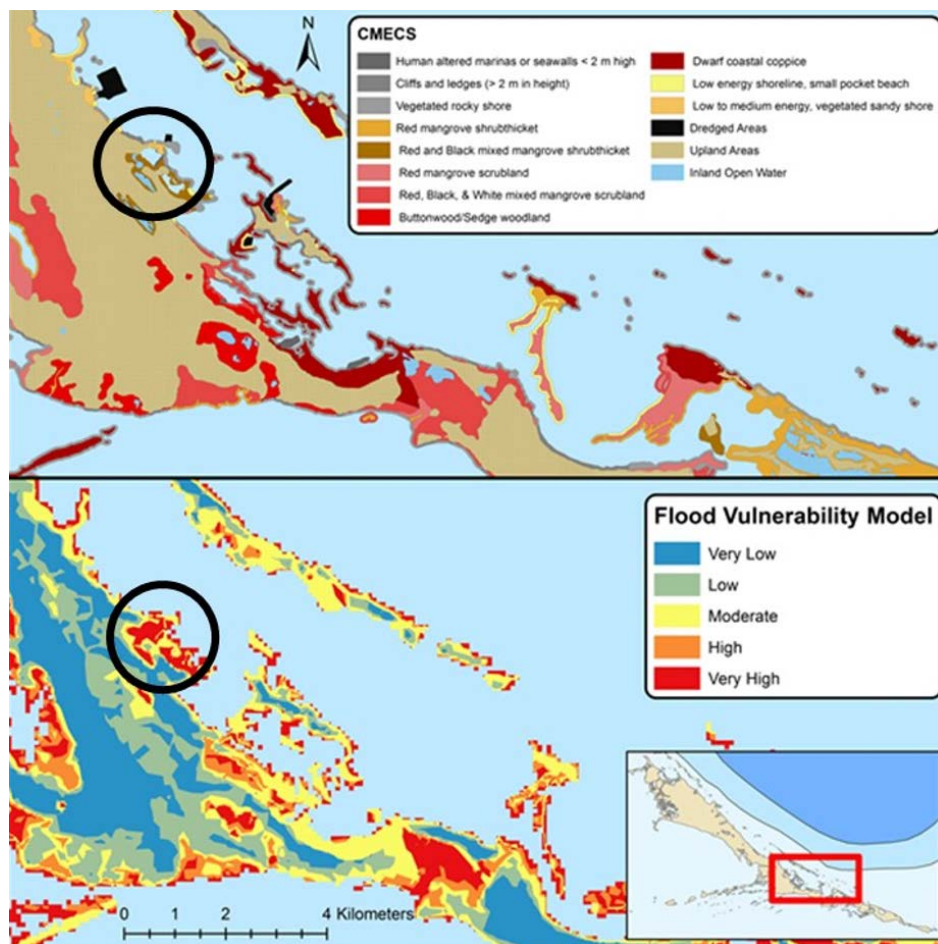
3.3. Descripción ecológica

Los entornos cercanos a la costa y costeros de las Bahamas son únicos por el gran tamaño y extensión de sus sistemas de bancos carbonatados. Gran parte de su diversidad biológica y de su producción se encuentra cerca de las islas y en los márgenes de las plataformas. La zona costera incluye áreas de dunas, playas, rocas, acantilados bajos, humedales, bahías y calas, y a menudo se refiere tanto a los hábitats marinos como terrestres que se encuentran cerca de la costa. Las islas de las Bahamas son esencialmente todas costeras, y la mayoría de la gente vive a menos de dos kilómetros del mar. Además de proporcionar hábitats y recursos fundamentales para muchas especies, como aves marinas, tortugas y mamíferos marinos, los entornos costeros también aportan beneficios a las personas, como zonas de protección contra huracanes, atracciones turísticas, oportunidades educativas y recursos vivos (Sealey *et al.*, 2014; Anthony, 2003; Bjorndal, 1997). El tipo de sedimento determina la geomorfología costera, y va desde la arena o el lodo no consolidados, como los que se encuentran en playas y comunidades de manglares, hasta los sedimentos carbonatados consolidados que componen las costas rocosas y los acantilados. La energía de las olas depende de la velocidad y dirección del viento y del *fetch* (extensión de aguas abiertas adyacente a la costa). La comunidad costera dominante son los embalses protegidos y, a del lado de sotavento de las islas, los manglares. El término “manglares” se refiere no solo a los árboles individuales, sino a las comunidades discretas que se estructuran como bosques, matorrales y arbustos.

Las características estructurales y funcionales de las comunidades de manglares varían enormemente a lo largo del archipiélago (Lugo, 1981) y generalmente se encuentran en zonas resguardadas de las olas de alta energía (Lugo, 1974). Los humedales están muy extendidos en Gran Exuma e incluyen humedales efímeros de agua dulce (que solo se llenan con las fuertes lluvias estacionales), lagos hipersalinos y embalses de manglares, agujeros azules y extensos lagos y arroyos costeros de manglares. Los complejos de humedales a lo largo de la isla son los que filtran y procesan la escorrentía de las aguas pluviales para mantener las condiciones oligotróficas del medio marino. El proyecto de demostración de ecohidrología en el Lago Victoria forma parte de un complejo de humedales mayor que está conectado a través de las aguas superficiales y el flujo subterráneo con el puerto de Elizabeth adyacente (Figura 4).

La evaluación ecológica de los alrededores del Lago Victoria partió del supuesto de que probablemente había tres factores que contribuían al deterioro de la calidad del agua y a la pérdida de servicios ecológicos: 1) los daños físicos y eliminación de manglares y otros humedales asociados, 2) la filtración de aguas residuales que aportan un exceso de nutrientes, y 3) pérdida resultante de la diversidad del ecosistema con el paso del tiempo. Los manglares y los sistemas de arrecifes sanos necesitan langostas, pargos, roncadores y meros. En otras palabras, el plantel completo de especies de la comunidad natural ayuda a protegerla de los cambios (por ejemplo, estabilidad y resistencia ecológicas) (Buchan 2000). Sea cual sea el motivo, las poblaciones de especies marinas esenciales como los peces de arrecife, la langosta y el caracol rosado, han disminuido en los alrededores de George Town, sobre todo junto a zonas muy frecuentadas, como el Lago Victoria.

Figura 4. Entorno ecológico del Lago Victoria que ilustra las comunidades costeras (clasificación mediante FDGC (2012) (arriba) y la vulnerabilidad a las inundaciones (abajo). Los humedales costeros que permanecen intactos pueden servir para proteger las propiedades costeras de las inundaciones. George Town y el Lago Victoria están rodeados



Fuente: Sealey, K. S. y Patu, J., 2017.

Las comunidades de manglares se definieron como aquellas que presentaban una de las siguientes cuatro estructuras de vegetación: bosques bajos, matorrales arbustivos, tierras forestales o bosques verdaderos. Estas comunidades están dominadas por las cuatro especies de manglares comunes en el Caribe (mangle rojo: *Rhizophora mangle*, mangle negro: *Avicennia germinans*, mangle blanco: *Laguncularia racemosa*, y botoncillo: *Conocarpus erectus*). La estructura de la

vegetación viene determinada por los estratos dominantes de la comunidad, definidos tanto por la altura de las plantas como por la superficie de suelo cubierta por el dosel. Factores abióticos como la disponibilidad de agua dulce, la amplitud de las mareas, la morfología costera, la potencia del oleaje y las precipitaciones determinan su extensión, así como una zonación distintiva desde aguas profundas hasta su extensión hacia tierra. Los manglares, incluso los rojos, crecen bien en agua dulce, pero es posible que no se encuentren allí debido a los mecanismos de dispersión de las semillas o a la competencia con otras plantas. La mayoría de los manglares de las Bahamas son comunidades de matorrales, representadas por vastas extensiones de pequeños manglares dispersos a lo largo de llanuras poco profundas y bancos de arena. Son fundamentales para estabilizar las orillas bajas de las islas.

3.4. Entorno socioeconómico de George Town, Gran Exuma

En las Bahamas, se han producido más de USD 6.000 millones en daños por huracanes desde 2015, incluidos USD 3.400 millones por el huracán Dorian en 2019. El huracán Dorian puso de manifiesto la preocupación por el aumento de la severidad de las tormentas por el cambio climático combinado con la aglomeración costera del desarrollo turístico (Sealey y Strobl, 2017). Las pérdidas ocasionadas por el huracán Dorian se estimaron en un 25 % del PBI del país y aumentaron la deuda nacional hasta niveles récord para el país. La rápida evaluación de los daños causados por los huracanes ilustra el problema agravado de los fenómenos meteorológicos extremos con la falta de planificación humana para minimizar los daños materiales (Sealey *et al.*, 2019). La salud de las comunidades bahameñas a futuro dependerá del desarrollo de políticas sólidas para las zonas de amortiguación costeras que incluyan soluciones basadas en la naturaleza para la protección y restauración de los humedales. El proyecto de demostración de ecología en el Lago Victoria tiene el potencial de educar e informar sobre las mejores políticas de gestión costera en entornos urbanos.

3.5. Gobierno y partes interesadas comunitarias

A partir de dos talleres comunitarios, se elaboró una evaluación de los problemas o retos más prioritarios para el proyecto de demostración de ecología en el Lago Victoria (Cuadro 1). La cuestión más prioritaria entre los participantes fue la falta de opciones para los residuos y el reciclaje. La gestión de los residuos sólidos en Gran Exuma es problemática debido a la falta de recursos gubernamentales para gestionar el vertedero sanitario y al coste del transporte de la basura al vertedero y a la estación de transferencia (Sullivan-Sealey y Smith, 2014). En la isla no hay servicio gratuito de recogida de residuos, y el aumento del turismo genera elevados costos de transporte, parcialmente cubiertos con fondos de la administración local. La prevalencia de la basura en el Lago Victoria y sus alrededores ilustra la situación en toda la isla; faltan contenedores públicos de basura, no hay opciones de reciclaje y la financiación de la gestión de residuos sólidos es limitada. La segunda gran preocupación de las partes interesadas es la educación y los conocimientos sobre los efectos de la contaminación en el medio ambiente y las inundaciones. A muchos actores les preocupaba que la expansión de los humedales aumentara la amenaza de inundaciones, y la mayoría se mostraban escépticos ante los efectos a corto plazo de la subida del nivel del mar. Es claro que los daños del huracán Dorian sirvieron de “llamada de atención” para toda la nación.

Cuadro 1. Evaluación de riesgos por las partes interesadas para la restauración y gestión del Lago Victoria. Todas las cuestiones de “Alta” prioridad se enumeran sobre la base de talleres comunitarios y entrevistas

Problema	Comentarios
Difusión comunitaria y residuos sólidos (también conocidos como basura)	<ul style="list-style-type: none"> • Uno de los problemas es que no hay suficientes contenedores de basura: los que hay en George Town no son muy resistentes y los perros callejeros suelen desperdigar la basura. • Se debe hacer un control de alimañas (ratas) en la zona, solo los hogares particulares controlan las ratas sobre todo con veneno que puede contaminar el medio ambiente • Los vertidos ilegales parecen ser un gran problema; ¿se puede colocar un contenedor de basura en la comunidad para tirar cosas grandes? El problema es quién pagará el contenedor. ¿Son unos pocos individuos responsables de los vertidos ilegales y cómo se puede gestionar este delito? • Los regatistas suelen tirar la basura gratis, así que ¿cómo los podríamos incorporar positivamente a una campaña de reciclaje y de eliminación de basura? <p>SUGERENCIAS</p> <ul style="list-style-type: none"> • Evitar el uso de venenos cerca de los cursos de agua, iniciar la caza municipal de ratas. • Mejorar los contenedores de basura locales y su recolección en el centro de George Town, solicitar colaboraciones público-privadas con empresas para colocar un gran contenedor en la zona para depositar la basura cómodamente. • Empezar a poner a prueba el marco jurídico para perseguir los vertidos ilegales. Para ello será necesaria una mayor cooperación entre la policía, la administración local y Sanidad Ambiental. • Trabajar en colaboración con la Fundación Exuma, pero centrándose explícitamente en las cuestiones medioambientales y de conservación de George Town.
Reciclaje de botellas, latas y plásticos	<ul style="list-style-type: none"> • ¿Se puede extender la normativa «libre de botellas» de Fish Fry a los bares de George Town? ¿Se puede utilizar la prohibición del plástico promulgada en 2020 para reducir la basura y los residuos sólidos? • ¿Qué pasa con el reciclaje? ¿Hay sitios adecuados para recoger las botellas recicladas? • Entre los residentes hay una actitud de “despreocupación” ante cómo luce de la comunidad. <p>SUGERENCIAS</p> <ul style="list-style-type: none"> • Iniciar algún nivel de RECICLAJE, aunque las actividades tengan un alcance limitado. • Centrar los esfuerzos para la gestión de la basura y un centro único de reciclaje en torno a George Town para conseguir la máxima participación de la población local y los visitantes.
Conocimiento del medio ambiente y alfabetización científica	<ul style="list-style-type: none"> • ¿Hasta qué punto los ciudadanos comprenden realmente los problemas relacionados con la degradación del medio ambiente? ¿Se puede utilizar la creación de una reserva de manglares en el centro de George Town como centro de educación medioambiental? • ¿Los residentes y empresarios conocen realmente las leyes, normativas y obligaciones de los tratados en materia de medio ambiente? • ¿El gobierno local aprovecha alguna oportunidad de financiación para crear programas de «turismo verde» en la comunidad? <p>SUGERENCIAS</p> <ul style="list-style-type: none"> • El gobierno local debería asociarse con la Fundación Exuma para explorar y recaudar fondos para proyectos medioambientales específicos, como el uso de plantas autóctonas para la construcción de jardines. • La Cámara de Comercio debe revisar anualmente las leyes y normativas medioambientales con la Oficina de Salud Medioambiental. • Sería útil invertir en señalización pública sobre los manglares y el entorno del Lago Victoria para desincentivar los vertidos.

Problema	Comentarios
Salud pública y medio ambiente	<ul style="list-style-type: none"> Las fosas sépticas no se mantienen adecuadamente: ¿quién paga las inspecciones y el mantenimiento de esta zona a lo largo del canal? ¿Se deben colocar fosas sépticas a lo largo del canal en terrenos rellenados? Es una amenaza para la salud; el gobierno local debería reunirse con otros organismos locales para ver cómo arreglar esa zona. Hay que ponerse en contacto con el diputado e informarle sobre el problema. <p>SUGERENCIAS</p> <ul style="list-style-type: none"> Gran parte de la calidad ambiental y de la eutrofización costera se puede solucionar con un tratamiento adecuado de las aguas residuales. Vincular el tratamiento avanzado de aguas residuales a la recuperación de agua para proyectos agroecológicos de pequeña escala. Los programas medioambientales se pueden vincular a nuevas oportunidades económicas y a la diversificación.

Fuente: Kathleen Sullivan Sealey.

4. Servicios ecosistémicos del Lago Victoria, un humedal costero

En pocas palabras, los humedales son tierras en las que la saturación con agua es el factor dominante que determina la naturaleza del desarrollo del suelo y los tipos de comunidades vegetales y animales que viven en el suelo y en su superficie. La Convención sobre los Humedales (Ramsar, Irán, 1971)² define los humedales de la siguiente manera: “las extensiones de marismas, pantanos y turberas, o superficies cubiertas de aguas, sean estas de carácter natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda los seis metros”. En el archipiélago de las Bahamas predominan los humedales costeros, como los arroyos de manglares, las lagunas anquialinas y los humedales de pastizales de cordillera. Otros tipos de humedales costeros son los pantanos de agua salada, los pantanos de agua dulce y las depresiones arbustivas.

La importancia ecológica de los humedales costeros como hábitat de peces y fauna silvestre está bien documentada (Acosta y Butler, 1997; Nagelkerken y Van Der Velde, 2004; Dorenbosch, 2004; Mumby *et al.*, 2004). Estos sistemas dinámicos desempeñan un papel clave como red alimentaria principal en la comunidad costera, con estructuras tróficas complejas. La hojarasca y las ramas de los manglares son descompuestas por hongos y otros microorganismos en materia orgánica llamada detritus. Esto alimenta a detritívoros como caracoles y moluscos (por ejemplo, la caracola rosa, *Aliger gigas*, de gran importancia comercial), que a su vez alimentan a animales depredadores más grandes como peces, anfibios, reptiles y aves migratorias y nidificantes (por ejemplo, águilas pescadoras) a través de una compleja red alimentaria.

