

# Trabajos de investigación

## Authors

Dunia González-Zéas  
Daniela Rosero-López  
Rafael Osorio  
Bert De Bièvre  
Olivier Dangles  
Coordination  
Stéphanie Leyronas

El nexo agua-  
biodiversidad-  
ciudad en  
acción: gestión  
sostenible y  
adaptativa de  
los recursos  
hídricos en  
Ecuador



# Agence française de développement

---

## Papiers de recherche

---

Les *Papiers de Recherche de l'AFD* ont pour but de diffuser rapidement les résultats de travaux en cours. Ils s'adressent principalement aux chercheurs, aux étudiants et au monde académique. Ils couvrent l'ensemble des sujets de travail de l'AFD : analyse économique, théorie économique, analyse des politiques publiques, sciences de l'ingénieur, sociologie, géographie et anthropologie. Une publication dans les *Papiers de Recherche de l'AFD* n'en exclut aucune autre.

Les opinions exprimées dans ce papier sont celles de son (ses) auteur(s) et ne reflètent pas nécessairement celles de l'AFD. Ce document est publié sous l'entière responsabilité de son (ses) auteur(s).

---

## AFD Research Papers

---

*AFD Research Papers* are intended to rapidly disseminate findings of ongoing work and mainly target researchers, students and the wider academic community. They cover the full range of AFD work, including: economic analysis, economic theory, policy analysis, engineering sciences, sociology, geography and anthropology. *AFD Research Papers* and other publications are not mutually exclusive.

The opinions expressed in this paper are those of the author(s) and do not necessarily reflect the position of AFD. It is therefore published under the sole responsibility of its author(s).

## **El nexo agua-biodiversidad-ciudad en acción: gestión sostenible y adaptativa de los recursos hídricos en Ecuador**

### **Dunia González-Zéas**

Institut de Recherche pour le Développement, Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive, UMR 5175, CNRS, Université de Montpellier, Université Paul Valéry Montpellier, EPHE, Montpellier, France

### **Daniela Rosero-López**

Soil and Water Lab, Department of Biological and Environmental Engineering, Cornell University, Ithaca, New York

### **Rafael Osorio**

Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento EPMAPS, Quito, Ecuador

### **Bert De Bièvre**

Fondo para la Protección del Agua FONAG, Quito, Ecuador

### **Olivier Dangles**

Institut de Recherche pour le Développement, Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive, UMR 5175, CNRS, Université de Montpellier, Université Paul Valéry Montpellier, EPHE, Montpellier, France

### **Abstract**

Facing the challenge of sustainable water management in large cities involves considering complex problems of interdependencies among various social, economic and environmental factors, and numerous conflicts of objectives and interests that pose political dilemmas. In order to face this complexity and these simultaneous dilemmas in problem solving,

new transdisciplinary approaches have emerged in recent years, built jointly between users and scientists, within the framework of sustainability science. This article presents an application of sustainability science through the CHALPI-FLOW project (2017-2020), financed by AFD and executed by the French Institute for a Sustainable Development (IRD), the Quito's water utility (EPMAPS), the Fund for Water Protection (FONAG) and Cornell University. The objective of CHALPI-FLOW is to develop indicators and adaptive management plans that allow maximizing the management of a mountain hydrographic system that supplies drinking water to the city of Quito, while minimizing the ecological impact. The most general scope of the project is to propose new applicable tools to face the challenges of the "water-biodiversity-cities" nexus at a regional scale in the tropical Andes and in a context of climate change.

### **Keywords**

Water management, optimization, biodiversity, quality, sustainability

### **JEL Classification**

L97, L98, O13, Q01, Q25, Q28

### **Original version**

Spanish

### **Accepted**

January 2021

### **Resumen**

Hacer frente al desafío de la gestión sostenible del agua en las ciudades grandes implica considerar problemas complejos de interdependencias entre diversos factores sociales, económicos y medioambientales y numerosos conflictos de objetivos e intereses que plantean dilemas políticos. Para afrontar esa complejidad y esos dilemas simultáneos en la resolución de problemas, en los últimos años han surgido nuevos enfoques transdisciplinarios, construidos conjuntamente entre los usuarios y los científicos, enmarcados en la ciencia de la sostenibilidad. Este artículo presenta una aplicación de la ciencia de la sostenibilidad a través del proyecto CHALPI-FLOW (2017-2020), financiado por la AFD y ejecutado entre el Instituto Francés de Investigación para el Desarrollo, la Empresa Metropolitana de Agua Potable de la ciudad de Quito, el Fondo para la protección del Agua y la Universidad de Cornell. El objetivo de CHALPI-FLOW es desarrollar indicadores y planes de manejo adaptativo que permitan maximizar la gestión de un sistema hidrográfico de montaña que abastece de agua potable a la ciudad de Quito, a la vez que se minimiza el impacto ecológico. El alcance más general del proyecto es proponer nuevas herramientas aplicables para enfrentar los desafíos del nexo "agua-biodiversidad-ciudades" a escala regional en los Andes tropicales y en un contexto de cambio climático.

### **Palabras clave**

Gestión del agua, optimización, biodiversidad, calidad, sostenibilidad

## **Résumé**

Relever le défi de la gestion durable de l'eau dans les grandes villes implique de considérer des problèmes complexes d'interdépendance entre divers facteurs sociaux, économiques et environnementaux et les nombreux conflits d'objectifs et d'intérêts qui posent des dilemmes politiques. Afin de résoudre ces dilemmes complexes et simultanés dans la résolution des problèmes, de nouvelles approches transdisciplinaires ont émergé ces dernières années, construites conjointement entre utilisateurs et scientifiques, dans le cadre de la science de la durabilité. Cet article présente une application de la science de la durabilité à travers le projet CHALPI-FLOW (2017-2020) financé par l'AFD et réalisé entre l'Institut Français de Recherche pour le Développement (IRD), la Compagnie des eaux métropolitaine de Quito (EPMAPS), le Fonds de protection de l'eau (FONAG) et l'Université de Cornell (USA). L'objectif de CHALPI-FLOW est de développer des indicateurs et des plans de gestion adaptatifs qui permettent d'optimiser la gestion d'un système hydrographique de montagne qui fournit de l'eau potable à la ville de Quito, tout en minimisant l'impact écologique. La portée plus générale du projet est de proposer de nouveaux outils applicables pour faire face aux défis du lien "eau-biodiversité-cités" à l'échelle régionale dans les Andes tropicales et dans un contexte de changement climatique.