Además de proporcionar grandes volúmenes de alimentos que atraen a muchas especies animales, los manglares sirven como importantes hábitats de cría para especies de peces de arrecife, algunas de las cuales son objeto de comercio (por ejemplo, pargos, roncadors, meros), así como especies de invertebrados, como la langosta espinosa, *Paulinus argus*, de gran importancia comercial. La red de raíces, especialmente las del mangle rojo, que tiene raíces de sostén, y las aguas poco profundas, sirven de refugio natural a las especies juveniles, lo que lo convierte en un hábitat ideal para la cría. El papel de los manglares como hábitats de cría ha sido documentado por autores como Dorenbosch *et al.* (2004), que descubrieron que varios peces de arrecifes de

² Tratado intergubernamental adoptado el 2 de febrero de 1971 para la conservación y el uso racional de los humedales y sus recursos. www.ramsar.org

coral se encontraban en densidades notoriamente mayores en arrecifes de coral adyacentes a bahías con praderas marinas y manglares que en arrecifes situados a cierta distancia de hábitats de manglares. Los manglares también albergan algas e invertebrados que se pueden encontrar adheridos a las raíces de los mangles.

Los manglares no solo son esenciales como hábitat y fuente de alimento, sino que son igualmente importantes como estructuras físicas, especialmente para islas como las Bahamas. La red y el número masivo de raíces de los manglares absorben el impacto de las olas, fijan los sedimentos e impiden que la tierra sea arrastrada al océano. Así se evita la sedimentación de las praderas marinas y los arrecifes de coral, lo cual puede provocar la proliferación de algas. Durante las tormentas, los humedales funcionan como esponjas naturales, ya que frenan el impulso y el potencial erosivo del agua durante las precipitaciones. Los manglares también mejoran la calidad del agua al filtrar los sedimentos y procesar los nutrientes y contaminantes de la escorrentía. Por lo tanto, toda pérdida en los hábitats de los manglares significa una pérdida de importantes funciones ecológicas, económicas y de conservación. Las comunidades de manglares de las Bahamas son hábitats vitales para una gran diversidad de plantas y animales acuáticos y terrestres, incluidos peces, anfibios y aves, algunos de los cuales han sido catalogados como amenazados, protegidos o en peligro de extinción por la legislación nacional y/o los tratados internacionales que se han firmado (por ejemplo: Flamenco antillano, mero de Nassau, caracola reina, etcétera).

Los residentes de George Town esperan que los ecosistemas que les rodean permitan gestionar los contaminantes, reciclar los nutrientes y fomentar las relaciones tróficas que permitan producir pescado, langostas y caracolas para el consumo local. Los servicios ecosistémicos incluyen la estabilización de las costas, la protección de las tierras altas frente a las inundaciones y el mantenimiento de la diversidad biológica, que a su vez reduce los agentes patógenos y las especies plaga como moscas, mosquitos y ratas (véase Dailey, 1997). A escala mundial, la mayor amenaza para los ecosistemas costeros son las alteraciones hidrológicas que provocan la entrada de un exceso de nutrientes y contaminantes en los recursos hídricos. Actualmente se documentan episodios de eutrofización e hipoxia en los principales ecosistemas costeros del mundo (Díaz y Rosenberg, 2008; Burke y Maidens, 2004).

Las causas de la hipoxia en los grandes ríos y estuarios son complejas y están relacionadas con cambios a gran escala en el uso del suelo que alteran los patrones de nutrientes y sedimentos transportados a las aguas costeras. La escala y la persistencia de los episodios de hipoxia pueden cambiar profundamente la ecología y el flujo energético de los ecosistemas marinos a escala mundial (Díaz y Rosenberg, 2008). Sin embargo, en las islas de las Bahamas, los nutrientes y los sedimentos también entran en las aguas cercanas a la costa a través de la filtración de aguas subterráneas y la escorrentía superficial de las tormentas, y este intercambio casi omnipresente de agua dulce y nutrientes en las pequeñas islas carbonatadas hace que la zona costera sea especialmente sensible a la eutrofización con las perturbaciones humanas (Cant, 1977).

Los esfuerzos de restauración costera en las Bahamas se han centrado en invertir la erosión de las playas o proteger las propiedades costeras. Se han emprendido pocos proyectos para restaurar los manglares costeros e incorporar una reserva de humedales a una comunidad local. El Proyecto de Restauración del Lago Victoria incluye la reconstrucción de humedales costeros, zonas de amortiguación costera, así como compromisos de gobernanza local para gestionar la planificación del uso del suelo para incorporar las reservas locales de humedales. Gran parte de la restauración se centra en modificaciones físicas para restablecer el flujo y crear una barrera de vegetación entre las viviendas y los humedales. Sin embargo, el mayor reto es crear prácticas de “administración” en las que cada residente asuma una responsabilidad personal en la protección de los humedales. Es probable que los cambios a microescala y la acción de los residentes individuales “salven o arruinen” el proyecto de restauración. El objetivo es reducir los “focos de hipoxia” que tienen mayores implicaciones ecológicas y mejorar de forma mensurable la abundancia y diversidad de peces en el sistema del lago.

5. Objetivos

Desde 2009, los ecologistas de la Universidad de Miami, el personal de la Fundación Exuma y los residentes de Exuma han trabajado para limpiar el lago Victoria y restaurar el entorno natural de humedales en el centro de la histórica George Town. Los huracanes de 2015 a 2019 plantearon una nueva urgencia de gestionar los humedales costeros como herramienta para mitigar el aumento del nivel del mar y las inundaciones relacionadas con las tormentas. El Lago Victoria era el mayor y más profundo de una serie de lagos de manglares conectados entre sí que proporcionaban un hábitat crítico para animales salvajes como el sábalo, el macabí, las garzas, las garcetas y el águila pescadora, y que proporcionaban una inundación controlada a lo largo de las crestas orientales de Gran Exuma.

La visión general del proyecto de restauración de Victoria Pond es demostrar que un humedal costero muy alterado puede restaurarse y recuperar su función ecológica. El proyecto está concebido para demostrar el valor de un humedal y de un entorno costero protegidos dentro de un asentamiento poblado; demostrar que la gente puede vivir junto a los manglares y su fauna asociada. Los objetivos son:

1. Establecer una reserva local de manglares que incluya el Lago, una zona de amortiguación costera adecuada, canales y embalses y lagos asociados que funcionen como una unidad ecológica.
2. Completar la limpieza, excavación y restauración necesarias para restablecer el drenaje natural y el flujo de las mareas a través del sistema de reserva de humedales; en última instancia, la limpieza del Lago Victoria mejorará la calidad del agua costera del puerto de Elizabeth.
3. Delimitar la zona de reserva con marcadores y señalización y restaurar las comunidades de plantas autóctonas en la zona costera del Lago Victoria.
4. Desarrollar programas a largo plazo de divulgación comunitaria y administración costera para ayudar a mantener y financiar la gestión de la reserva de manglares del Lago Victoria.
5. Documentar avances cuantificables de la calidad del agua costera y del hábitat de los peces cercanos a la costa en los alrededores de George Town a lo largo de los diez años del proyecto.

Los objetivos del proyecto se conversaron con el gobierno local y los grupos interesados, y se desarrollaron tareas a corto y largo plazo

ACTIVIDAD 1: Limpieza de los canales que conectan el Lago Victoria con el lago Chen; estabilización, replantación de las zonas de amortiguación costeras y establecimiento de los límites de la reserva de manglares (2009-2011). Por varias semanas se utilizó maquinaria pesada para retirar basura y escombros del canal que conecta el complejo de humedales. Se retiraron más escombros de alrededor de los manglares, la rampa para embarcaciones y otras zonas del área del proyecto. Se replantaron plantones de mangle a lo largo de una sección del canal y del arroyo de manglares para estabilizar la pendiente de la zona del arroyo y crear una zona de amortiguación costera (litoral). Cinco años después del inicio del Proyecto de Limpieza y Restauración del Lago Victoria, los humedales costeros mostraban algunos signos de mejora. El seguimiento de la calidad del agua y la fauna marina muestra una continua degradación en los alrededores de George Town tras las grandes tormentas y lluvias. Una vez despejadas las principales zonas de basurales, el foco se centró en el uso de los humedales como herramientas para mitigar el riesgo de inundaciones y proteger la calidad del agua cercana a la costa. Las actividades de restauración de humedales se ampliaron para consolidar una evaluación de los humedales en toda la isla y de los recursos

costeros para mejorar la gestión de las zonas costeras, sobre todo estudiando la capacidad de recuperación de los humedales para mitigar las inundaciones.

ACTIVIDAD 2: Abrir dos zonas de la ruta de February Point para permitir el flujo a través de los sistemas de canales y lagos (2011 a 2016). El océano cortó la cresta costera por February Point y a principios de la década de 2000 se construyó una ruta a través de la laguna de manglares del sur para construir un puerto deportivo. Dicha ruta no está en uso e impide el flujo de agua a través de la laguna de manglares que históricamente estaba conectada al Lago Victoria. La apertura de la laguna se logró instalando seis alcantarillas, y el caudal resultante se restauró plantando manglares y otras plantas costeras. Esta laguna de manglares tiene un gran potencial turístico como lugar para la observación de aves o practicar kayak (especialmente para niños o principiantes). La restauración de todo el complejo de humedales del Lago Victoria crearía más actividades para residentes y visitantes en la zona inmediata de George Town. Lamentablemente, esta zona ya no está accesible para la restauración, ya que los propietarios de la propiedad adyacente (February Point Resort Residential Community) quieren desalentar el uso de la zona por parte de los no residentes.

ACTIVIDAD 3: Desarrollar un programa local de divulgación y educación para promover la gestión medioambiental, buenas prácticas de comportamiento ciudadano y la responsabilidad personal (desde 2009 hasta la fecha). El programa de divulgación y educación se elaboró a partir de un plan de comunicación formal redactado en colaboración con la Fundación Exuma. El programa de verano de administración costera para estudiantes de secundaria continuó durante 2 años con financiación, pero desde 2011, solo se han puesto a disposición de los estudiantes programas limitados de administración costera. El actual diputado, Chester Cooper, ha desarrollado nuevos programas a través de la iniciativa Exuma Pride.

ACTIVIDAD 4: Desarrollar opciones para una planta avanzada de tratamiento de aguas residuales para la zona de George Town (2014 hasta la fecha). Aunque ha habido varias propuestas de tratamiento avanzado de aguas residuales en George Town (tanto para hoteles como para el bombeo de los yates visitantes), hay instalaciones de tratamiento de aguas residuales que se ocupan de la filtración de aguas residuales al Lago Victoria. Las nuevas tecnologías de tratamiento de aguas residuales permiten desarrollar pequeñas plantas ampliables como proyectos de demostración. Además, todos los residentes que viven en el Lago o cerca de él necesitan ayuda para mejorar la gestión de las fosas sépticas, tanto con bombes regulares como con el uso de jabones y limpiadores biodegradables en los hogares y negocios. Lo ideal sería gestionar una pequeña planta de tratamiento para la zona de Lovers Lane (unas 16 casas y el lavadero).

ACTIVIDAD 5: Elaborar propuestas para la financiación y gestión a largo plazo del sistema del Lago Victoria (desde 2012 hasta la fecha). El reto de muchos proyectos de conservación y protección del medio ambiente en las Bahamas es la financiación a largo plazo. La principal tarea consistirá en elaborar un plan de gestión de los alrededores del Lago Victoria y proponer mecanismos de financiación a largo plazo para continuar con las limpiezas, el mantenimiento de las zonas de amortiguación del litoral, los paseos marítimos y los contenedores de basura. La financiación adicional y la colaboración con otros actores son fundamentales para promover el turismo asociado a un centro de George Town más limpio y ecológico, así como para ayudar a las empresas, iglesias y residentes del Lago a reducir la carga de contaminantes y mejorar sus propiedades. Desde 2015, han surgido dos problemas importantes relacionados con el Proyecto del Lago Victoria:

- a. ¿Cuáles son las posibles fuentes de financiación de grandes proyectos de obras públicas para importar infraestructuras y reducir la vulnerabilidad a las inundaciones?, y
- b. ¿Cuáles son las mejores prácticas para controlar las inundaciones y aumentar la protección costera frente a las marejadas ciclónicas y los fenómenos meteorológicos extremos?

El proyecto de demostración de ecohidrología en el Lago Victoria se ha centrado menos en la ecología costera y más en la gestión y gobernanza de las costas. El personal del proyecto ha estado trabajando con el gobierno local para entender cuáles son los criterios más adecuados para gestionar el desarrollo costero. Hay tres criterios que se podrían haber adoptado para evaluar la sostenibilidad del desarrollo costero desde la perspectiva de la Administración Local. El Gobierno tiene un papel único a la hora de examinar las repercusiones a largo plazo de los proyectos sobre los recursos públicos y el aumento de los costos para los residentes. Esta perspectiva es muy diferente a la de los promotores inmobiliarios, quienes se centran en los beneficios a corto plazo y posibilidad de comercializar un proyecto. Los criterios incluyen:

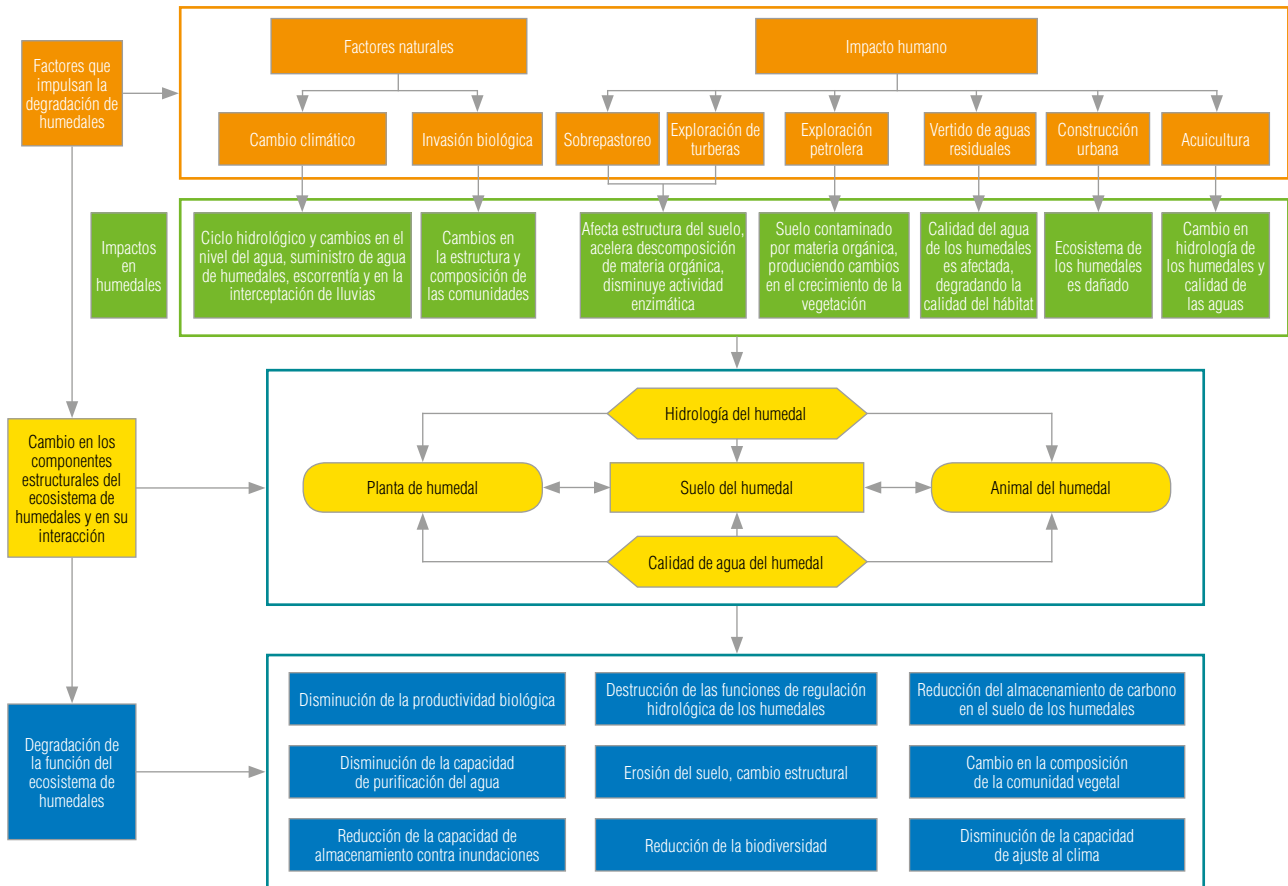
- ¿Cuáles son las repercusiones **ecológicas** del desarrollo costero en los recursos naturales públicos?
- ¿Cuáles son los **riesgos** del aumento del nivel del mar y de las inundaciones costeras a lo largo de la vida del proyecto, tanto para el proyecto de desarrollo costero como para las infraestructuras públicas, como las carreteras?
- ¿Cuáles son las **posibles repercusiones de la carga contaminante** en el entorno inmediato?