## **Mots-clés**

Gestion de l'eau, optimisation, biodiversité, qualité, durabilité

## Introducción

La creciente presión sobre los recursos hídricos para satisfacer las demandas humanas ha aumentado la extracción de agua, siendo difícil satisfacer las necesidades humanas sin comprometer la salud del ecosistema (Liu *et al.*, 2008). Frente al creciente número de construcción de presas y captaciones de agua previstas en los próximos 30 años en varias partes del mundo, es crucial acompañar estos nuevos proyectos con estudios científicos que permitan guiar la gestión de las obras con el fin de minimizar sus impactos sobre el medio ambiente (Finner y Jenkins, 2012). A escala mundial, pocos estudios se han enfocado en evaluar los efectos ecológicos locales, aguas abajo de pequeñas captaciones y embalses, a pesar de que estos podrían estar asociados a considerables impactos acumulativos relacionados a la alteración del régimen hidrológico, cantidad de sedimentos y la consecuente afectación de la biodiversidad (Sutherland *et al.*, 2020; Rosero-López *et al.*, 2020c). Además, los grandes impactos ecológicos de las infraestructuras hidráulicas requieren una cuidadosa consideración, no solo desde el punto de vista de la conservación de la bio-diversidad, sino también de las implicaciones en los servicios claves del ecosistema tales como la depuración y provisión de agua. Los servicios ecosistémicos interactúan entre sí y con sus entornos, proporcionando beneficios o servicios.

Por ejemplo, hacen posible la vida humana al proveer alimentos y agua limpia, regular las enfermedades y el clima, ofrecer beneficios recreativos, entre otros (Hermoso, 2017; Jacobsen y Dangles 2017). En este contexto, los proyectos de gestión de los recursos hídricos deben tener una visión ambiciosa que integre los aspectos económicos, sociales y ambientales y que cambie el proceso tradicional de desarrollo de manera que se respete el medio ambiente, tal como se proclama en la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, a través de sus Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).



## **I – El Agua Potable y los objetivos de desarrollo sostenible**

El agua es un elemento fundamental de los ODS, los cuales constituyen un llamamiento internacional a la acción para poner fin a la pobreza, proteger el planeta y mejorar las vidas y las perspectivas de las personas en todo el mundo. Incluyen 17 compromisos principales que reconocen la importancia de los aspectos relacionados con el agua por derecho propio y como requisito para hacer realidad muchos de los otros objetivos (Figura 1). De hecho, los ODS hacen referencia no solo a los objetivos en materia de agua, sino también aquellos que apuntan a poner fin al hambre, promover la agricultura sostenible, lograr la igualdad de género y a generar fuentes de energía sostenible confiables. La integridad en la gobernanza en el sector del agua es esencial para proteger el medio ambiente y los ecosistemas y para construir ciudades seguras y sostenibles. Específicamente el Objetivo 6 – garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos, busca asegurar el acceso al agua segura, como es el caso del agua potable, y la higiene en el desarrollo y la estabilidad de las personas (Herrera 2019).

El desarrollo de la humanidad claramente depende de la seguridad del acceso a agua potable (ODS-6) que a su vez requiere la intervención sobre los ecosistemas saludables a través de infraestructura sostenible. Garantizar la distribución de agua en cantidad adecuada y de buena calidad involucra mantener dichos ecosistemas que proveen el recurso. En particular, la meta 6.4 apunta a "aumentar considerablemente el uso eficiente de los recursos hídricos en todos los sectores y asegurar la sostenibilidad de la extracción y el abastecimiento de agua dulce". Considerando el carácter central de las cuestiones del agua para los ODS, es esencial el desarrollo de indicadores de la sostenibilidad del uso del agua a niveles globales y también con los actores de la gestión del agua (Guppy *et al.* 2019). A un nivel local, se necesitan indicadores que faciliten la evaluación del estado de salud del agua frente a los cambios en los caudales inducidos por las extracciones de agua en las captaciones para el abastecimiento de agua potable.

**Figura 1: Relaciones entre los objetivos de desarrollo sostenible y el agua**

Fuente: N.U. CEPAL, 2019.



## **II – Proyecto CHALPI-FLOW: Desarrollo de soluciones para el manejo del agua de Quito**

El proyecto CHALPI-FLOW se origina como una oportunidad para proveer herramientas, indicadores y guías para el manejo sostenible del sistema de agua potable de Quito, dentro del marco de la construcción de “la Primera Etapa del Proyecto de Agua Potable Ríos Orientales – Ramal Chalpi” financiado con un préstamo de la Agencia Francesa de Desarrollo (AFD) a la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento (EPMAPS), el cual tiene por objetivo incrementar en 2.2 m<sup>3</sup>/s los caudales disponibles en el Sistema Integrado Papallacta y de esta forma contribuir en el corto y mediano plazo a la satisfacción de la demanda de agua potable del Distrito Metropolitano de Quito hasta el año 2040. La EPMAPS actualmente opera y mantiene varios sistemas de abastecimiento de agua (Sistema Integrado Papallacta, Pita, Mica y Occidental) para satisfacer la demanda actual de aproximadamente 2.6 millones de habitantes del Distrito Metropolitano de Quito (DMQ), que se proyecta crecerá a 4.2 millones para el año 2040 (Hazen and Sawyer, 2011). De acuerdo con la Actualización del Plan Maestro Integrado de Agua Potable y Alcantarillado del DMQ realizada en el año 2011, los sistemas de tratamiento de agua potable tienen una capacidad instalada de 9.4 m<sup>3</sup>/s, no obstante se establece que estos podrían reducirse a 8.1 m<sup>3</sup>/s bajo la necesidad de mantener caudales ecológicos en los ríos y cumplir con la normativa ambiental ecuatoriana. El análisis de la oferta y demanda señala que las instalaciones existentes en las fuentes de agua captadas no serán suficientes para abastecer las demandas máximas diarias proyectadas de 13 m<sup>3</sup>/s para el año 2040. Sin embargo, el Plan Maestro del DMQ recomienda reevaluar periódicamente los requerimientos de inversión a largo plazo, que podrían variar en el tiempo, como consecuencia del cambio en los patrones de consumo o cambios en el crecimiento poblacional en términos de cantidad y distribución espacial.