Los manglares costeros son recursos naturales que se consideran capital natural que pertenece al público. Aunque a veces se les califica de “maleza”, las comunidades de manglares contribuyen directa e indirectamente a la economía de la isla atrayendo turistas, proporcionando hábitats para peces jóvenes y adultos, y reforzando físicamente la costa contra la erosión y los desastres naturales, como los huracanes. Para mantener los servicios ecosistémicos mencionados, el desarrollo turístico en torno a George Town se debe gestionar de tal modo que cumpla los objetivos de crecimiento económico, mitigación de la contaminación y protección del medio ambiente. Este es el reto al que se enfrenta el Consejo del Distrito de Exuma. El gobierno local tiene limitados mecanismos a través de los cuales puede gestionar la construcción y el desarrollo costero sin iniciativas del gobierno nacional.

6. Modelo conceptual del complejo de humedales del Lago Victoria

Los mapas conceptuales son fundamentales para planificar la restauración de los humedales. La figura 5 ilustra la compleja relación entre la estructura y función de los humedales costeros. El Lago Victoria de EHP reúne un plan para restaurar las plantas de los humedales, el hábitat de la fauna salvaje y abordar los problemas de calidad del agua en el complejo de humedales. El mapa conceptual es clave para la divulgación y la educación asociadas a la gestión de las zonas costeras, al establecer la conexión entre los impactos antropogénicos en las zonas costeras y la pérdida de la función de los ecosistemas de humedales.

Figura 5: Mapa conceptual que describe los factores impulsores, los componentes estructurales y los cambios funcionales de los humedales costeros. Este mapa conceptual ilustra los principios ecológicos que guían la planificación de la restauración



Fuente: Kathleen Sullivan Sealey, 2018

7. Medidas y acciones ecohidrológicas

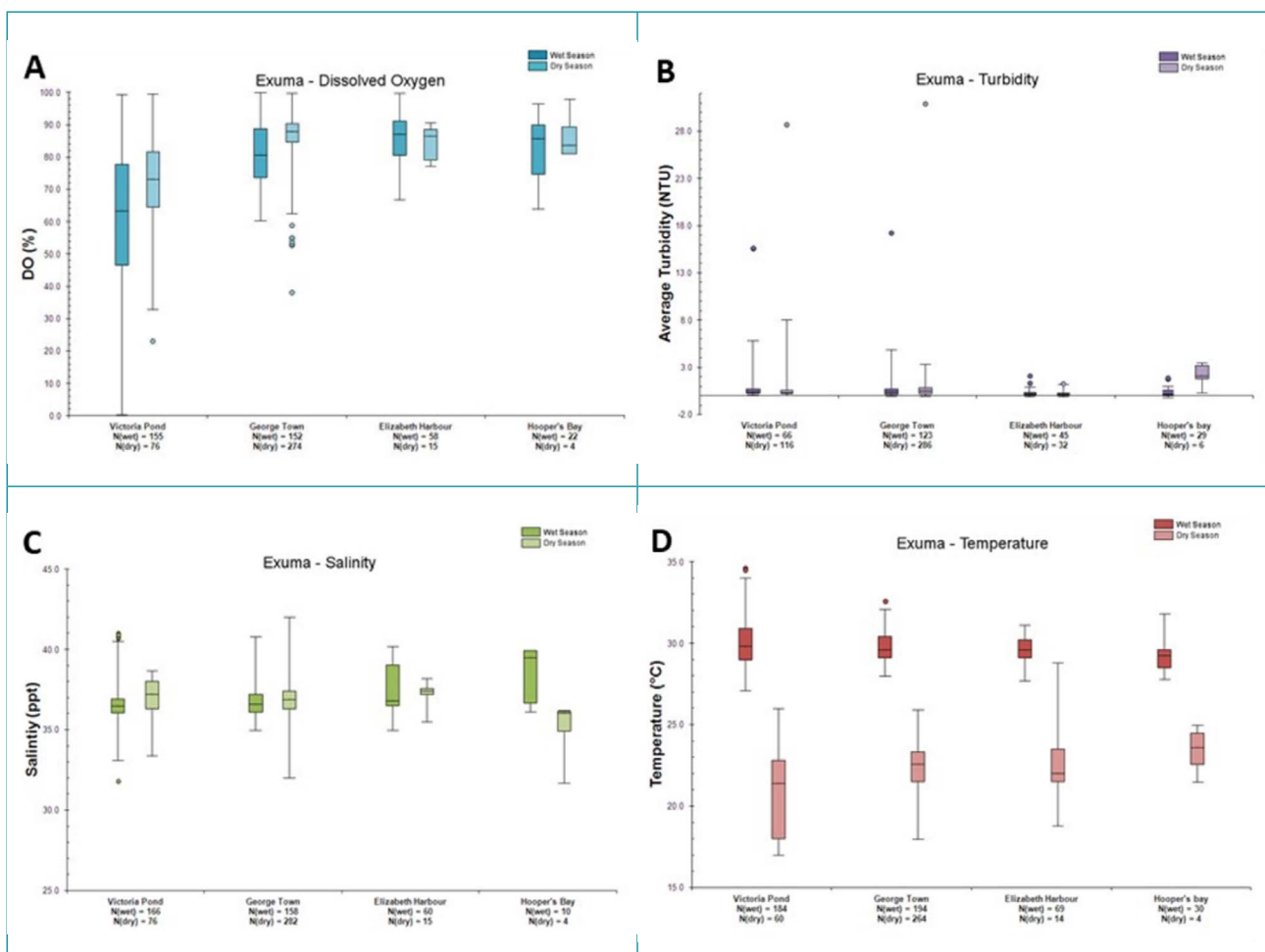
Los humedales de todo el mundo siguen degradándose a pesar de los acuerdos internacionales y las políticas nacionales (Turner *et al.*, 2000). Los manglares se encuentran entre los ecosistemas tropicales más amenazados del mundo, desde la década de 1980 se redujeron en más de un 35 % en todo el mundo; esta cifra es superior a la de las selvas tropicales y los arrecifes de coral (Valiela *et al.*, 2001). En Florida, la escorrentía de las aguas pluviales se considera actualmente la principal fuente de contaminación del agua del dicho estado y aporta aproximadamente el 80-95 % de los metales pesados que entran en el agua de la Florida.³ El exceso de nutrientes se ha asociado con el retroceso de los manglares negros, *Avicennia marina*, en Australia Meridional debido a que las algas asfixian las raíces aéreas de los árboles y plántulas de manglares establecidos (Schaffelke *et al.*, 2005). Para mitigar los efectos nocivos de la escorrentía de las zonas circundantes en las áreas preservadas, se necesita contar con una zona que actúe como barrera y que trate la escorrentía de aguas pluviales antes de que entre en la reserva.

³ http://www.sjrwmd.com/programs/outreach/pubs/order/pdfs/bk_stormwater.pdf

Las mediciones de la calidad del agua del Lago Victoria y de Kidd Cove adyacente ilustran el alcance de la degradación de la calidad del agua (Figura 6). Se usan diagramas de recuadro⁴ para mostrar gráficamente las tendencias de los parámetros de la calidad del agua utilizando muchas mediciones. Los diagramas de recuadro son una herramienta excelente para mostrar información sobre la variación en conjuntos de datos, en particular para ilustrar la variabilidad entre distintos grupos de datos. El diagrama de recuadros también es una herramienta eficaz para resumir grandes cantidades de información. En los análisis de la calidad del agua, la mediana suele ser un mejor indicador del valor “medio” del conjunto de datos que la media, ya que esta tiende a verse afectada por los valores atípicos. La figura 6 ilustra la mala calidad del agua del Lago Victoria en contraste con el muelle gubernamental de George Town, el centro del puerto de Elizabeth y el noroeste del puerto en Hooper’s Bay.

La calidad del agua degradada incluye oxígeno disuelto más bajo y variable (Figura 6A), turbidez más alta y variable (Figura 6B), salinidad más baja y variable (Figura 6C) y temperaturas más variables, más calientes en verano y más frías en invierno (Figura 6D).

Figura 6: Parámetros de calidad del agua del Lago Victoria, el puerto de George Town, el puerto de Elizabeth y Hooper’s Bay. A. Oxígeno disuelto en porcentaje de saturación, B. Turbidez en NTU, C. Salinidad en partes por mil (ppt), y D. Temperatura en grados Celsius.



Fuente: Kathleen Sullivan Sealey, 2015

⁴ Si necesita ayuda para interpretar los gráficos del diagrama, consulte <http://wqm.igsb.uiowa.edu/Data/boxexplanation.htm>

Un objetivo clave del proyecto de restauración es el establecimiento de una zona de amortiguación costera alrededor del lago y a lo largo del canal. “Costero” significa a lo largo de la costa, especialmente a lo largo de los márgenes de los manglares. La zona de amortiguación costera reducirá la carga contaminante del lago y puede servir como proyecto de demostración de cómo se podrían utilizar estas zonas de amortiguación en toda Exuma para mejorar la calidad del agua costera y proteger los recursos marinos. Las zonas costeras de amortiguación son fundamentales en la planificación de la protección de los humedales de manglares. Como existe una creciente preocupación por los humedales naturales como depósitos de fuentes difusas de contaminación,⁵ la Agencia de Protección del Medio Ambiente de EE.UU. (EPA), junto con otras organizaciones, ha formulado una lista de Mejores Prácticas de Gestión (BMP, por sus siglas en inglés) para los humedales naturales que reciben la escorrentía de las aguas pluviales.⁶ Entre ellas se incluyen medidas estructurales como los pantanos con vegetación.

Las cunetas vegetales son sistemas artificiales o naturales conformados o nivelados según las dimensiones requeridas y diseñados para la conducción e infiltración rápida de la escorrentía de las aguas pluviales. Se utilizan habitualmente y se encuentran entre las medidas más sencillas y rentables para controlar la escorrentía de las aguas pluviales (Deletic y Fletcher 2006). Estas cunetas se deben diseñar de forma que conduzcan la escorrentía de las aguas pluviales a una velocidad no erosiva para reducir el impacto de la escorrentía de las aguas pluviales en la calidad del agua próxima a la costa.

8. Retos, oportunidades y lecciones aprendidas

El Gobierno de Bahamas enumera “Cuatro Pilares” en términos de las fortalezas del Plan Nacional de Desarrollo de 2018: capital humano, gobernanza, medio ambiente y economía como focos del desarrollo nacional (Tabla 2). En las Bahamas, se calcula que 43.000 personas vivían en la pobreza en 2016 (antes del huracán Matthew); los barrios de bajos ingresos son más vulnerables a las inundaciones y se recuperan más lentamente de las catástrofes. Dentro del Plan Nacional de Desarrollo, titulado *Bahamas Vision 2040*, hay 15 objetivos nacionales de desarrollo que identifican Áreas Prioritarias dentro del país. La consecución de estos objetivos depende del desarrollo de la capacidad educativa, la mejora de las infraestructuras y la ampliación de los servicios públicos, incluida la regulación y la gestión medioambientales. Este desarrollo de capacidades se basa en el aumento de las asociaciones institucionales dentro de Bahamas, como la recién designada Universidad de Bahamas, que puede desarrollar capacidades de recopilación de datos e investigación.

5 Por ejemplo, las precipitaciones fluyen por el suelo y recogen y transportan contaminantes tanto naturales como de origen humano.

6 <http://www.epa.gov/owow/wetlands/pdf/protecti.pdf>

Tabla 2. Cuatro pilares del desarrollo nacional articulados en el plan Visión 2040 para las Bahamas para alcanzar los objetivos de la Agenda 2030

Capital humano	Gobernanza	El medio ambiente	Economía
Objetivo: lograr mejoras importantes en la educación y el empleo de los jóvenes	Objetivo: Gobierno estable con sólidas tradiciones	Objetivo: Los entornos natural y construido son activos fundamentales	Objetivo: Economía diversa que es puerta de entrada a las Américas.
Financiar el sector educativo al máximo nivel: el 13 % del gasto total	Democracia estable con un sistema multipartidista, elecciones seguras y un electorado comprometido	Mejorar infraestructuras como carreteras de alta calidad, aeropuertos internacionales e infraestructuras de la Corporación de Agua y Alcantarillado	Moneda estable y políticas monetarias eficaces.
Profesores bien formados, con un 100 % que cumple los requisitos mínimos	Clasificación internacional alta en materia de libertades políticas, civiles y de los medios de comunicación	Excelentes puertos de gran calado para los buques Súper Panamex, y espacio para la ampliación	Ubicación adyacente al mayor mercado mundial: Estados Unidos.
Elevada tasa de matriculación en primaria y alfabetización	Cierto nivel de descentralización y toma de decisiones local en las Islas Familiares	Servicio telefónico y de Internet de alta calidad	Recursos terrestres y marinos asociados al archipiélago tropical
Aumentar la inversión en salud	Fuerza policial grande, bien formada y profesional, gran cantidad de policías por capacidad	Suministro eléctrico en todas las islas principales, BEC en 29 islas	Importantes inversiones extranjeras.
Instalaciones sanitarias modernas y profesionales formados	Sistema judicial independiente	Abundantes recursos naturales y hermoso clima tropical	Régimen fiscal bajo y sistema bancario fiable.
Programas gubernamentales de ayuda a particulares y comunidades	Un sistema judicial rápido y eficaz	Normativa y legislación adecuadas para proteger los recursos naturales	Reestructuración del sector financiero para ofrecer más servicios de valor agregado.
Fuerte orgullo nacional	Reforzar los programas de seguridad ciudadana	Protocolos internacionales para la protección del medio ambiente y el control de la contaminación	Recientes mejoras importantes en el Aeropuerto Internacional Linden Pindling.
Conciencia colectiva de las tradiciones culturales y la identidad bahameña	Reducir los delitos contra la propiedad	Ampliación de la red de Parques Nacionales y Áreas Protegidas	Reconocimiento del mercado del turismo y los servicios financieros.

Fuente: Kathleen Sullivan Sealey

El Gobierno de las Bahamas participó en la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas, y los objetivos del Proyecto de Demostración de Ecohidrología complementan varios de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). La Agenda 2030 reconoció los retos específicos a los que se enfrentan los Pequeños Estados Insulares en Desarrollo (PEID) y su vulnerabilidad a los impactos del cambio climático. Junto con su principio general de garantizar que “nadie se quede atrás”, pidió un esfuerzo especial para garantizar que los PEID avancen rápidamente hacia la consecución de los ODS. La Agenda 2030 también animaba a todos los Estados miembros de las Naciones Unidas a “desarrollar tan pronto como sea posible respuestas nacionales ambiciosas para la aplicación general de esta Agenda”. La aplicación requiere que cada país adopte diversas medidas, como:

- i. Fijar sus propios objetivos nacionales guiándose por el nivel de ambición mundial, pero teniendo en cuenta las circunstancias nacionales.
- ii. Incorporar los objetivos a los procesos, políticas y estrategias nacionales de planificación

iii. Realizar revisiones periódicas e inclusivas de los avances a nivel nacional y subnacional.

Esto llega en un momento en el que los PEID tienen que aplicar la Senda de Modalidades de Acción Acelerada de los PEID (SAMOA) de septiembre de 2014, que es el acuerdo intergubernamental clave que sirve de plan para abordar los continuos retos de desarrollo sostenible de los PEID, así como:

- El resultado de la Conferencia Mundial de Sendai sobre la reducción del riesgo de desastres de marzo de 2015,
- la Agenda de Acción de Addis Abeba de julio de 2015,
- el acuerdo de París sobre el cambio climático de diciembre de 2015, y
- la Nueva Agenda Urbana de octubre de 2016

Hay una urgencia global para comprender cómo restaurar George Town como proyecto de demostración para la gestión costera y el desarrollo de infraestructuras para toda la isla de Gran Exuma. Hay cuestiones fundamentales sobre los costos a largo plazo del desarrollo costero para los organismos públicos: ¿quién pagará la reparación de carreteras y propiedades dañadas por las inundaciones? El concepto de sostenibilidad, es decir, el equilibrio entre el uso de los recursos disponibles y los beneficios económicos del desarrollo, se desarrolla gradualmente a base de ensayo y error.

Referencias bibliográficas

Acosta, C. A.; Butler, M. J. J. M.; Research, F. (1997). Papel del hábitat del manglar como criadero de langosta espinosa, *Panulirus argus*, en Belice. 48, 721-727.

Anthony, W. W. (2003). Aves marinas del archipiélago de las Bahamas y aguas adyacentes: Especies transitorias, invernantes y nidificantes raras. *North American Birds*, 57, 436.

Barton, D. H.; Carney, C.; Boardman, M. R. (1994). Características del acuífero y flujo de agua subterránea en un terreno kárstico del Pleistoceno, Isla de Andros, Bahamas. En: Sociedad Geológica de América, Sección Norte-Centro, 27.^a reunión anual. Resúmenes con programas - Sociedad Geológica de América, 26, 4.

Bjorndal, K. A. (1997). Ecología de la alimentación y digestión en tortugas marinas. *Biología de las tortugas marinas*. CRC Press, Boca Ratón, FL. 432 pp., 199-232.

Cant, R. V. (1988). Implicaciones geológicas de la eliminación en pozos profundos en las Bahamas. En: Conferencia internacional sobre avances recientes en la geología del Caribe; resúmenes y programa, p. 3.

Cant, R. V. (1996). Desarrollo de estrategias de abastecimiento de agua para las Bahamas. *Bahamas Journal of Science*, 4, 5-7.

Comité Federal de Datos Geográficos - FGDC. (2012). FGDC-STD-18-2012. Norma de clasificación ecológica costera y marina. Reston, VA Comité Federal de Datos Geográficos

Díaz, R. J.; Rosenberg, R. (2008). Extensión de las zonas muertas y consecuencias para los ecosistemas marinos. *Science*, 321, 926-9.

Dorenbosch, M.; Van Riel, M. C.; Nagelkerken, I.; Van Der Velde, G. (2004). Relación entre la densidad de peces de arrecife y la proximidad de manglares y praderas marinas. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 60, 37-48.

- Fleming, L. E.; Broad, K.; Clement, A.; Dewailly, E.; Elmir, S.; Knap, A.; Walsh, P. (2006). Los océanos y la salud humana: Riesgos emergentes para la salud pública en el medio marino. *Boletín de Contaminación Marina*, 53, 16.
- Guannel, G.; Arkema, K.; Ruggiero, P.; Verutes, G. (2016). El poder de tres: Los arrecifes de coral, las praderas marinas y los manglares protegen las regiones costeras y aumentan su resiliencia. *PloS one*, 11, e0158094-e0158094.
- Joseph, E.; Sealey, K. S. (2009). Evaluación de la calidad del agua cercana a la costa en las Bahamas: riesgos de eutrofización y establecimiento de normas nacionales para puertos y marinas. XIII Simposio sobre la historia natural de las Bahamas. College of the Bahamas, San Salvador, Bahamas.
- Lapointe, B. E.; Barile, P. J.; Yentsch, C. S.; Littler, M. M.; Littler, D. S.; Kakuk, B. (2004). La importancia relativa del enriquecimiento en nutrientes y la herbivoría en las comunidades de macroalgas cerca de Norman's Pond Cay, Exumas Cays, Bahamas: un experimento de enriquecimiento "natural". *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 298, 275-301.
- Lugo, A. E. (1981). Los manglares interiores de Inagua, Bahamas. *Revista de Historia Natural*, 15, 845-852.
- Lugo, A. E. A. S. C. S. (1974). La ecología de los manglares. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 5, 39-64.
- Mumby, P. J.; Edwards, A. J.; Ernesto Arias-González, J.; Lindeman, K. C.; Blackwell, P. G.; Gall, A.; Gorczynska, M. I.; Harborne, A. R.; Pescod, C. L.; Renken, H.; C. C. Wabnitz, C.; Llewellyn, G. (2004). Los manglares mejoran la biomasa de las comunidades de peces de los arrecifes de coral del Caribe. *Nature*, 427, 533-536.
- Nagelkerken, I.; Van Der Velde, G. (2004). Importancia relativa de los manglares interconectados y las praderas marinas como hábitats de alimentación de peces arrecifales juveniles en una isla del Caribe. *Ecología marina. Progress series (Halstenbek)*, 274, 153-159.
- Przeslawski, R.; Ahyong, S.; BYRNE, M.; Wörheide, G.; Hutchings, P. A. T. (2008). Más allá de los corales y los peces: los efectos del cambio climático en los invertebrados bentónicos no coralinos de los arrecifes tropicales. *Global Change Biology*, 14, 2773-2795.
- Sealey, K. S. (2004a). Efectos de las escorrentías terrestres de sedimentos y nutrientes en los arrecifes de coral. *Sociedad Internacional de Estudios sobre Arrecifes*.
- Sealey, K. S. (2004b). Impactos ecológicos a gran escala del desarrollo en sistemas insulares tropicales: comparación de islas desarrolladas y no desarrolladas en las Bahamas centrales. *Bulletin of Marine Science*, 75, 295-295.
- Sealey, K. S.; Lennon, E. C.; Patus, J. (2019). Un método de evaluación ecológica rápida de huracanes (H-REA) para los pequeños Estados insulares en desarrollo en 2017 y más adelante. *Estuarios y costas*, 42, 14.
- Sealey, K. S.; McDonough, V. N.; Lutz, K. S. (2014). Clasificación del impacto costero de las islas pequeñas para su conservación, restauración y desarrollo turístico: Un estudio de caso de las Bahamas. *Ocean and Coastal Management*, 91, 88-101.
- Sealey, K. S.; Smith, J. (2014). Reciclaje para pequeños desarrollos turísticos insulares: Compostaje de residuos alimentarios en Sandals Emerald Bay, Exuma, Bahamas. *Recursos, Conservación y Reciclaje*, 92, 25-37.
- Sealey, K. S.; Strobl, E. (2017). Evaluación del riesgo de pérdidas por huracanes en las propiedades costeras del Caribe: Datos de las Bahamas. *Ocean & Coastal Management*, 149, 9.
- Silver, J. M.; Arkema, K. K.; Griffin, R. M.; Lashley, B.; Lemay, M.; Maldonado, S.; Moultrie, S. H.; Ruckelshaus, M.; Schill, S.; Thomas, A.; Wyatt, K.; Verutes, G. (2019). Avanzar en la ciencia y la aplicación

de la reducción de riesgos costeros teniendo en cuenta el clima, los ecosistemas y las personas. *Frontiers in Marine Science*, 6.

Sullivan-Sealey, K.; Smith, J. (2014). Compostaje de residuos alimentarios en un complejo turístico de las Bahamas: Obstáculos encontrados y lecciones aprendidas. En: Dou, Z.; Ferguson, J. D.; Galligan, D. T.; Kelly, A. M.; Finn, S. M.; Giegengack, R. (eds.), *Desperdicio de alimentos en la cadena de suministro: Una perspectiva estadounidense sobre un problema mundial*. Ames, Iowa: Consejo de Ciencia y Tecnología Agrícolas.

Capítulo 9

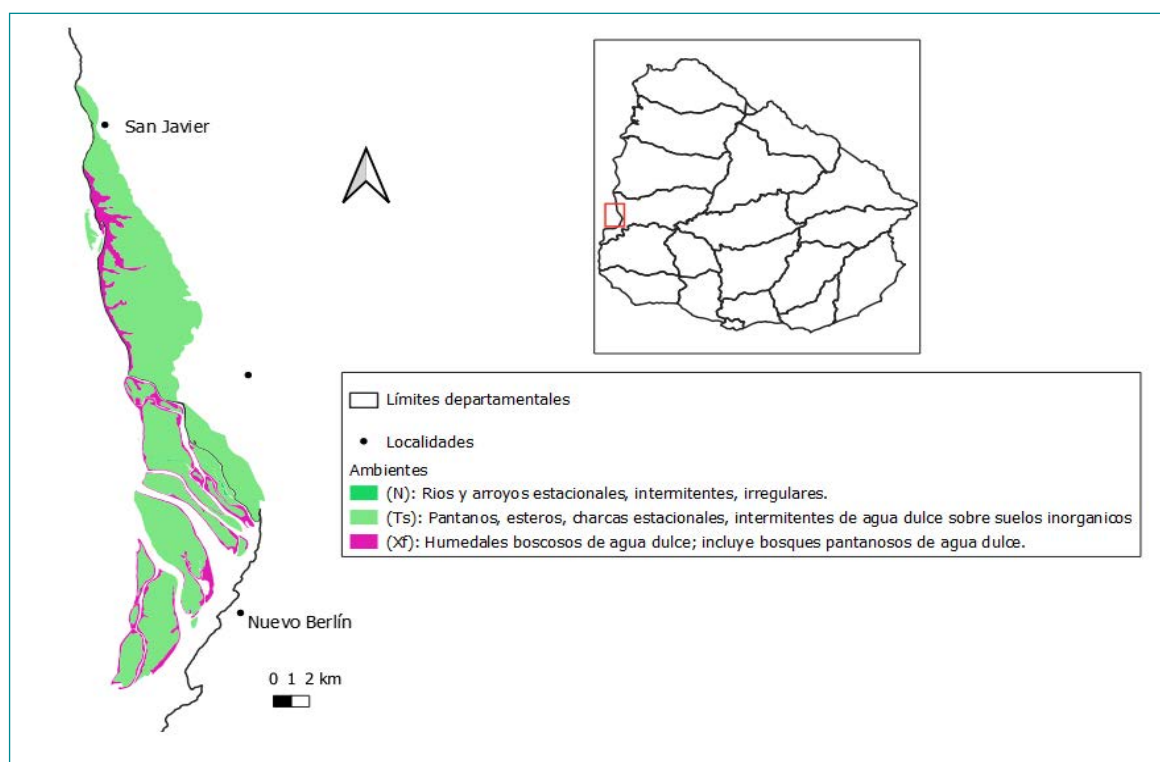
Esteros de Farrapos

Lucía Samaniego ⁽¹⁾, Alfonso Flaquer ⁽²⁾, Walter Regueiro ⁽³⁾, Mario Batallés ⁽⁴⁾, Manuel Giménez ⁽⁵⁾, Agustín Menta ⁽⁶⁾, Alberto Manganeli ⁽⁷⁾

1. Ubicación

El área Protegida y Sitio Ramsar Esteros de Farrapos, se encuentra situada en la región litoral oeste de la República Oriental del Uruguay, en el departamento de Río Negro sobre la costa del Río Uruguay. Son humedales que involucran una superficie de 6327 hectáreas, propiedad del Ministerio de Ambiente desde agosto del año 2001, y comprenden los predios empadronados con los números 1054, 2875 y 2876 de la 3.^a Sección Judicial del departamento de Río Negro; así como también Islas del Río Uruguay y el espejo de agua del mismo (Figura 1).

Figura 1. Ubicación del Área protegida Esteros de Farrapos e Islas del Río Uruguay y localidades cercanas



Fuente: Elaboración propia.

(1), (7) Centro Regional para la Gestión de Aguas Subterráneas (CeReGAS), (3), (4) Ministerio de Ambiente, Uruguay, (2), (5), (6) Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República (1) lsamaniego@ceregas.org, (2) aflaquer@fing.edu.uy, (3) walter.regueiro@ambiente.gub.uy, (4) mariobatalles@gmail.com, (5) mgimenez@fing.edu.uy, (6) amenta@fing.edu.uy, (7) amanganelli@ceregas.org

2. Organización formal

La República Oriental del Uruguay por ley 15.337 del 29 de octubre de 1982, adhiere a la Convención sobre Humedales Internacionales (Convención Ramsar). En el año 2004 se designa el Sitio Ramsar “Esteros de Farrapos e Islas del Río Uruguay” con una superficie aproximada de 175 km², de las cuales 69,17 corresponden a islas, 69,72 corresponden al Estero de Farrapos y 36,07 a la superficie del espejo de agua en el Río Uruguay.

Uruguay comenzó a implementar su Sistema Nacional de Áreas Protegidas en el año 2008. El Sistema Nacional de Áreas Protegidas contempla áreas en las que la conservación de la biodiversidad se desarrolla armónicamente con actividades productivas sustentables, manteniendo la integridad de los sistemas ambientales y contribuyendo a mejorar calidad de vida de la población local que participa activamente en la gestión del área (web SNAP).

En el año 2008, según el decreto 279/008 del 27 de noviembre de ese mismo año; el Sitio Ramsar Esteros de Farrapos e Islas del Río Uruguay fue incorporado al Sistema Nacional de Áreas Protegidas. A partir de entonces y en conformidad con la normativa vigente, se designa un administrador para el área correspondiente a la ex DINAMA (Dirección Nacional de Medio Ambiente, actual Dirección Nacional de Biodiversidad y Servicios Ecosistémicos-DINABISE) y un director quien ejerce sus funciones en el ámbito de la mencionada dirección.

Desde el año 2010 funciona la Comisión Asesora Específica que asesora y supervisa las actividades de gestión realizadas en el área protegida.

El Plan de Manejo del Parque Nacional Estero de Farrapos fue aprobado por resolución del Ministerio de Vivienda Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente en el año 2014 (RM 721/2014), habiendo sido previamente presentado a la Comisión Asesora Específica del área protegida, órgano que nuclea a todos los actores en la zona de influencia del área protegida (privados, públicos y organizaciones no gubernamentales).

Según el Plan de Manejo, actualmente integran esta comisión, como miembros plenos: la Dirección Nacional de Medio Ambiente, quien la preside, el Ministerio de Defensa Nacional a través de Prefectura; el Ministerio del Interior, la Dirección Nacional de Recursos Naturales Renovables del Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca, la Asociación Civil Grupo Esteros de Farrapos la Asociación Civil Los Girasoles la ONG Vida Silvestre, la Sociedad de Fomento Rural de Nuevo Berlín, la Cooperativa de pescadores de Nuevo Berlín (COPESNUBE), la Intendencia de Río Negro y la Sociedad de Fomento Rural San Javier Offir. Además, como miembros invitados asisten: el Ministerio de Turismo, la Comisión Asesora Específica del Río Uruguay, el Instituto Nacional de Colonización, y la alcaldía de Nuevo Berlín.

Los objetivos de creación del Área Protegida y Sitio Ramsar Esteros de Farrapos e Islas del Río Uruguay son resumidos en la siguiente tabla.

Tabla 1. Objetivos de creación del área protegida

Tipo de objetivo	Enunciado
Gestión	Restaurar las áreas de monte degradadas por el proceso invasivo de <i>Gleditsia triachantos</i> y controlar el avance del mismo.
Gestión	Evaluar en base a criterios técnicos-científicos, la pertinencia de realizar acciones de restauración del albardón y recomendar acciones en tal sentido.
Gestión	Promover el cumplimiento ejemplar de la normativa vigente a través de la articulación con las distintas instituciones competentes y una eficiente realización de actividades de vigilancia.
Gestión	Regular el uso ganadero en articulación con la conservación de la diversidad biológica.
Gestión	Fortalecer el desarrollo de la actividad apícola y contribuir a reorientar el uso de los recursos naturales en el área desde una perspectiva más sustentable.
Gestión	Mejorar las opciones de recreación, sensibilización e interpretación de los visitantes del área protegida y fortalecer el rol social del Centro de Visitantes.
Gestión	Promover las capacidades locales para el desarrollo de la actividad turística de forma sostenible, generando oportunidades de empleo local y dotando al Área de mayores servicios para el visitante.
Gestión	Fortalecer los vínculos existentes entre el área protegida y los centros educativos de la zona y contribuir en la valoración social de los valores naturales del área tanto a nivel local como departamental.
Conservación	Los Esteros de Farrapos presentan una gran relevancia ecológica y biodiversidad asociada además de su destacada belleza escénica determinante de la importancia de conservar este sistema.
Gestión	Articular una conservación efectiva con el desarrollo de las actividades productivas.
Gestión	Efectivizar los instrumentos de participación.
Gestión	Promover el desarrollo local.
Gestión	Promover la consolidación del área como sitio piloto de investigación en humedales fluviales y como centro de difusión de prácticas y modalidades productivas sustentables.