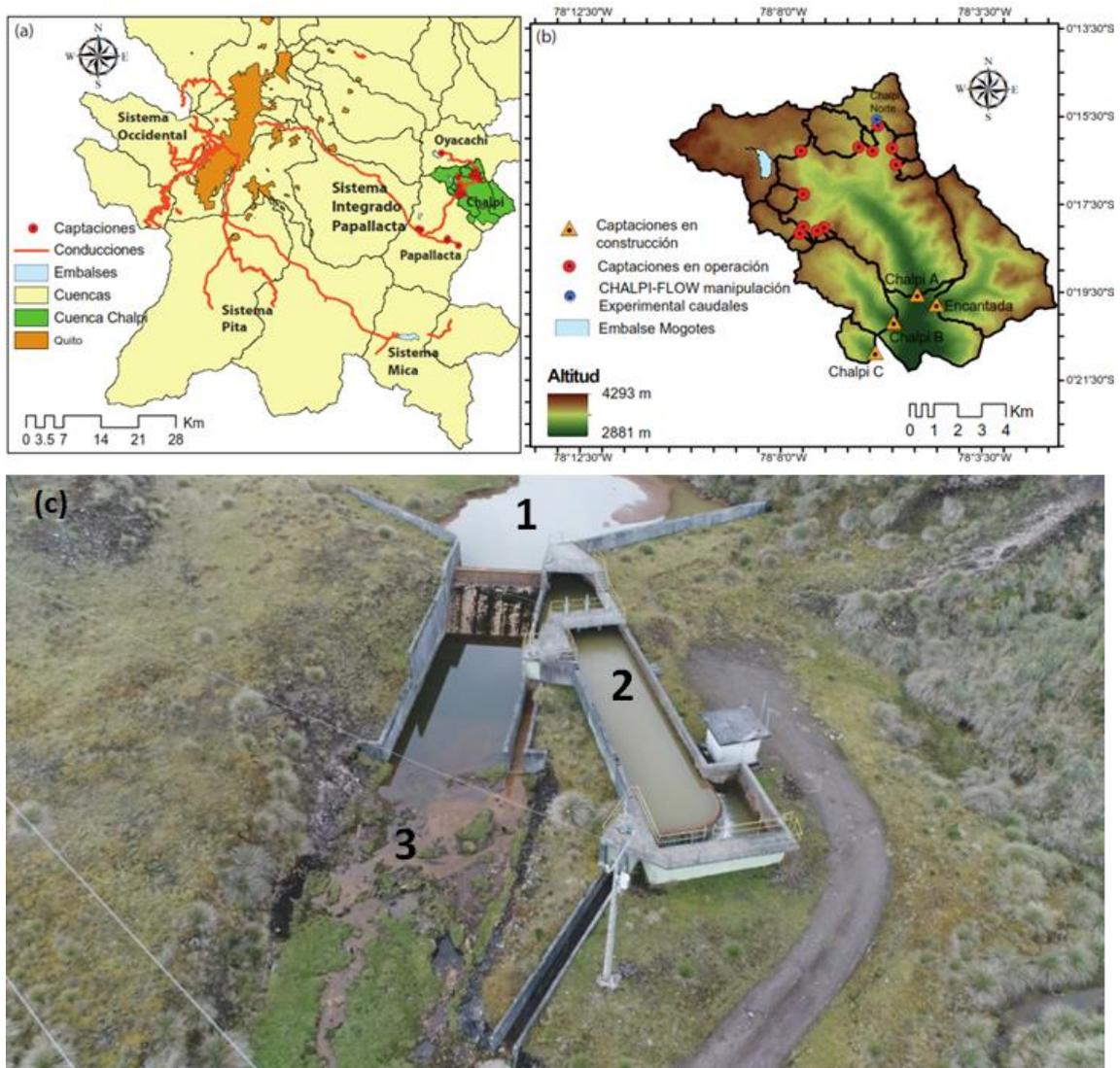
El estudio de diagnóstico del sistema de abastecimiento de agua existente (Hazen and Sawyer, 2011) recomienda varias acciones y proyectos para garantizar en el futuro el abastecimiento adecuado de agua al DMQ. Las recomendaciones se enfocan en dar prioridad al mejoramiento del sistema existente, además de un cuidadoso monitoreo de la disponibilidad y calidad de las fuentes de agua actualmente captadas, así como de las previstas para el aprovechamiento futuro. En este contexto, surge la iniciativa de colaboración de EPMAPS y FONAG (Fondo para la protección del Agua) con el Instituto de Investigación Francés para el Desarrollo (IRD) y la Universidad de Cornell, para construir un proyecto enfocado en la optimización del manejo del agua. Es importante destacar el papel crucial del FONAG dentro del proyecto, ya que se trata de un fondo mercantil para la conservación de la fuentes de agua, cuyo principal constituyente es la EPMAPS, y que a través de diferentes programas lleva a cabo acciones de conservación, recuperación o restauración de ecosistemas degradados que son fuentes de agua, así como acciones enfocadas en la gestión del agua, monitoreo y educación ambiental. El largo recorrido del FONAG en la protección de las fuentes de agua, en coordinación con el Sistema Nacional de Áreas Protegidas (Reserva Ecológica Antisana, Parque Nacional Cayambe – Coca, Parque

Nacional Cotopaxi), y en coordinación con la EPMAPS para dar soluciones inmediatas a cuestiones puntuales en las diferentes fuentes de abastecimiento de la ciudad de Quito, destaca el buen estado en las que éstas se encuentran. Sin embargo, entre las acciones para alcanzar la gestión integral de los recursos que abastecen al sistema de Quito hace falta incorporar el manejo optimizado de uso de las múltiples fuentes y el caudal ecológico después de las captaciones. El modelo de los fondos para el agua ha sido exitoso en varios países de América latina para construir visiones integradas de la gestión de los recursos hídricos (Jacobsen y Dangles 2017).

El estudio se realizó en la cuenca del río Chalpi, en donde se encuentran las principales fuentes de agua que contribuyen al Sistema Integrado Papallacta (SIP), el cual proporciona de agua potable a aproximadamente el 30% de los 2.6 millones de habitantes de la ciudad de Quito (Figura 2a). En la operación actual del SIP se destaca que muchas de sus captaciones toman todo el caudal del río para satisfacer la demanda, especialmente en los meses más secos, lo que genera impactos ecológicos, aguas abajo de las captaciones (Figura 2c). La cuenca de estudio tiene un área aproximada de 95 km<sup>2</sup> con elevaciones que varían entre 2880 a 4300 msnm y es ubicada en el Parque Nacional Cayambe-Coca. En la parte alta de la cuenca del Chalpi, la EPMAPS ha construido diferentes estructuras hidráulicas (11 captaciones y un embalse) que actualmente operan como parte del SIP. La vegetación predominante en la cuenca alta es el páramo, una planicie mayormente herbácea con un suelo esponjoso, que ofrece importantes funciones de fijación de carbono, retención y filtración de agua, y una biodiversidad única. En la cuenca baja del Chalpi se construye en la actualidad cuatro captaciones nuevas que forman parte del proyecto “Primera Etapa del Proyecto de Agua Potable Ríos Orientales – Ramal Chalpi” (Figura 2b) financiado por la AFD.

La investigación del proyecto CHALPI FLOW integra dos fases : (1) una fase de modelación que busca la optimización de los indicadores hidrológicos asociados al uso del agua (caudal captado para agua potable) e indicadores ecológicos asociados a la salud ecológica de los ríos, y (2) una fase de experimentación que incluye dos partes: (i) la calibración de un sistema de monitoreo de la calidad ecológica del agua que sea rápido y fácil de aplicar y (ii) el estudio de la respuesta hidrológica y de salud ecológica del agua a diferentes intensidades de captación (reducción y restitución de caudal) para simular la operación de las captaciones.

**Figura 2: (a) Ubicación de la cuenca de estudio Chalpi que forma parte del Sistema Integrado Papallacta. (b) Ubicación de captaciones en operación y las captaciones que forman parte del nuevo proyecto. (c) Fotografía de una captación de agua – 1. Río arriba, 2. Agua desviada, 3. Río abajo (con un poco de agua estancada pero no corriente)**  
 Fuente: González-Zeas *et al.*, 2019a.



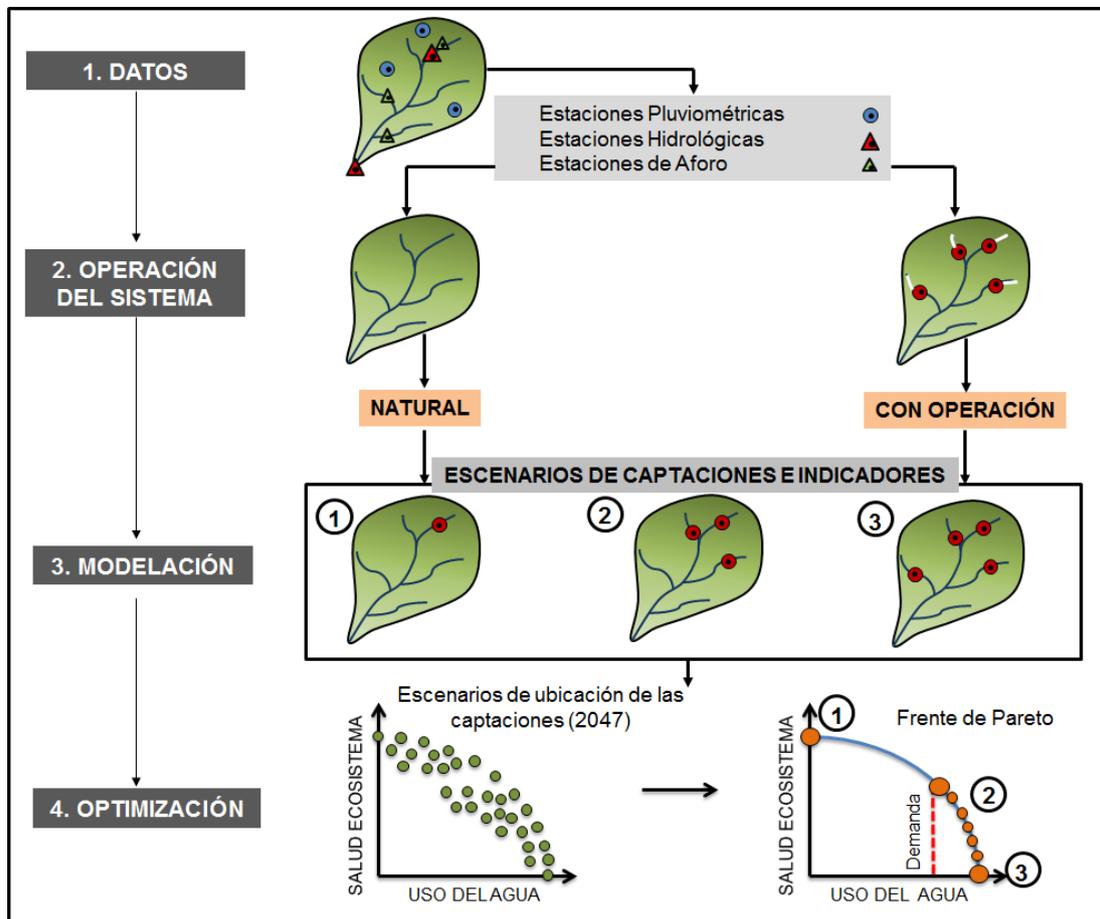
### **III – Solución de compromiso óptima entre el uso del agua y la salud del ecosistema**

El dilema de abastecer la población de Quito con agua potable mientras se preserva el estado de salud de los páramos, y en consecuencia la calidad de los ríos, requiere compromisos en el proceso de implementación, siendo por tanto necesario el desarrollo de metodologías de optimización. Además, una de las principales dificultades para la planificación sostenible de los recursos hídricos en los Andes tropicales, es la ausencia de indicadores cuantitativos fiables que faciliten a los gestores del agua tomar decisiones sobre los sistemas de abastecimiento y las fuentes de las que dependen. En consecuencia, la combinación de métodos de optimización e indicadores de gestión constituyen la base para alcanzar una planificación estratégica de los sistemas de captación para hacer frente a los retos de protección de los ecosistemas (Smith *et al.*, 2018). En este sentido, el proyecto CHALPI-FLOW ha proporcionado un nuevo marco metodológico para el desarrollo de una herramienta de planificación y gestión del agua a escala de cuenca hidrográfica, a través de un proceso de optimización entre el uso del agua y el estado de salud del páramo. La Figura 3 resume el procedimiento metodológico propuesto, el cual ha sido coordinado y construido conjuntamente con las autoridades responsables de la gestión del agua, e incluye los siguientes pasos (González *et al.* 2019a):