Fuente: DINAMA, 2014.

3. Características generales

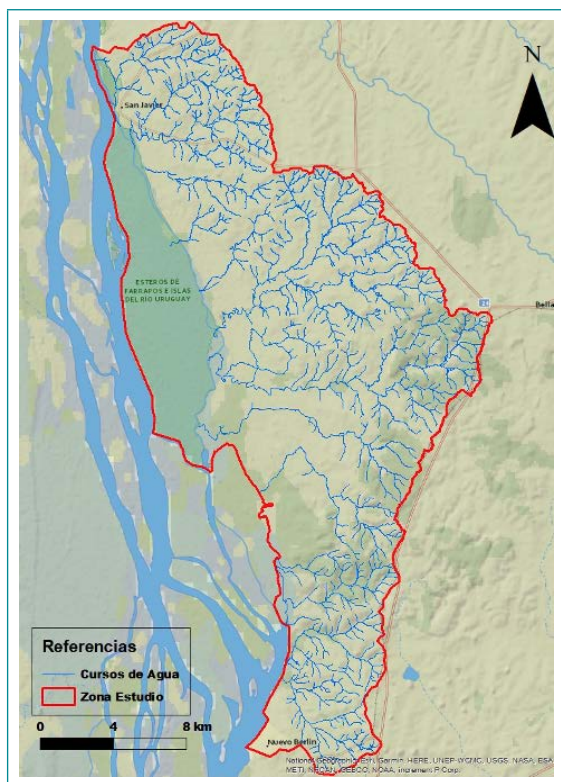
3.1. Aspectos hidrológicos

Según DINAMA (2014), el funcionamiento de este ecosistema de humedales fluviales está fuertemente vinculado a la dinámica fluvial actual y pasada del Río Uruguay. No obstante, los primeros resultados de trabajos que se están desarrollando en el Instituto de Mecánica de Fluidos e Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República (UdelaR) muestran que el aporte de agua de la cuenca superficial ubicada hacia aguas arriba del humedal, así como el aporte de agua subterránea en la zona del humedal resultan de gran importancia en el sustento del ecosistema, sobre todo en época de estiaje.

El área donde subyace el Parque Nacional Esteros de Farrapos (PNEF) tiene una importante red hidrográfica con cursos de diferente orden. El PNEF se encuentra limitado al oeste por el Río Uruguay. Los cursos de menor orden tienen dirección este-oeste siendo afluentes del Río Uruguay y teniendo parte de su recorrido dentro del parque. El curso más importante es el arroyo Román Grande. Ninguno de estos afluentes del Río Uruguay tiene estaciones de aforo.

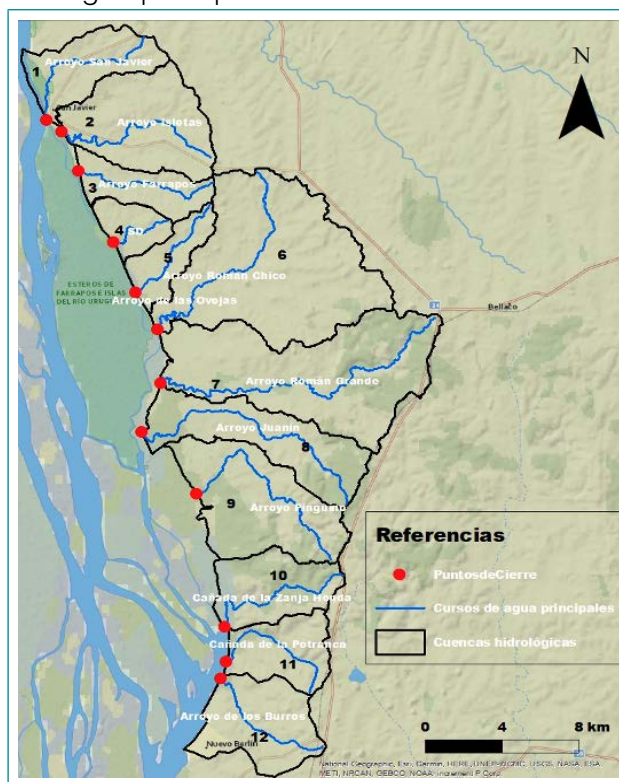
En función de la información consultada en IDE (Infraestructura de Datos Espaciales de Uruguay) de donde se descargó el Modelo Digital del Terreno con celdas de 2,5 m x 2,5 m y una precisión de 0,1 m, se trazaron las principales cuencas superficiales que se encuentran dentro de la zona de estudio. En la Figura 2 se muestra la red de drenaje existente en la zona de estudio. A partir de la información mencionada anteriormente, se trazaron 12 cuencas hidrológicas. En la Figura 3 se muestran las cuencas y su respectivo cauce principal. En la Tabla 2 se detallan las principales características de las mismas.

Figura 2. Red de drenaje de la zona de estudio



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3. Cuencas hidrológicas y cursos de agua principales en la zona de estudio



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2: Parámetros de las cuencas hidrológicas en la zona de estudio

Nombre	Área (km ²)	Perímetro (km)	Pendiente Media Cuenca (%)	Desnivel Máximo (m)	L cauce (km)	Pendiente Media Cauce por extremos (%)	Tc (hs)
Cuenca1	19,9	24,6	2,56	37,3	9,9	0,38	3,4
Cuenca2	34,9	28,4	2,6	37,1	11,9	0,31	4,2
Cuenca3	14,8	22,0	2,2	41,7	9,3	0,45	3,0
Cuenca4	8,9	12,9	2,1	28,2	4,3	0,65	1,5
Cuenca5	11,7	19,1	1,9	39,0	7,9	0,49	2,6
Cuenca6	73,4	48,3	2,8	51,7	16,0	0,32	5,2
Cuenca7	66,1	51,1	2,7	62,6	22,2	0,28	7,1
Cuenca8	32,3	37,5	1,8	52,8	17,0	0,31	5,5
Cuenca9	39,8	33,6	2,3	47,0	13,4	0,35	4,4
Cuenca10	21,2	21,4	3,5	54,4	10,0	0,54	3,0
Cuenca11	17,7	19,3	3,9	44,7	8,5	0,53	2,6
Cuenca12	25,7	22,7	3,5	45,7	7,9	0,58	2,4

Fuente: Elaboración propia.

Desde el punto de vista hidrogeológico el PNEF se emplaza sobre una zona de descarga del Sistema Acuífero Mercedes (SAM), el cual es un sistema de agua subterránea regional de doble porosidad ubicado en la región oeste del Uruguay, abarcando aproximadamente 11.500 km² (De los Santos *et al.*, 2017, Flaquer *et al.*, 2019).

3.2. Descripción ecológica

Desde el punto de vista estructural este ecosistema se caracteriza por: (a) la presencia de un albardón costero (b) la presencia del estero un área más o menos inundable que presenta también cauces activos y paleocauces; (c) una paleocosta (terrazza antigua) que separa al humedal de las tierras altas (d) la presencia de islas fluviales y (e) el sistema fluvial (Fernández *et al.*, 2010).

a) Albardón costero y ambientes asociados

El albardón está constituido por sedimentos arenosos y areno-limosos no consolidados, modernos y actuales, trabajados y redepositados en forma permanente por la dinámica fluvial. Se considera una unidad geomorfológica por su particular constitución, estructura (sedimentaria muy friable y permeable) y su funcionalidad como protector natural del humedal en períodos de aumento del nivel de agua del Río Uruguay y como contenedor de los niveles hídricos al interior del humedal a lo largo del año (Cayssials *et al.*, 2002). Se extiende en una faja continua desde San Javier hacia el sur, presenta una serie de interrupciones vinculadas al sistema de drenaje desde el humedal hacia el río y desde el río hacia el humedal (cursos tributarios del Río Uruguay). Presenta además pequeños arcos de playa, donde la dinámica de deposición-erosión, es especialmente intensa.

Los principales ambientes presentes en esta unidad son:

Monte ribereño del Río Uruguay: Presenta una elevada riqueza de especies arbóreas, arbustivas y epifitas trepadoras. Se caracteriza por presentar una importante abundancia de elementos botánicos paranaenses (ej.: *Nectandra angustifolia*, *Ocotea acutifolia*, *Lonchocarpus nitidus*, *Albizia inundata*, *Calliandra parvifolia*) lo que destaca su importancia como corredor biológico a nivel regional. Por otra parte, especies como el sarandí, el sauce criollo y el ingá cumplen un importante rol funcional ya que disminuyen la energía erosiva del río protegiendo así al albardón.

Arenal fluvial: Estos arenales presentan una importante dinámica asociada a los regímenes de deposición-erosión del río por lo que su presencia puede ser más o menos transitoria. Este hecho, determinará las posibilidades de desarrollo vegetal sobre los mismos. Si la permanencia de estos arenales es más bien corta no podrá desarrollarse cobertura vegetal. Alternativamente, si estos ambientes permanecen el tiempo suficiente para permitir el desarrollo de cobertura vegetal la presencia de la misma contribuirá a la fijación de arena constituyéndose en estructuras permanentes pero que perderán su carácter de arenal conforme se consolida la vegetación sobre las mismas.

Cumplen un importante rol biológico como áreas de refugio y nidificación de aves.

b) Esteros y ambientes asociados

Es la unidad más extensa del área. Esta unidad ambiental se corresponde a las planicies de inundación fluvial con procesos de hidromorfismo permanente o semipermanente.

Los principales ambientes presentes en esta unidad son (figuras 4 y 5):

Monte ripario o fluvial: Constituye el monte ripario del sistema de drenaje del estero cauces activos y paleocauces (cursos tributarios del Río Uruguay). La influencia paranaense es menor que en el monte ribereño del Río Uruguay. Cumplen un importante rol como corredor biológico a nivel local conectando el Río Uruguay con las zonas inundables.

Campo natural o praderas: Estas áreas se ubican sobre las superficies de mayor altitud relativa. Son las últimas áreas en inundarse y las primeras en ser expuestas por la bajante del agua. Conformadas principalmente por formaciones herbáceas (graminosas o ciperáceas) de baja altura y por maciegas de paja brava y mansa.

Humedal semipermanente: Presentan períodos de inundación estacional. La vegetación característica corresponde a campos uliginosos con presencia de pajonales.

Humedal permanente: Corresponden a las planicies de inundación fluvial del humedal con procesos de hidromorfismo permanente. Está dominado por vegetación herbácea estrictamente acuática característica de campos paludosos.

Monte de humedales o de sarandíes: Corresponden a formaciones arbóreas reconocidas dentro de los esteros o islas emplazadas en áreas donde el suelo presenta altos niveles de hidromorfismo. Estos ambientes se caracterizan por la presencia de sarandizales fundamentalmente *Cephalanthus glabratus*, pero también se identificaron especies de *Phyllanthus spp.* y *Sebastiania spp.*

c) Paleocosta y ambientes asociados

La paleocosta forma una escarpa de transición entre las tierras altas y el estero. Los principales ambientes presentes en esta unidad son:

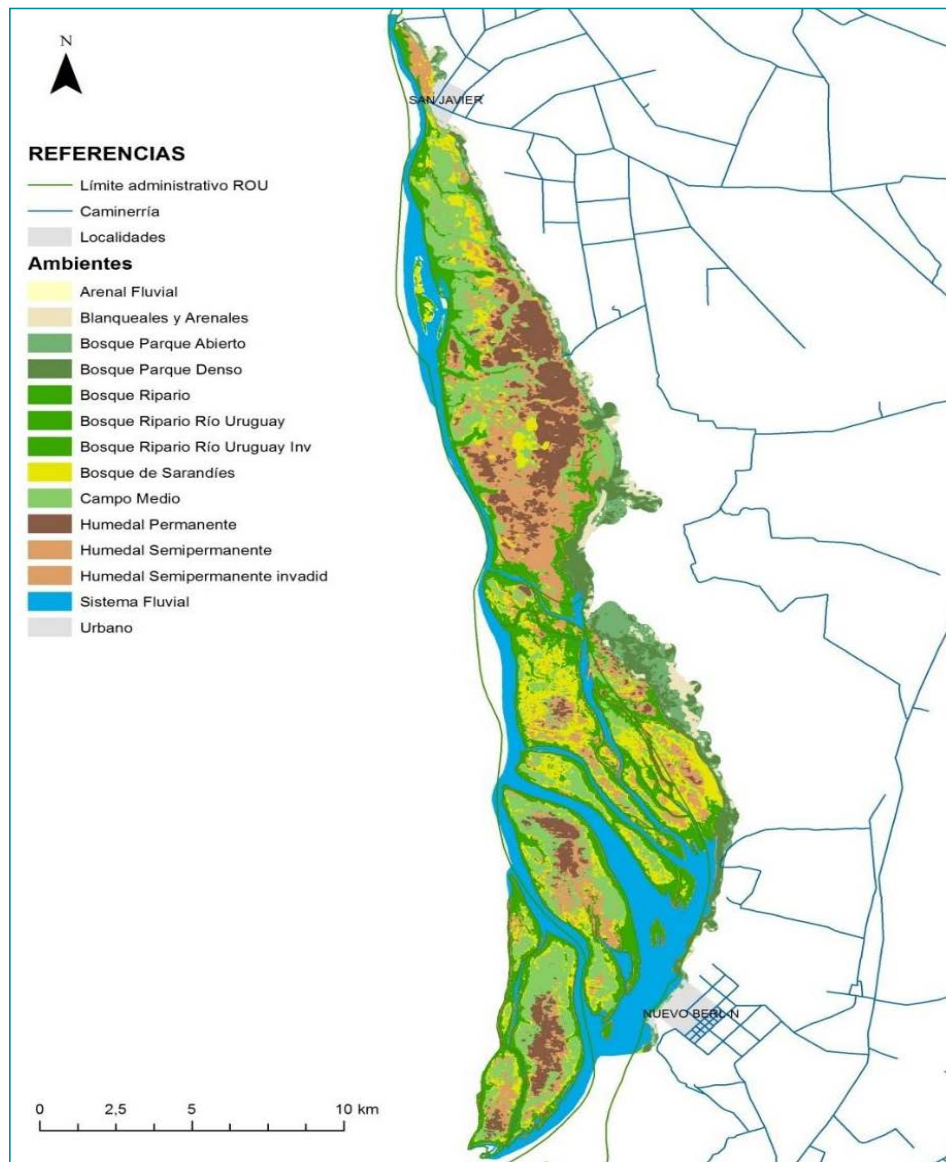
Arenales: Constituidos por dunas de arenas sueltas de grano medio a fino, cuarzosas y estratificadas.

Blanqueales: Se caracterizan por presentar suelos halomórficos con un alto contenido de sodio intercambiable determinante de las características físicas y biológicas del sistema. Un alto contenido de sodio en el suelo incrementa la presión osmótica determinando condiciones conocidas como estrés hídrico fisiológico. El conjunto de estas condiciones exige adaptaciones fisiológicas particulares en la vegetación (Ragonese y Covas, 1947; Chebataroff, 1973). Estos ambientes se caracterizan por la presencia de especies arbóreas como el “algarrobo” *Prosopis nigra* (Griseb.) higerón, “ñandubay” *Prosopis affinis* Spreng., a las que se asocian el “quebracho blanco” *Aspidosperma quebracho-blanco* 21 Schltdl, el “chañar” *Geoffroea decorticans* (Gillies ex Hook & Arn.) Burkart y la palma “caranday” *Trithrinax campestris* (Burmeist.) Drude y Griseb., entre otras (Chebataroff, 1980). Estas especies aparecen diseminadas con baja densidad sobre un tapiz vegetal de gramíneas bastante ralo (Del Puerto, 1987).

d) Islas del Río Uruguay

Las islas del Río Uruguay son estructuras dinámicas, que se desarrollan por el aporte de sedimentos del Río Uruguay (Cayssials *et al.*, 2002). Presentan en sus márgenes albardones que alcanzan los 2 y 3 metros de altura. Sobre estas estructuras se desarrolla el monte ribereño que destaca por su riqueza de especies y por su valor paisajístico. Al interior de las islas se desarrollan pequeñas lagunas con un régimen de inundación temporal o permanente que presentan asociaciones vegetales adaptadas a esas variaciones hídricas (Cayssials *et al.*, 2002).

Figura 4. Ambientes encontrados dentro del área de Esteros de Farrapos



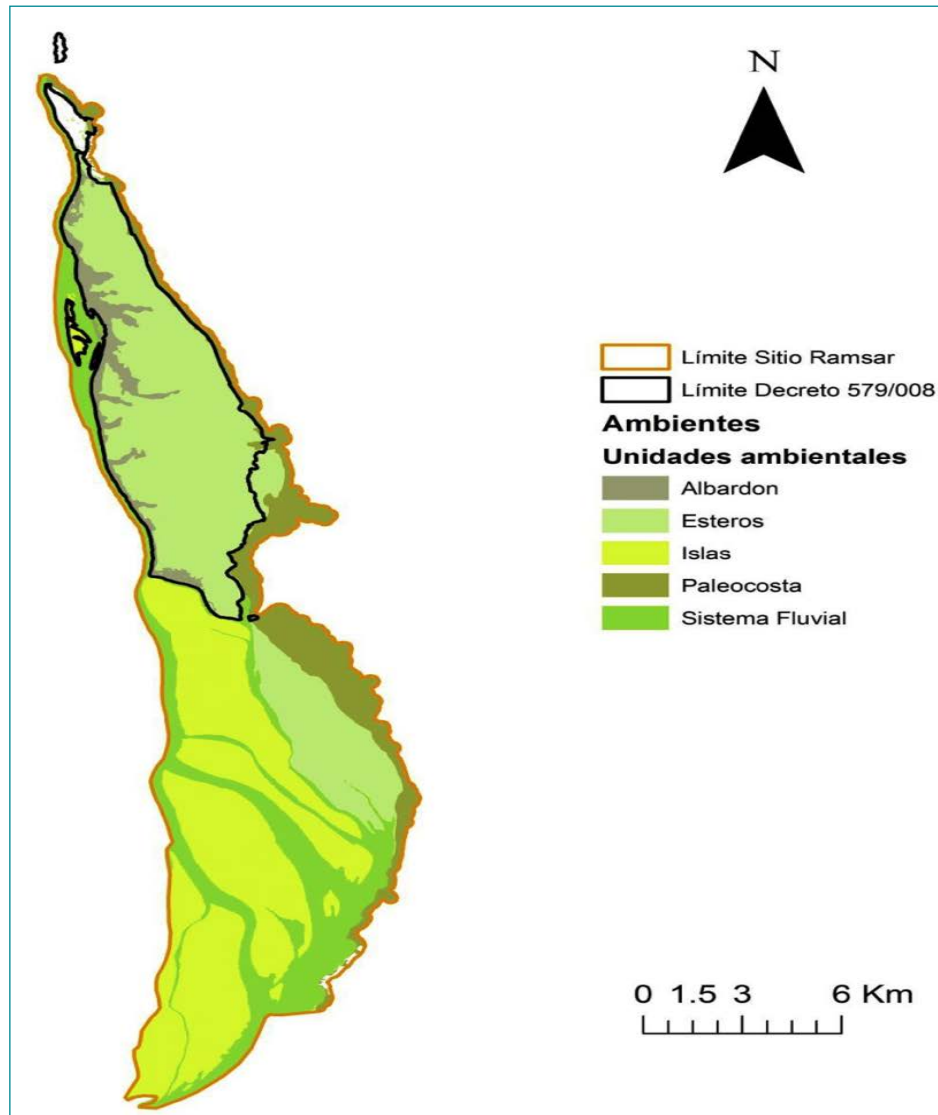
Fuente: DINAMA, 2014.

Estas islas cumplen un rol funcional muy importante en el sistema: (a) se encuentran muy vinculadas al régimen de deposición de sedimentos del Río Uruguay afectando por tanto la dinámica del agua en el canal (b) brindan conectividad biológica entre el sistema de humedales ubicado sobre la margen oeste del Río Uruguay (territorio argentino) y los humedales ubicados sobre la margen este del mismo (territorio uruguayo). Además, actúan como trampolines en el eje norte-sur del Río Uruguay constituyéndose en enclaves fundamentales para la dispersión hacia el sur de elementos paranaenses. Presentan además un importante valor socio-económico ya que en muchas de ellas se desarrolla actividad apícola.

e) Sistema fluvial

Es el principal elemento regulador y de control del nivel de inundación del humedal. El nivel altimétrico de las aguas del sistema fluvial controla el régimen de inundación desde el río hacia el humedal y el régimen de descarga desde el humedal hacia el río. Cumple además un importante rol biológico como hábitat de una gran diversidad de especies y como corredor biológico. Se constituye por tanto en una unidad clave para el funcionamiento biofísico del sistema.

Figura 5. Descripción estructural del Sistema de Humedales de Farrapos mediante la identificación de unidades ambientales



Fuente: DINAMA, 2014.

En cuanto a especies prioritarias existentes en Esteros de Farrapos, ocurren en este sitio varias especies de flora y fauna prioritarias para la conservación según los criterios de prioridad del Sistema Nacional de Áreas Protegidas (Tabla 3).

Tabla 3: Especies prioritarias en el PNEF.

Especies prioritarias	Nombre común (si corresponde)
Plantas	
<i>Boopis anthemoides</i>	
<i>Opuntia sulphurea</i> var. <i>pampeana</i>	
<i>Schinus sinuatus</i>	
<i>Sclerophylax lorentzianus</i>	
<i>Wigginsia sessiliflora</i>	
Moluscos	
<i>Megalobulimus globosus</i>	Caracol terrestre
Peces	
<i>Potamotrygon motoro</i>	Raya de agua dulce 5
<i>Potamotrygon brachyura</i>	Raya de agua dulce
<i>Loricariichthys edentatus</i>	Vieja de agua
<i>Austrolebias alexandri</i>	Pez anual
<i>Austrolebias bellottii</i>	Pez anual
<i>Auchenipterus nigripinnis</i>	Buzo
Reptiles	
<i>Chironius bicarinatus</i>	Culebra papapintos
<i>Liotyphlops ternetzii</i>	Víbora ciega de ternetz
<i>Sibynomorphus turgidus</i>	Culebra duerme duerme
<i>Anisolepis undulatus</i>	Lagartija de los árboles
<i>Boiruna maculata</i>	Musurana
Aves	
<i>Larus cirrocephalus</i>	Gaviota capucho gris
<i>Spartonoica maluroides</i>	Espartillero enano
<i>Coryphistera alaudina</i>	Crestudo
<i>Hemitriccus margaritaceiventer</i>	Mosqueta ojo dorado
<i>Heteroxolmis dominicana</i>	Viudita blanca grande
<i>Sporophila hypochroma</i>	Capuchino canela
<i>Sporophila palustris</i>	Capuchino pecho blanco
<i>Sporophila ruficollis</i>	Capuchino garganta café
<i>Saltator coerulescens</i>	Rey del bosque gris
<i>Xanthopsar flavus</i>	Tordo amarillo
<i>Amblyramphus holosericeus</i>	Federal
<i>Volatinia jacarina</i>	Volantinero
<i>Sporophila cinnamomea</i>	Capuchino corona gris
<i>Gubernatrix cristata</i>	Cardenal amarillo
<i>Cistothorus platensis</i>	Ratonera aperdizada
<i>Polystictus pectoralis</i>	Tachurí canela

<i>Bartramia longicauda</i>	Batitú
<i>Pluvialis dominica</i>	Chorlo Pampa
<i>Nycticryphes semicollaris</i>	Aguatero
Mamíferos	
<i>Cryptonanus cf. chacoensis</i>	Marmosa
<i>Molossops temminckii</i>	Moloso enano
<i>Eptesicus diminutus</i>	Murciélago dorado
<i>Puma concolor</i>	Puma
<i>Nasua nasua</i>	Coatí
<i>Leopardus braccatus</i>	Gato de Pajonal

Fuente: DINAMA, 2014.

3.3. Contexto socioeconómico

Los esteros que componen el área protegida se vinculan con dos localidades: Nuevo Berlín y San Javier. Según los datos censales del Instituto Nacional de Estadística (INE, 2011) la población de Nuevo Berlín está integrada por un total de 2.450 habitantes de los cuales 1.193 son mujeres y 1.257 son hombres. Mientras que, en San Javier, la población está integrada por un total de 1.781 habitantes de los cuales 905 son mujeres y 876 hombres. En ambos casos, la población de la franja entre los 10 y 19 años de edad representa el grupo más numeroso, con un 20 % y 19 % respectivamente.

Las principales actividades vinculadas a los Esteros de Farrapos son: ganadería, apicultura, pesca, caza y tala. El relacionamiento de las localidades de San Javier y Nuevo Berlín con el área protegida presenta una impronta característica. La localidad de San Javier presenta una dinámica con una explotación basada en la utilización directa del área protegida para el pastoreo de animales. También se realiza actividad apícola pero menos extendida. Por su parte, Nuevo Berlín presenta una dinámica de utilización estacional de los recursos vinculados a la caza, la pesca y la apicultura con procesos asociativos e intervención estatal (DINAMA, 2014).

Los Esteros de Farrapos se encuentran contiguos y al oeste de la zona de mayor intensidad de uso del suelo del departamento de Río Negro. En este contexto, una superficie importante de la cuenca hidrográfica que drena sus aguas hacia los esteros, se encuentra actualmente ocupada por monocultivos agrícolas. De hecho, el 46 % de la superficie de la cuenca se encuentra ocupada por cultivos principalmente al norte de la cuenca y el 14 % por forestación de especies exóticas ubicados en general en las regiones centro y sur de la misma (DINAMA, 2014).

Según Sosa *et al.* (2014), la superficie agrícola y forestal en las zonas aledañas a los Humedales de Farrapos se ha incrementado rápidamente como consecuencia de una reconversión productiva de tierras dedicadas a la ganadería a predios ocupados por cultivos intensivos y forestación.

El uso intensivo del suelo en la cuenca de los Humedales podría afectar la conservación de la biodiversidad en el sistema al menos en tres aspectos: contaminación por agroquímicos, erosión y degradación de suelos y tala de bosque nativo. La gestión sobre la zona aledaña del área protegida debiera enfatizar en la regulación y el control del uso de agroquímicos; el desarrollo de prácticas agrícolas bajo principios de conservación de suelos; y la reducción de la tala del monte.

4. Servicios ecosistémicos que presta

Se definen funciones ecosistémicas como los procesos biológicos, geoquímicos y físicos que tienen lugar en un ecosistema y producen un servicio, y servicios ecosistémicos como los beneficios que las personas obtienen de los ecosistemas (modificado de Maynard *et al.*, 2010, en Soutullo *et al.*, 2012).

Los Servicios Ecosistémicos (SE), se pueden clasificar como servicios de soporte, culturales, de regulación y provisión. Los servicios de regulación están vinculados con los procesos ecológicos, como la regulación del microclima, la purificación del aire, el control de la erosión, la polinización o la atenuación de las inundaciones. Los servicios de provisión o abastecimiento se refieren a aquellos productos obtenidos de los ecosistemas, como alimentos, agua, madera y fibras, medicinas naturales, entre otros (MEA, 2005).

Los Esteros de Farrapos brindan los siguientes servicios ecosistémicos:

- Regulación. Calidad de agua
- Regulación. Control de inundaciones
- Provisión. Agua
- Provisión. Alimento
- Soporte. Hábitat, abrigo y protección de animales. Biodiversidad.
- Soporte. Producción primaria. Productividad. Brinda oxígeno
- Cultural. Recreativo. Paseo. Pesca
- Cultural. Valor estético y paisajístico

5. Temas clave y objetivos científicos

Los Esteros de Farrapos pueden cumplir con varios objetivos científicos dada su relevancia en el país, pero el aspecto científico que dio lugar a su elección como candidato a Sitio Demostrativo, fue el estudio desarrollado por el Grupo de Agua Subterránea de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República, con el apoyo de SNAP, RAMSAR y CeReGAS, para realizar la caracterización hidrogeológica de la zona de influencia del Parque Nacional Esteros de Farrapos y profundizar en el conocimiento sobre la vinculación de los humedales con el agua subterránea y superficial, de forma de ampliar el conocimiento del funcionamiento hidrológico del sistema de humedales en dicha zona.

6. Modelo conceptual de funcionamiento

El funcionamiento del humedal está estrechamente vinculado a la dinámica fluvial del Río Uruguay. El sistema fluvial es el más importante de los elementos reguladores del nivel de inundación y su altimetría controla el régimen de inundación desde el río hacia el humedal y el régimen de descarga desde el humedal hacia el río. No obstante, otros procesos hidrológicos (entrada, liberación y permanencia de agua) también afectan y determinan la dinámica funcional de este sistema.

Según indican algunos estudios y observaciones recogidas en el Plan de Manejo del Parque Nacional Esteros de Farrapos e Islas del Río Uruguay, los aportes de agua están determinados por las precipitaciones, los cursos y la escorrentía en tierras altas de la cuenca de captación, el flujo subsuperficial (evidenciado por la presencia de napas colgadas) y las crecidas del Río Uruguay.

La capacidad de carga del río (con sus variaciones estacionales) determina los procesos de deposición-erosión en el albardón litoral. Por lo tanto, las variaciones en el régimen del funcionamiento hídrico del Río Uruguay (represa de Salto Grande, cambios en el uso del suelo, aumento de los niveles de erosión de suelos en la cuenca), generan cambios en el funcionamiento hídrico del humedal.

Por otra parte, es importante destacar la doble funcionalidad del ecosistema de humedales hacia el sistema fluvial:

- El proceso de depuración de aguas que drenan desde las tierras altas hacia el río, así como las aguas del río que ingresan al sistema de humedal pierden energía, este proceso de disminución de velocidad, junto a la actividad biológica funciona como un filtro longitudinal del río. Por otra parte, la doble circulación de aguas desde el río hacia el humedal y desde el humedal hacia el río contribuye (aunque en forma muy marginal) a un mantenimiento del nivel altimétrico de las aguas del río.
- La navegabilidad del Río Uruguay, la disponibilidad de accesos desde Puerto Viejo, San Javier y Nuevo Berlín, hacen de esta unidad ambiental una importante (quizá la principal) vía de acceso al humedal.

La dinámica del agua superficial en el área está determinada principalmente por (DINAMA, 2014): (1) Precipitaciones. (2) Los cursos de aguas de las tierras altas. En la cuenca de los humedales de Farrapos se ubican 14 cursos de agua que desembocan en forma directa en el humedal constituyéndose en el principal nexo entre el humedal y las tierras altas. (3) Escorrentía desde tierras altas. Probablemente este proceso no constituya un aporte significativo al sistema de humedales dado que es razonable suponer que estos aportes confluyan en los cursos de aguas de las microcuencas del sistema. Los aportes por escorrentía que no confluyan en las mencionadas microcuencas estarían además limitados por la presencia de la paleocosta que actuaría como barrera en aquellos segmentos en los que la altura de la paleocosta sea superior a la de tierras altas. (4) Crecidas del Río Uruguay: Constituye el aporte de agua más importante del sistema. Cuando el caudal de agua del Río Uruguay crece y supera el nivel de su albardón inunda el humedal. La extensión y profundidad de la inundación dependerá de la magnitud de la inundación. Estos eventos de inundaciones se producen debido a tres factores: (a) precipitaciones sobre la cuenca del Río Uruguay (b) apertura de la represa de Salto Grande (c) aumento del nivel de agua del Río Uruguay como resultado de los vientos pamperos que represan el río y desbordan sobre el humedal. (5) Crecidas en los cursos tributarios del Río Uruguay. Cuando el Río Uruguay incrementa su caudal (en eventos que no necesariamente producen inundaciones en el humedal) estos cursos constituyen canales de ingreso de agua hacia el humedal. Si la cantidad de agua transportada por estos cursos supera la capacidad de su cauce entonces se producirán eventos de inundación aportando agua al humedal. En este escenario, se podrían producir eventos de inundación diferenciales en las zonas adyacentes a estos cursos.