1. Recopilación y procesamiento de los datos disponibles (hidrometeorológicos, fisiográficos y de producción del sistema). Los datos de las estaciones hidrométricas disponibles en el área de estudio, se utilizan para obtener series de caudales en los puntos de captación con escasa o nula información hidrológica.
2. Diagnóstico de la operación del sistema de suministro de agua en situación actual.
3. Modelación del sistema de captaciones a través de la definición de indicadores hidrológicos (ejm. caudal disponible) e indicadores ecológicos (ejm. conectividad, cantidad de algas en el sistema), y la definición de posibles escenarios de configuración del sistema (número y ubicación; desde el número menor de captaciones (1) hasta el número mayor de captaciones (3)).
4. Optimización de los escenarios a través de la determinación del Frente de Pareto (situación en la cual se cumple que no es posible beneficiar a más escenarios en un sistema sin perjudicar a otros). Se utiliza una optimización multiobjetivo con la finalidad de obtener un conjunto de soluciones, con los mejores compromisos entre los objetivos optimizados.

**Figura 3: Esquema metodológico para la optimización del uso del agua para abastecimiento urbano y la salud del ecosistema. Los puntos rojos representan las captaciones de agua y las líneas blancas representan la pérdida de conectividad por la construcción de las captaciones. Los puntos verdes representan los diferentes escenarios de configuración del sistema (2047), los puntos rojos los escenarios óptimos del Frente de Pareto bajo diferentes configuraciones de incremento de captación de agua (de 1 a 3)**

Fuente: González-Zeas *et al.*, 2019a.

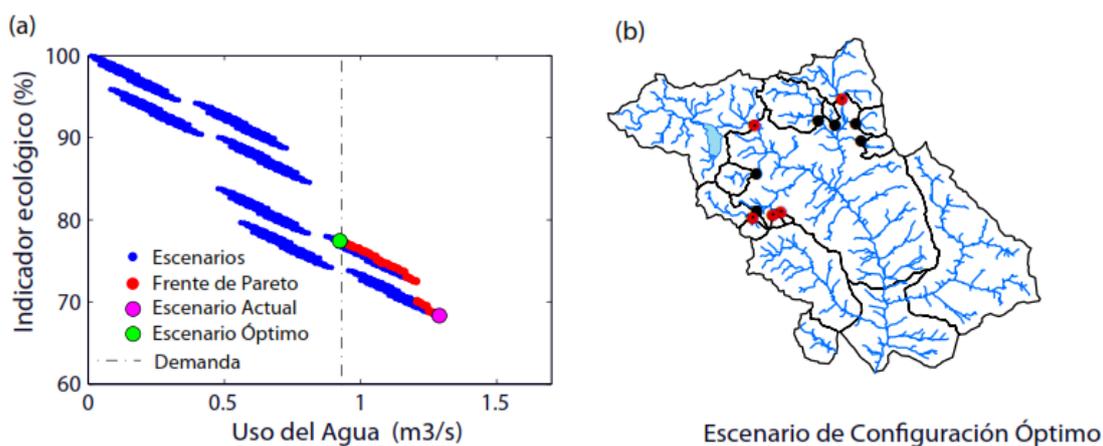


## IV – Modelación: Optimización, gestión adaptativa del agua y nuevas prácticas de manejo

El SIP consiste en una transferencia continental de agua, donde el agua captada por las diferentes estructuras hidráulicas de captación converge en una sola conducción en el túnel Quito, que alimenta a las plantas de tratamiento de Bellavista y Paluguillo para cubrir el 30% de la demanda de agua potable de Quito. En la cuenca del Chalpi, actualmente operan 11 captaciones que conducen el agua por gravedad al túnel, por lo que la herramienta de modelación se centró principalmente en optimizar el sistema a través de la generación de diferentes escenarios, variando el número y ubicación de las captaciones en operación, y midiendo las consecuencias de cada escenario en términos del agua abastecida y el impacto ecológico de los ríos. Se proponen dos tipos de indicadores ecológicos: (1) el cambio en el orden de los ríos aguas abajo de los sitios de captación (por ejemplo, reducción del orden 2 a 1 debido a una extracción total del agua), y (2) la conectividad dentro de la cuenca, es decir, la longitud total de los ríos no desconectados de las partes bajas de las cuencas. Se generaron 2047 posibles escenarios de combinaciones para determinar la “solución de compromiso” entre los indicadores hidrológicos (asociados al caudal disponible para el uso del agua para abastecimiento urbano) y los indicadores ecológicos (minimizar los impactos ecológicos de los ríos). A través del análisis del Frente de Pareto se obtuvo un conjunto de soluciones óptimas, cuyo “óptimo global” genera el mínimo impacto ecológico, a la vez que satisface las necesidades de agua requeridas del sistema (Figura 4).

**Figura 4: Soluciones óptimas del Frente de Pareto. (a) Comparación entre caudal disponible para abastecimiento de agua y los indicadores ecológicos (conectividad). Se muestran los resultados para el caudal promedio anual del periodo 2008-2016). La línea punteada indica la demanda requerida. (b) Los puntos rojos en el mapa asociado de configuración del sistema destacan las captaciones que forman parte del escenario óptimo, los puntos negros las captaciones que están fuera del escenario óptimo.**

Fuente: González-Zeas *et al.*, 2019a.



Los resultados de la optimización destacan que una operación dinámica y óptima de las captaciones que forman parte del SIP, disminuyen los impactos ecológicos en 9.6 puntos porcentuales en conectividad a la vez que se satisface las demandas de agua. Se destaca que en los meses más secos (Agosto a Enero) se requiere un mayor número de captaciones en operación (de 5 a 9) y en los meses más lluviosos como es el caso del mes de Junio, solo se requiere dos captaciones operando para satisfacer el abastecimiento urbano. Esto permite tener un rango de caudales disponibles para lograr un manejo adaptativo (MA) del agua, el cual podría considerarse como una medida de adaptación al cambio climático. También podría utilizarse para la consideración de caudales ecológicos e incluso para hacer frente al aumento de la consumo de agua o el incremento de la población. Como resultado, el MA del agua proporciona una forma de adaptarse a la incertidumbre asociada a los caudales y a la demanda de agua, para lo cual es necesario proponer un nuevo paradigma de gestión en la cuenca de estudio. Para guiar las nuevas adaptaciones de la Empresa se ha desarrollado un Reporte Técnico (IRD, 2019) con las siguientes recomendaciones principales:

- Actualizar el protocolo de operación de las captaciones. El proceso de optimización ha destacado la necesidad de tener una mejor visión de la disponibilidad de recursos con el fin de establecer (i) una optimización del sistema a escala diaria, y (ii) pronóstico de caudales.
- Definir procedimientos a nivel local, así como las necesidades y condiciones de su aplicación. Para esto, la EPMAPS ha iniciado un proceso de coordinación y cooperación conjunta con los diferentes departamentos encargados de la operación del sistema.
- Minimizar los riesgos de errores asociados a los nuevos procedimientos. En este aspecto, gracias a las recomendaciones del proyecto, la EPMAPS ha mejorado su red de monitoreo hidrometeorológico en la cuenca del Chalpi, a través de la instalación de nuevas estaciones de monitoreo con una mejor cobertura espacial y que complementan la red existente.
- Demostrar la validez de estos procedimientos. Esto se debe desarrollar tanto al interior de la empresa como hacia afuera en la interacción con actores locales y regionales vinculados a la gestión del agua.
- Desarrollar nuevos indicadores ecológicos de estado de salud de los ríos. Estos indicadores tienen que ser más operativos y adaptados a las necesidades de la EPMAPS.

## V – Desarrollando una herramienta para el monitoreo de rutina de la calidad del agua

La conectividad de los ríos es un indicador ecológico útil para la implementación de un manejo adaptativo del agua (Figura 4), sin embargo, no es muy perceptible en el campo y no permite una implicación del personal técnico de la EPMAPS para medir las mejoras del estado de salud del ecosistema. En otras palabras, el proyecto tenía que desarrollar otros bioindicadores de la calidad del agua. A través de un consenso entre los criterios científicos y las necesidades e intereses de la EPMAPS, FONAG y la colaboración de las autoridades del Parque Nacional Cayambe-Coca, el proyecto CHALPI-FLOW trabajó en la estandarización de un protocolo simple, económico y rápido, basado en el uso de un fluorómetro portátil (llamado BenthosTorch®) que permite el monitoreo y medición in situ de las algas bénticas, como un indicador de la calidad del agua. El uso del BenthosTorch constituye una innovación tecnológica que se basa en la capacidad de medir de forma extensiva e intensiva la clorofila como indicador de la biomasa de las algas bénticas. A diferencia de los métodos estándares, el BenthosTorch ofrece la oportunidad de responder con prontitud frente al cambio y prevenir así el impacto en la calidad del agua debido a una potencial proliferación de algas (Figura 5).

**Figura 5: Uso del BenthosTorch® para el monitoreo biológico (algas) en los ríos de montaña**  
Fuente: Rosero-López *et al.*, 2020b.



La medición en campo del BenthosTorch tiene mucho potencial para identificar de manera rápida posibles anomalías de calidad de agua, es decir, se puede ser más eficiente en cuanto a la detección temprana de calidad de agua, en especial en cuerpos de agua lóticos importantes para la Empresa, como por ejemplo, los tributarios a los embalses de la EPMAPS. Esta mayor eficacia del monitoreo permite focalizar y complementar los esfuerzos de los análisis de laboratorio y permite tener una base de datos confiable para entender la dinámica eco-hidrológica de los cuerpos de agua en el mediano y largo plazo.

Cabe destacar el rol fundamental de las autoridades del Parque Nacional Cayambe-Coca en el desarrollo del protocolo para lograr la estandarización a través del control y vigilancia del buen estado de las fuentes de agua y el apoyo logístico para acceder a los sitios de monitoreo (ver Rosero-López *et al.* 2020b para más detalles sobre esta metodología).

## **VI – Manipulación experimental de caudales para definir caudales ecológicos**

En el marco conceptual de la Figura 3, se consideran las captaciones de agua solamente en dos estatus: o captan toda el agua o no captan nada. Sin embargo, dentro de un plan de manejo adaptativo se podría considerar captaciones que captan un caudal intermedio que permita conservar un estado ecológico saludable río abajo. El concepto de “caudales ecológicos” (QE) surgió como un concepto de gestión para establecer la cantidad de agua necesaria para equilibrar las necesidades ecológicas y humanas (Poff, 2018). En Ecuador, la incorporación del concepto de régimen de QE existe a nivel de legislación (MAE, 2007), donde la norma establece “que se puede aplicar como mínimo el concepto del 10% del caudal medio anual para restaurar el flujo en los sectores del río afectados por la captación de agua”. No obstante, la normativa solo regula a la generación hidroeléctrica y no se aplica para los usos de riego y consumo humano. En la normativa vigente, la ausencia de procedimientos claros para la definición de QE ha dado paso a la adopción del criterio del 10%, lo cual supone una limitada consideración de aspectos eco-hidrológicos relacionados con las condiciones y las características de los cuerpos de agua intervenidos.

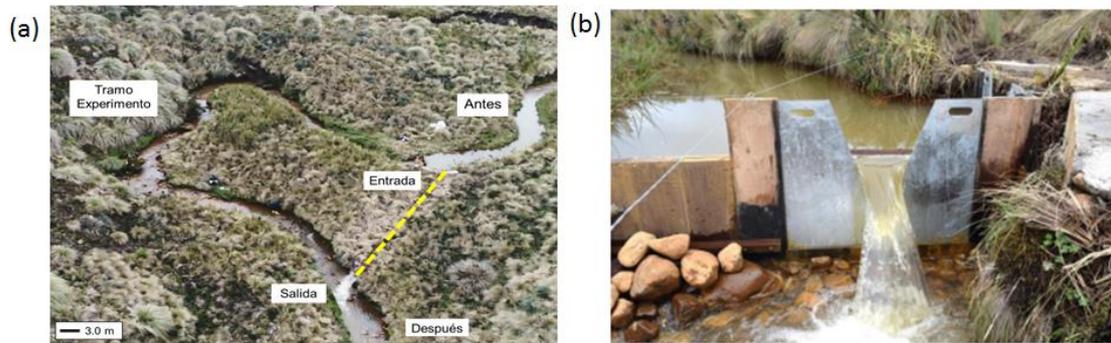
Es así que surge la necesidad de tener un mejor conocimiento de los límites de los ríos captados por la EPMAPS (ejm. umbrales de cambio en cantidad de algas) y de esta manera poder identificar las relaciones entre los bioindicadores y el caudal (Rosenfeld, 2017). La determinación de QE en función de los umbrales de cambio es crucial para su implementación, ya que las respuestas no lineales dificultan la interpretación, así como nuestra capacidad para captar toda la variabilidad natural de las relaciones. Por tanto, los QE asociados a estos umbrales de cambio constituyen una estrategia de manejo adaptativo para la infraestructura de agua (ejm. presas, captaciones, y derivaciones) con el fin de reducir el impacto sobre los hidrosistemas y aportar a la conservación de la biodiversidad y las funciones del ecosistema (Arthington *et al.*, 2018). En este contexto, CHALPI-FLOW desarrolló un procedimiento práctico-experimental, nunca implementado y pionero en cuencas de los Andes tropicales, para identificar los umbrales de cambio mediante el uso de bioindicadores de calidad del agua (ej., algas bénticas). El experimento consiste en la manipulación controlada del caudal de un río para evaluar las consecuencias ecológicas de la alteración del régimen hidrológico como consecuencia de la captación de agua. Con esto se busca simular a detalle la operación de las captaciones y los efectos en los ecosistemas acuáticos.