En el Plan de Manejo del Parque Nacional Esteros de Farrapos e Islas del Río Uruguay (DINAMA, 2014) se mencionan también los flujos subsuperficiales como otro aporte de agua hacia el humedal, evidenciado por la presencia en la cuenca de napas colgadas que afloran en algunos lugares de la paleocosta. En ese documento se indica que “si bien no es posible estimar la magnitud de estos aportes en el humedal, cabe destacar su rol durante los eventos de sequía. En este contexto se destaca la presencia de “ojos de agua” próximos a la paleocosta que se utilizan como bebederos para el ganado pudiendo además ser utilizados por el conjunto de la fauna de la zona”.

Este último elemento de la dinámica del agua en los Esteros de Farrapos, ha sido abordado en el estudio llevado a cabo por el Grupo de Hidrología Subterránea de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República, el que ha determinado que hidrogeológicamente, el área forma parte del Sistema Acuífero Mercedes (SAM), conformado por tres formaciones sedimentarias diferentes (Fm. Asencio, Fm. Mercedes y Fm. Guichón), de granulometría y consolidación distintas, donde sus cualidades hidráulicas varían mucho lateralmente y en profundidad (De los Santos *et al.*, 2017). En el sector del SAM que conforma el área de estudio, las perforaciones analizadas muestran la existencia de estas mismas formaciones como principales unidades acuíferas. También existen algunas perforaciones que explotan únicamente la Fm. Salto y la Fm. Fray Bentos.

En el caso de Fm. Salto, la misma no presenta tanta importancia como unidad acuífera comparada con las demás formaciones, ya que se presenta aflorando hacia el este sobre el límite del área de estudio y no presenta continuidad como en otras zonas del país. En cuanto a la Fm. Fray Bentos, esta se encuentra presente casi en la totalidad del área de estudio sobreyaciendo a la Fm. Asencio. Los pozos que explotan exclusivamente esta formación presentan caudales específicos del orden de $0,45 \text{ m}^3/\text{h/m}$.

Para las perforaciones que atraviesan la Fm. Asencio y/o Fm. Mercedes, los caudales específicos varían entre $0,1$ y $5,5 \text{ m}^3/\text{h/m}$, lo cual evidencia el potencial acuífero de estas dos formaciones, las principales del SAM. Finalmente, solo una escasa cantidad de pozos finalizan en litologías que se pudieran asociar con la Fm. Guichón. Debido a la falta de datos y de antecedentes en la zona no es posible asociar esta formación con un caudal extractivo. De todas formas, en los pozos que alcanzan esta litología, fueron ubicados filtros de hasta 6 metros para captar agua a estas profundidades.

En cuanto a la geometría del acuífero en la zona de estudio, la Fm. Mercedes y la Fm. Asencio presentan un basculamiento hacia el oeste, por lo que la cota de techo de ambas formaciones se profundiza en el entorno de 50 m. Esta situación se observa en la zona de San Javier como en las inmediaciones del Arroyo del Sauce.

Haciendo énfasis en la geología en las inmediaciones del Parque Nacional Esteros de Farrapos (PNEF), en un perfil litológico pueden encontrarse sedimentos finos de la Fm. Fray Bentos, del orden de tres o cuatro decenas de metros en las cercanías de San Javier. Seguido en profundidad, se aprecia la potencia de la Fm. Asencio, con potencias registradas del orden de veinte a treinta metros en la zona de San Javier, disminuyendo su potencia hacia el sur, con registros del orden de 10 metros en las cercanías del ingreso del Arroyo del Sauce a los esteros.

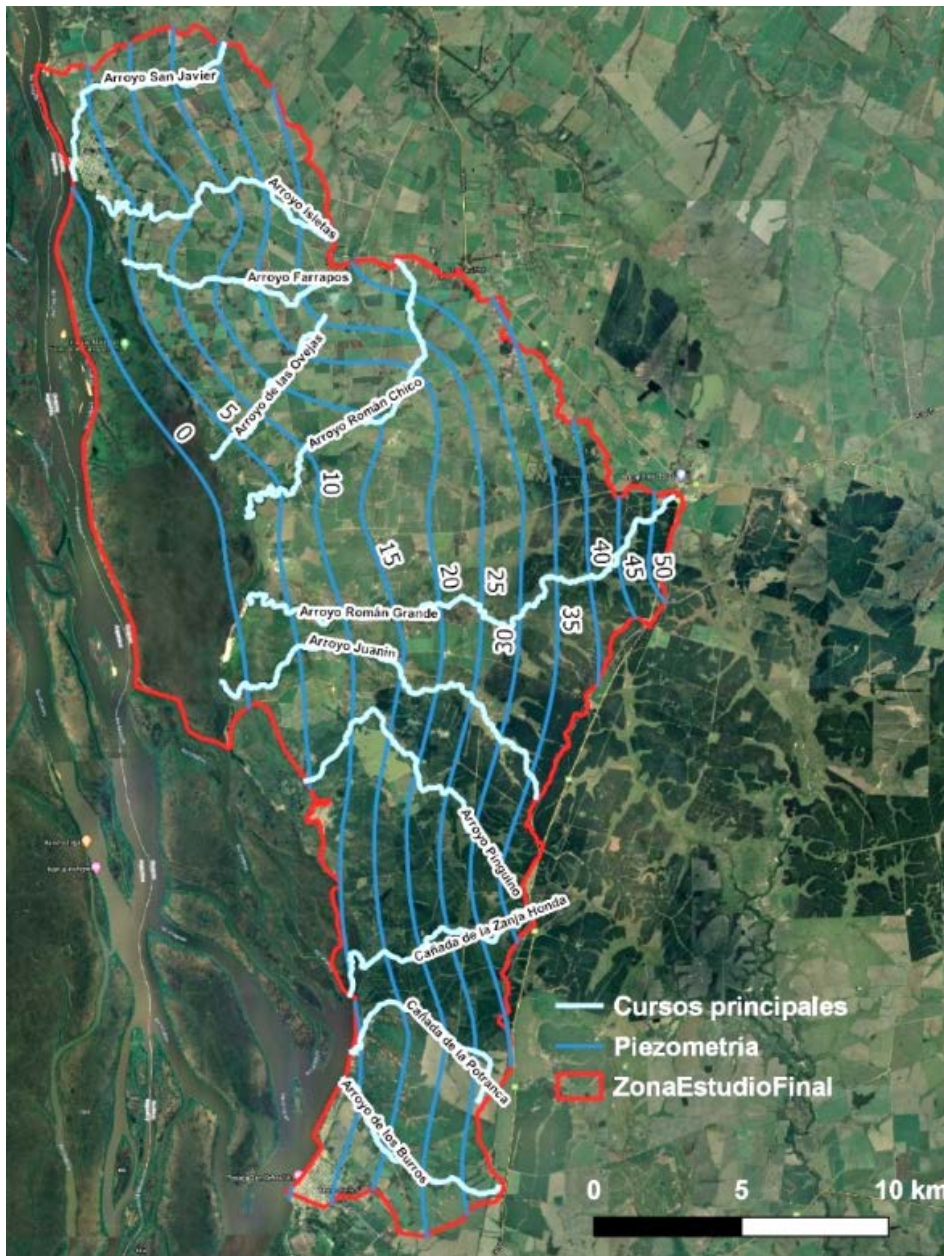
Por último, los registros de la presencia de la Fm. Mercedes en las inmediaciones del PNEF son escasos. Sin embargo, se pueden destacar algunos afloramientos e inferidos a través de estudios geofísicos.

Tomando como base la información geológica brindada por las perforaciones estudiadas y los perfiles geofísicos analizados, se estima que la Fm. Fray Bentos es la que subyace a la zona de humedales presente en la costa del Río Uruguay, por lo tanto, la que podría descargar en forma directa el agua subterránea hacia el humedal. Sin duda que esto podría presentar variaciones si se contara con información detallada del desarrollo de la geología en subsuelo en esta zona en concreto.

La piezometría realizada evidencia la existencia de flujos en dirección este-oeste, con una marcada descarga hacia la zona de ubicación del PNEF (Figura 44). Sumado a lo anterior, se observa la interacción con los cursos de agua superficial menores, como el Arroyo Isletas y el Arroyo Cañada del Sauce los cuales funcionarían, al igual que el Río Uruguay, de zonas de descarga del acuífero. No se evidencian zonas puntuales de recarga en el mapa piezométrico.

Se realizó una campaña de muestreo químico en época de estiaje y se observó que en los arroyos de la cuenca de aporte se evidencia una composición química similar a la del agua subterránea. A su vez, las aguas de los arroyos cercanas al humedal muestran la misma marca isotópica del agua subterránea. Esto implica la existencia de un flujo base subterráneo en los principales arroyos de la cuenca superficial del PNEF.

Figura 6. Piezometría obtenida en febrero 2018



Fuente: Elaboración propia.

Las muestras tomadas en las lagunas semipermanentes del humedal no reflejan una descarga directa del acuífero, pese a que las muestras se tomaron en época de estiaje. Es posible que el origen de las lagunas sea agua del Río Uruguay o de lluvia local al momento del muestreo. No obstante, la muestra de nivel freático del humedal pareciera evidenciar una fuerte componente subterránea. En base a la información geológica, piezométrica e hidroquímica desarrollada en el presente trabajo, el vínculo hidráulico entre acuífero y humedal se daría a través de la Fm. Fray Bentos.

7. Medidas y acciones ecohidrológicas

El trabajo realizado ha permitido recopilar y generar información hidrogeológica en una zona de alto valor ecosistémico en el territorio nacional, como lo es el Parque Nacional Esteros de Farrapos. Esta información podrá ser utilizada por los diferentes organismos de gestión del territorio y recursos, por la comunidad e instituciones académicas en futuras investigaciones.

Dentro de los resultados obtenidos se ha conformado una base de datos de perforaciones existentes, se ha generado un mapa geológico de superficie en detalle, junto a la elaboración de tres cortes geológicos que muestran el desarrollo de la geología en subsuperficie. También se ha obtenido el primer mapa piezométrico en detalle de la zona de estudio, mediante el relevamiento de niveles en casi 100 pozos.

Se ha realizado el primer muestreo hidroquímico e isotópico de las aguas subterráneas y superficiales en la cuenca de aporte de los esterros, muestreando un total de 14 puntos entre muestras de agua superficial, subterránea y de los humedales de los esterros.

Se ha obtenido información geofísica en seis sitios de interés, mediante la utilización de técnicas tales como tomografías de resistividad eléctrica (ERT) y transiente electromagnético de dominio en el tiempo (TEM).

Con el primer estudio isotópico e hidroquímico de las aguas del PNEF se han logrado verificar algunas hipótesis planteadas y algunos resultados parciales obtenidos en el estudio piezométrico, acerca del movimiento de las aguas y la interrelación entre aguas superficiales y subterráneas. A su vez, se han evidenciado nuevos aspectos de interés para el modelo conceptual hidrogeológico de la zona de estudio. Como lo es la posible incidencia de la Fm. Bellaco en la composición iónica de las aguas de la zona centro y sur de la zona de estudio. Esto podría evidenciar zonas de recarga local que no habrían sido advertidas por otras técnicas de estudio. Se han determinado algunos efectos locales, en los cuales resulta interesante continuar profundizando para evaluar su extensión e incidencia en la cuenca.

8. Lecciones aprendidas

Los resultados obtenidos muestran los beneficios en la utilización de técnicas complementarias para el estudio hidrogeológico en una zona en particular. Este trabajo permitió validar algunas de las hipótesis planteadas sobre el funcionamiento hidrológico del sistema, así como definir un punto de partida para futuros estudios que permitan ampliar el conocimiento del mismo.

Para comprender mejor y determinar con exactitud la interrelación entre el agua subterránea y el humedal es necesario contar con un mayor volumen de información, dado que el sistema se vuelve muy heterogéneo y complejo por la presencia del Río Uruguay, canales drenantes y desembocadura de cursos menores en esa zona.

Como futuras investigaciones en la zona, es necesario incorporar un muestreo continuo de niveles piezométricos en la zona cercana al humedal y dentro del humedal para poder establecer si efectivamente existe correlación. También sería necesario poder medir de manera continua los caudales de los cauces superficiales que atraviesan el humedal e interactúan con el Río Uruguay, o bien la realización de campañas puntuales de aforo que sirvan de insumo para calibrar modelos de escurrimiento para cuencas no aforadas.

Desde el punto de vista del modelo físico, sería necesario realizar mediciones geofísicas y estudios geológicos en detalle dentro de los humedales. También se requiere un estudio en detalle de los

afloramientos y de los sistemas de fallas existentes en la zona, que generan una alta heterogeneidad geológica.

En trabajos futuros, sería recomendable incorporar la realización de pruebas de bombeo que permitan caracterizar los parámetros hidráulicos para cuantificar el flujo subterráneo de descarga hacia el humedal. En particular, resulta de interés la realización de ensayos de bombeo en pozos someros que exploten la Fm. Fray Bentos en las inmediaciones del humedal.

Si bien el aporte de información hidroquímica e isotópica ha resultado valioso en esta etapa, es recomendable extender el número de puntos a muestrear, sobre todo en zonas del humedal, realizando muestreos hidroquímicos e isotópicos en diferentes estaciones. Esto permitirá desarrollar un modelo hidrogeoquímico y por ende seguir complejizando el conocimiento del modelo conceptual de interacción de agua subterránea y humedales.

También se visualiza la necesidad de desarrollar un modelo numérico de flujo que permita reunir toda la información existente en la zona de estudio y que actúe como herramienta para profundizar en el modelo conceptual de la zona. Por último, el desarrollo de un modelo numérico de flujo constituirá una valiosa herramienta para los gestores con injerencia en el PNEF.

El estudio hidrogeológico de la cuenca del PNEF ha permitido mejorar la comprensión del modelo conceptual hidrológico de los humedales de Esteros de Farrapos. Los resultados preliminares indican que existe vinculación hidrológica entre los cursos de agua de la cuenca del PNEF y de los humedales con el sistema de flujo de agua subterránea que se desarrolla en la zona. Aunque es necesario ampliar el volumen de información hidrogeológica para profundizar en el conocimiento del vínculo agua superficial-agua subterránea-humedal se logró desarrollar un primer modelo conceptual hidrogeológico que explica dicha interacción. La cual, hasta el momento, no había sido advertida con la importancia que parece reflejar.