La experimentación se llevó a cabo en un tramo del río Chalpi Norte, ubicado en la cabecera de la cuenca del Chalpi, (Figura 6a), donde se implementó una estructura de derivación de caudales que consiste en un sistema compuesto por dos vertederos tipo v-notch (Figura 6b). El sistema fue diseñado para derivar de forma proporcional los caudales del río (por ejemplo, 10% por el río y 90% por el canal de derivación). Esta es una de las primeras

estructuras eco-hidráulicas diseñadas y probadas en el laboratorio de hidráulica de la Universidad de Cornell para manipular experimentalmente caudales ecológicos en ríos pequeños de montaña.

**Figura 6: (a) Imagen tomada por un dron del tramo experimental del río. (b) Estructura experimental de derivación de caudales compuesta por un sistema de dos vertederos tipo v-notch, combinados con diferentes ángulos de apertura que operan simultáneamente en el río y en el canal lateral.**

Fuente: Rosero-López *et al.*, 2020a.



A nivel hidrológico, la reducción experimental de los caudales mostró influencia en la distribución de las velocidades a lo largo del tramo experimental (Figura 7b). A nivel ecohidrológico, los resultados del proceso de reducción y restitución experimental de caudales (Figura 7b) destacan que la biomasa de las algas bénticas tiene un comportamiento dinámico que se puede asociar a las variaciones de caudal promedio observado antes y después de las captaciones. Se evidencia un aumento significativo generalizado de la concentración de biomasa de algas bénticas en respuesta a caudales estables y bajos, por la proliferación de nuevos hábitats para colonizar. A diferencia de una reducción de la biomasa de algas bénticas cuando existen crecidas puntuales que despegan las alfombras de algas y limpian los sustratos. Los caudales mínimos y estables aguas abajo de las captaciones favorecen el crecimiento de algas que predominan la mayor parte del tiempo. Para la biomasa de algas se detectó dos umbrales principales: (1) las algas aumentan con una reducción del caudal medio diario del 50 - 60% y (2) la biomasa regresa a las condiciones de línea base con una recuperación de caudal de aproximadamente el 60%. La proliferación de algas bénticas en conjunto y de los grupos de diatomeas, cianobacterias y algas verdes en los ríos puede verse alterada por los cambios de caudal y favorecer la dominancia de ciertos grupos sobre otros, como las cianobacterias que amenazan la calidad del agua de los lagos y embalses aguas abajo. La proliferación de algas bénticas afecta diferentes fuentes de abastecimiento de agua, por tanto, los hallazgos obtenidos tienen importantes implicaciones en la gestión del agua:

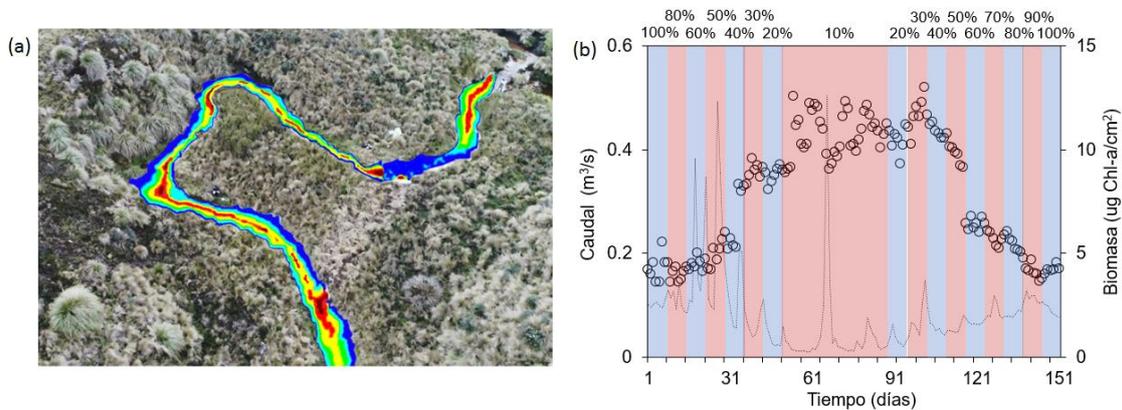
- Ayudar en la definición de un caudal ecológico. La manipulación de caudales evidencia el impacto en la comunidad de algas bénticas. La reducción de caudales > 60% del promedio mensual está relacionada con la proliferación de algas bénticas que a su vez indica un desequilibrio en el ecosistema. Cuando las algas proliferan existe una mayor probabilidad de dominancia de grupos tóxicos de cianobacterias que podría reducir la calidad del agua. Para mantener las condiciones cercanas a las condiciones naturales es necesario restituir al sistema un 40% del caudal medio mensual como medida de manejo de las captaciones. Cabe mencionar que este umbral mínimo de 40% del caudal promedio mensual, definido a partir de

experimentaciones necesariamente limitadas espacialmente y temporalmente, fue comprobado con un estudio más amplio a nivel de la cuenca del río Chalpi (1450 puntos de medidas caudal-algas durante dos años, Rosero-López *et al.* sometido).

- Identificar de forma rápida posibles alteraciones en la calidad del agua al superar un determinado umbral de concentración de cianobacterias.
- Como se presenta en el Figura 7, en el tramo experimental se observa un regreso a condiciones naturales que permiten sugerir una resiliencia del sistema frente a cambios puntuales, que pueden ser mucho más largos de acuerdo con el ecosistema (Rosero-López *et al.* 2020a).