Referencias bibliográficas

- Cayssials, R., Pérez-Miles, F., y Maneyro, R. (2002). Pautas para la elaboración de un Plan de Manejo para el Área de Esteros de Farrapos. Primera parte: Medio Físico y Fauna. Informe final. Convenio Dinama – Facultad de Ciencias. 148 p
- Chebataroff J. (1973). Introducción de los ecosistemas de bañados salinos. Revista Uruguaya de Geografía, Montevideo, Uruguay. 2: 31-41.
- Chebataroff, J. (1980). La vegetación de algarrobal, monte espinoso del litoral, I. Divisiones de la Provincia Fitogeográfica Uruguayense. In Jornadas de Ciencias Naturales, (Montevideo). Resúmenes. Montevideo. pp. 77-78.
- De los Santos, J., Menta A., Giménez M., Flaquer A., Musso M., Ramos J., Ford S., Gregorio J., García G., Bessouat C., Herrera G., Hernández G., Corbo F., Becerra. (2017). Gestión Ambiental del Sistema Acuífero Mercedes (SAM). Versión borrador.
- Del Puerto, O. (1987). Vegetación del Uruguay. Montevideo. Facultad de Agronomía. 16 p
- Dirección Nacional de Medio Ambiente - DINAMA (2014). Plan de manejo del Parque Nacional Esteros de Farrapos e Islas del Río Uruguay.
- Fernández, G., Achkar, M., Domínguez, A., Pesce, F., Canton, V. (2010). Caracterización geomorfológica de la cuenca del bañado de Farrapos, Río Negro, Uruguay. Revista Geográfica, 148, 43–55. <http://www.jstor.org/stable/40996827>

- Flaquer, A.; Menta, A.; García, G.; Giménez, M. (2019). Estudio Hidrogeológico Parque Nacional Esteros de Farrapos. Diplomatura de Especialización en Hidrología Subterránea de la Facultad de Ingeniería-UdelaR. Informe Final (Inédito).
- Infraestructura de Datos Espaciales IDE - Uruguay. Acceso 23/10/2020. <https://www.gub.uy/infraestructura-datos-espaciales/>
- Instituto Nacional de Estadística INE (2011). Datos censales de población. Acceso 23/10/2020 <https://www.ine.gub.uy/web/guest/censos-2011/>
- Millennium ecosystem assessment, M. E. A. (2005). Ecosystems and human well-being (Vol. 5, p. 563). Washington, DC: Island press.
- Ragonese, A. E., Covas, G. (1947). La Flora Halófila del Sur de la Provincia de Santa Fe (República Argentina). *Darwiniana*, 7(3), 401–496. <http://www.jstor.org/stable/23211613>
- Sistema Nacional de Áreas Protegidas SNAP . Acceso 22/10/2020. <http://www.snap.gub.uy/sisnap/web/>
- Sosa, B.; Cantón, V.; Achkar, M. (2014). Los espacios de conservación en la gestión territorial: Análisis del Parque Nacional Esteros de Farrapos e Islas del Río Uruguay. *Estudios Geográficos*, Vol. LXXI, 276, pp. 407-415, enero-junio 2014
- Soutullo, A.; Bartesaghi, L.; Achkar, M.; Blum, A.; Brazeiro, A.; Ceroni, M.; Gutiérrez, O.; Panario, D.; Rodríguez-Gallego, L. (2012). Evaluación y mapeo de servicios ecosistémicos de Uruguay. Informe Técnico. Convenio MGAP/PPR – CIEDUR/ Facultad de Ciencias/Vida Silvestre Uruguay/Sociedad Zoológica del Uruguay. 20 pp.

Marcelo Gaviño Novillo (1), Miguel Doria (2), Beatriz Hernández Castillo (3)

1. La necesidad de proponer soluciones innovativas para una gestión del agua inteligente

Si bien los recursos hídricos son renovables, la presión sobre su uso es cada vez mayor en esta nueva era del Antropoceno como se indicara al inicio del presente Documento Técnico. El impacto del cambio global impulsado por el crecimiento económico y demográfico se traduce en un fuerte impacto sobre el balance hídrico y la calidad del agua que torna necesario profundizar y ampliar nuestro conocimiento de la hidrología desde una perspectiva integral en su relación con los ecosistemas y las demandas de agua de la sociedad desde una visión comprometida. Por ello, la gestión del agua debe involucrar no solamente a expertos y gestores, sino que es clave una participación activa de la sociedad a partir de una profunda concienciación sobre los desafíos a enfrentar en las próximas décadas de manera inteligente.

La variabilidad y el cambio climático exacerbaban la gravedad de estos desafíos y aumentan la urgencia de contar con una agenda mundial sobre el agua que se apoye en nuevos paradigmas a partir de la investigación científica transdisciplinaria como sustento de una gobernanza capaz de garantizar una seguridad hídrica a largo plazo. Alcanzar los ODS en pocos años más implica un reconocimiento de la compleja relación entre los seres humanos y la biosfera, así como el rol del agua como impulsor de la bioproductividad, la biodiversidad y la dinámica de los ciclos biogeoquímicos en tanto procesos fundamentales que sustentan la vida.

Una respuesta a este desafío propuesto por la UNESCO/PHI surge de la implementación de la ecohidrología en tanto una nueva ciencia transdisciplinaria que propone soluciones sistémicas innovadoras a partir de la comprensión de la interacción entre los ecosistemas acuáticos, como receptores y productores de agua y las soluciones basadas en la naturaleza (SbN), que deben ser acompañadas por la participación de la sociedad a través de una cultura y educación sobre el agua y la sostenibilidad.

(1) Profesor (r) Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata; Consultor UNESCO, (2) Hidrólogo Regional, Programa Hidrológico Intergubernamental, UNESCO, (3) Fundación Natura
(1) magavino@gmail.com (2) m.doria@unesco.org (3) beacajuan@gmail.com

2. La Red de Sitios Demostrativos en América Latina y el Caribe al final del PHI-VIII

En este marco, en el año 2005 surgió la iniciativa de contar con observatorios de la implementación de dicha ciencia a partir de la selección de una red de proyectos alrededor del mundo en los cuales de manera innovadora se aplicaron soluciones ecohidrológicas. En base a estas iniciativas se conformó un selecto grupo de Sitios Demostrativos que en la actualidad alcanza a un total de 29 a escala mundial que se encuentran ubicados en 19 países. En estos sitios se ha desarrollado la comprensión de las interacciones agua-ecosistemas-sociedad y se han implementado soluciones basadas en la naturaleza que adicionalmente permiten la formación de profesionales así como la concienciación de la sociedad a través del enfoque WBSRCE (agua, biodiversidad, servicios ecosistémicos para la sociedad, resiliencia a impactos, componentes sociales, culturales y educativos).

En este marco, la región de América Latina y el Caribe ha estado presente desde el lanzamiento de la red de Sitios Demostrativos en el año 2005 contando en la actualidad con 7 proyectos que han sido presentados a lo largo del presente documento y se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 1 Desafíos y objetivos de los sitios demostrativos en América Latina y el Caribe

	País	Nombre sitio demostrativo	Desafíos	Objetivo
1	Argentina	Cuenca Lago Lácar	<ul style="list-style-type: none"> • Uso intensivo del suelo • Contaminantes • Nutrientes • Pérdida de capacidad de retención de la vegetación 	<ul style="list-style-type: none"> • Formulación de políticas basadas en evidencias. • Participación de las autoridades locales / partes interesadas en la implementación de estrategias de gestión de SE. • Formación in situ para jóvenes científicos y responsables de la toma de decisiones. • Difusión de información sobre enfoque ecohidrológico para la gestión del agua.
2	Bahamas	Estanque Victoria	<ul style="list-style-type: none"> • Contaminantes • Nutrientes • Sobreexplotación del recurso hídrico • Especies invasoras • Pérdida de hábitat 	<ul style="list-style-type: none"> • Crear una reserva de manglares local dentro de George Town para proteger los humedales. • Ayudar a mantener y financiar la reserva.
3	Costa Rica	Cuenca río Reventazón	<ul style="list-style-type: none"> • Sobreexplotación del recurso hídrico • Inundaciones 	<ul style="list-style-type: none"> • Reventazón es un sistema regulado desde los años 60, Savegre se mantiene como una condición prístina y ha sido reservado como río sin represas, Térraba está diseñado para uso futuro en energía.
4	Ecuador	Los Paltas	<ul style="list-style-type: none"> • Sobreexplotación del recurso hídrico • Sequías • Pérdida de capacidad de retención de la vegetación • Recarga de acuíferos limitada. 	<ul style="list-style-type: none"> • Crear áreas de vegetación para protección de fuentes y turismo. Para mantener nuevas condiciones de EH restauradas. • Incrementar la recarga de acuíferos. • Recuperar servicios ambientales de áreas conservadas y restauradas.

5	Ecuador	Pelican Bay Galápagos	<ul style="list-style-type: none"> • Contaminantes • Nutrientes • Especies Invasoras • Sequías • Sobreexplotación del recurso hídrico • Inundaciones • Pérdida de capacidad de retención de la vegetación 	<ul style="list-style-type: none"> • Adoptar la ecohidrología como una herramienta para la gestión integrada del Recurso Hídrico. • Educar y entrenar la población. • Reducir la contaminación del acuífero.
6	Colombia	Complejo cenagoso Zapatoza.	<ul style="list-style-type: none"> • Uso Intensivo del suelo • Contaminantes • Nutrientes • Pérdida de capacidad de retención de la vegetación • Sobreexplotación del recurso hídrico • Inundaciones • Pérdida de hábitat 	<ul style="list-style-type: none"> • Restablecer el diálogo entre los sistemas naturales, las comunidades y las instituciones para lograr un realce de la riqueza del ecosistema de la región buscando mejorar la calidad de vida de la población.
7	Colombia	Cuenca del Río Teusacá	<ul style="list-style-type: none"> • Pérdida de capacidad de retención de la vegetación • Contaminantes • Nutrientes • Inundaciones • Sequías • Uso Intensivo del suelo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Mejorar la calidad del agua para generar un espacio de apropiación para la población y un modelo replicable bajo diferentes condiciones. • Construir un espacio de aprendizaje donde diferentes actores involucrados puedan interactuar para ayudar al manejo integrado de la cuenca.

Fuente: UNESCO/PHI (2019)

Con objeto de mantener la información actualizada, el Comité Científico del Programa de Ecohidrología decidió en ocasión del Foro Mundial del Agua celebrado en las ciudades de Daegu y Gyeongbuk (Corea) el año 2015 se decidió la organización de una plataforma web (<http://ecohydrology-ihp.org/demosites/>) con información actualizada sobre los Sitios Demostrativos, las características principales (incluidos los artículos científicos relacionados, etc.), los principales eventos relacionados con la ecohidrología, oportunidades de financiación y una convocatoria a postular proyectos. La solicitud para adherirse puede realizarse a través de la plataforma web y la presentación de la “Fichas de proyectos demostrativos”. La plataforma web se visualiza en un formato de visualización unificado cuyo objeto es presentar las actividades que se desarrollan en cada sitio.

3. El Plan Estratégico PHI IX y la ecohidrología

El Plan Estratégico de la Novena Fase del Programa Hidrológico Intergubernamental (IHP-IX) que cubre el periodo 2022-2029 incluye la identificación de áreas prioritarias clave para la implementación de la ecohidrología de manera de apoyar a los Estados Miembros a alcanzar la

Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), especialmente los ODS relacionados con el agua y otras agendas globales relacionadas con el agua, como el Acuerdo de París sobre el Cambio Climático, el Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres (RRD) y la Nueva Agenda Urbana (NUA).

De esta manera, su implementación promueve el logro de una visión en la cual se alcance un mundo con seguridad hídrica donde las personas y las instituciones tengan la adecuada capacidad y conocimiento con base científica para tomar decisiones informadas sobre la gestión y la gobernanza del agua a fin de lograr el desarrollo sostenible y construir sociedades resilientes.

Por ello los Sitios Demostrativos conforman hitos para apoyar la investigación e innovación en ecohidrología a partir del trabajo de la comunidad científica y la Familia del Agua de la UNESCO, todo ello con objeto de evaluar el impacto de las soluciones ecohidrológicas y aquellas basadas en la naturaleza en los ciclos del agua que permitan a su vez la implementación de Gestión Integrada de Recursos Hídricos (GIRH).

Las Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN) a partir de la implementación de los principios ecohidrológicos contribuyen a mejorar la gestión del agua y, consecuentemente, la protección de los entornos ecológicamente sensibles, proporcionando servicios críticos, como humedales artificiales (fitotecnologías) para el tratamiento de aguas residuales o la mitigación de inundaciones, o también la restauración de manglares que favorezcan la reducción del impacto de las olas, las marejadas ciclónicas y la erosión costera. Los principios de la ecohidrología proporcionan en consecuencia un marco para la gestión de los ecosistemas como herramientas de gestión de cuencas, respondiendo preguntas que no es posible responder de manera holística únicamente a partir de la aplicación de las ciencias disciplinarias aisladas. Desde un abordaje amplio se logra una mayor comprensión de la complejidad de la gestión ambiental mediante la aplicación de los tres principios fundamentales de la ecohidrología: la cuantificación de los procesos hidrológicos y biológicos, la caracterización de las amenazas, el uso de las propiedades y servicios de los ecosistemas como herramienta en la gestión del agua (ecohidrología y soluciones basadas en la naturaleza) y la armonización de las infraestructuras grises y verdes para lograr la sostenibilidad de los ecosistemas estrechamente relacionados con la GIRH.

4. La red de Museos del Agua

Complementariamente a los Sitios Demostrativos se ha creado una esta red con el objetivo de difundir conocimientos relacionados con el agua mediante actividades educativas y de sensibilización pública, como plataformas web, conferencias, talleres, publicaciones, exposiciones y representaciones artísticas, y, en última instancia, para mejorar las prácticas de gestión y uso del agua, incluso mediante la participación pública informada.

La creación de esta red tiene como meta una relación entre los Museos del Agua y los Sitios Demostrativos, a fin de aumentar la cooperación nacional e internacional en proyectos culturales y de museología entre diferentes instituciones a nivel mundial.

- Facilitar el intercambio de experiencias y buenas prácticas entre los museos del agua con características y/o cuestiones comunes (gestión de los recursos hídricos para usos civiles, industriales y agrícolas, cambio climático, educación, etc.).
- Fortalecer las habilidades de gestión y el conocimiento con el objetivo de mejorar sus capacidades gerenciales y de comunicación de manera de abordar los desafíos emergentes actuales para usos más sostenibles del agua.

- Sentar las bases para posibles acciones comunes, exposiciones y proyectos que se ocupen en particular de la promoción de nuevos modelos de gestión inteligente del agua inspirados en las buenas prácticas de nuestras civilizaciones del agua y los avances de la investigación científica.

5. Líneas de trabajo a profundizar en los Sitios Demostrativos

La dinámica de la expansión espacial de las ciudades en América Latina y el Caribe genera “nuevos ecosistemas urbanos” cuya calidad de vida y niveles de cobertura de servicios básicos y de salud no son siempre las principales prioridades, de ahí la necesidad de contar con nuevos paradigmas de gestión holística de las aguas urbanas lo cual brinda una oportunidad para la creación de Sitios Demostrativos de Ecohidrología Urbana.

Uno de los principales desafíos surge de la necesidad de una gestión inteligente de las escorrentías lo cual es posible a partir de nuevos paradigmas como las ciudades esponja y la implementación de biotecnologías ecohidrológicas como son las soluciones basadas en la naturaleza que, por ejemplo, permitan la transferencia y captura de contaminantes de manera de mejorar la salud humana, los valores estéticos y aquellos culturales de una ciudad (biofilia).

Las infraestructuras verdes innovadoras a partir de la implementación del tercer principio de la ecohidrología se están promoviendo y adoptando en todo el mundo para mejorar el bienestar urbano y alcanzar los objetivos de desarrollo sostenible. Sin embargo, todos estos esfuerzos a menudo están guiados por principios estéticos, conceptuales y cualitativos en lugar de una comprensión cuantitativa de los procesos a escalas y retroalimentaciones adecuadas por lo cual es clave cerrar la brecha entre las investigaciones de base y la propuesta de soluciones a partir de evidencia científica, rol preponderante de los Sitios Demostrativos.

El concepto de ciudades-esponja surge del aprovechamiento de la capacidad natural de absorción e infiltración de las áreas permeables para controlar efectivamente la escorrentía pluvial, minimizando los problemas causados por el impacto hidrológico inducidos por la urbanización. La filosofía de Sponge City se basa en la transformación del principio tradicional de “drenaje rápido” hacia una implementación sistemática de fomentar los procesos de “infiltración, detención, retención, purificación, utilización y descarga” logrando la gestión de la escorrentía pluvial desde su reducción en la fuente. Ello requiere la planificación, el diseño, la construcción, la operación y la gestión de sistemas sostenibles para el desarrollo urbano (Smart Cities).

Así también será importante aprovechar los Sitios Demostrativos como laboratorios ambientales “a cielo abierto” donde se puedan aplicar enfoques innovadores de gestión a partir de la implementación y operación de sistemas expertos basados en modelos numéricos innovadores, sea tanto en áreas urbanas que permitan cuantificar la influencia de las infraestructuras verdes o eficiencia de las ciudades-esponja sobre el microclima y la escorrentía en las ciudades de manera de proporcionar pautas para los planificadores urbanos. Pero también será clave promover la simulación en ambientes rurales-productivos de las características biofísicas y ecofisiológicas de los cultivos de manera de predecir con precisión los efectos de la evapotranspiración y las reales necesidades de agua para generar una retroalimentación y, consecuentemente, reducir las demandas crecientes con fines productivos en una región en la cual la provisión de commodities al mundo entero estará vigente al menos las próximas décadas.



unesco

Programa Hidrológico
Intergubernamental