**Figura 7: (a) Simulación de velocidades en el tramo experimental para un caudal instantáneo reducido al 50% del caudal natural del río Chalpi Norte, mediante una estructura de derivación en vertederos complementarios para manipular caudales de forma experimental (Rosero-López *et al.*, 2020a.) (b) Respuesta de la biomasa de algas a la manipulación experimental de caudales (franjas azules y rojas), que indica el % de caudal reducido en el tramo experimental, hasta alcanzar una reducción del 90% que se mantiene por 35 días, a continuación, se restituye hasta condiciones naturales (el río referencia no presenta dichas alteraciones, ver Rosero-López *et al.*, 2020a). Un estudio adicional mostró que la zona de acumulación de agua a nivel de la derivación experimental (zona azul) no generó ninguna producción adicional de algas (Rosero-López *et al.* sometido).**

Fuente: Rosero-López *et al.*, 2020a.

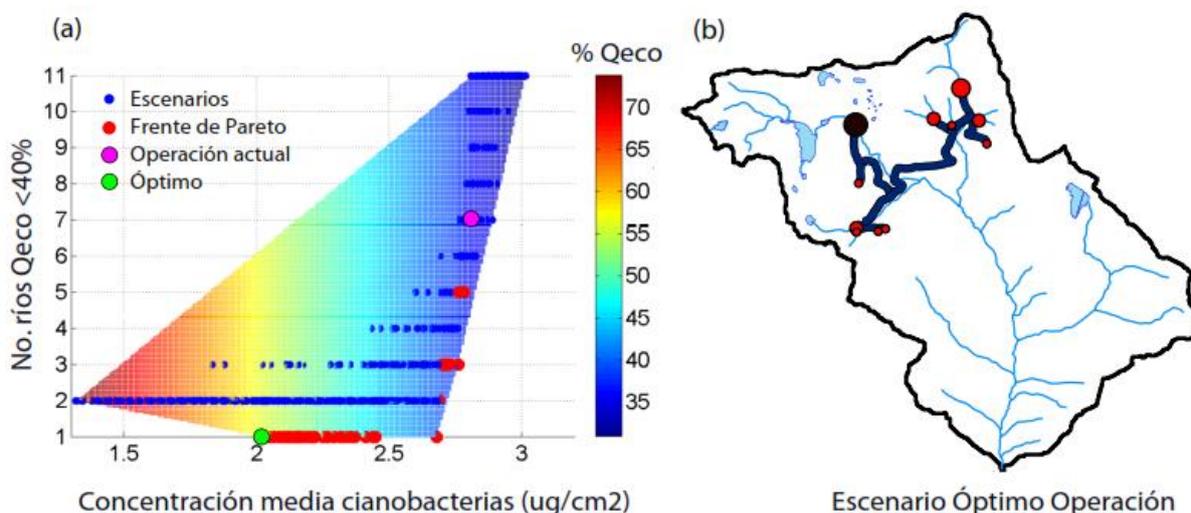


## VII – Modelo hidro-climato-ecológico

Finalmente, el proyecto CHALPI-FLOW plantea un modelo que integra la optimización de la operación del sistema (caudal derivado por cada captación) con el indicador del estado de salud del ecosistema, dado por la concentración de algas (cianobacterias) como indicador de la calidad del agua. Se generaron 1000 posibles escenarios de captación de agua que minimizan la biomasa de cianobacterias (promedio de las 11 captaciones) y satisfacen la restricción de la demanda histórica (0.9 m<sup>3</sup>/s). A través del análisis del Frente de Pareto se seleccionó el escenario que minimiza el número de ríos impactados (captaciones con un caudal ecológico (Qeco) menor al 40% del caudal promedio mensual; cabe mencionar que el valor de caudal mas bajo en epoca seca de los ríos de paramo en esta zone es alrededor del 60% del promedio mensual) y minimizan la concentración media de cianobacterias. Los resultados a escala anual destacan que una operación óptima del sistema permitiría dejar un caudal ecológico mayor al 40% en 10 de las 11 captaciones del Chalpi, a diferencia de lo que ocurren en la operación actual del sistema, donde el número de ríos impactados es de 7 (Figura 8). Por otra parte, la optimización a escala mensual destaca que en los meses secos (Agosto a Enero) el número de ríos impactados varía de 2 a 4, siendo el mes de Octubre, el de mayor impacto, a diferencia de lo que ocurre con la operación actual, donde el número de ríos impactados varía de 7 a 8 en la época seca. Durante el mes más lluvioso del año (Junio) se observa que tanto en la optimización como en la situación actual de operación, el número de ríos impactados es cero, es decir, que todas las captaciones podrían operar dejando un caudal ecológico mayor al 40%.

**Figura 8: (a) Óptimos del Frente de Pareto que minimizan el número de captaciones en operación con un caudal ecológico menor al 40% del caudal mensual y minimizan la concentración media de biomasa de cianobacterias, a la vez que satisfacen la restricción de la demanda. (b) Los puntos rojos en el mapa asociado de configuración óptima de operación del sistema destacan las captaciones que restituyen al sistema un caudal mayor al 40% y el punto negro indica la captación que no cumple con el umbral de calidad de agua, dejando un caudal ecológico menor al 40%.**

Fuente: González-Zeas *et al.*, 2020.



## **VIII – Alcances y retos para el futuro**

El proyecto CHALPI-FLOW presenta un enfoque integrador para el desarrollo de soluciones para una gestión sostenible y adaptativa de los recursos hídricos de los páramos de Quito. Sin duda, el estrecho vínculo de colaboración y trabajo directo y coordinado con EPMAPS y FONAG, ha permitido la identificación y construcción conjunta de indicadores relevantes para la toma de decisiones en la gestión de los recursos hídricos. Por otra parte, la falta de disponibilidad de recursos hídricos para el abastecimiento urbano repercute en el acceso seguro al agua, por lo que las autoridades y partes interesadas tienen que lidiar permanentemente con la variabilidad y la incertidumbre asociada al cambio climático.

En este contexto, el proyecto CHALPI-FLOW evaluó las limitaciones y perspectivas de las simulaciones de los modelos climáticos regionales a escala de cuenca hidrográfica, que comúnmente utilizan las empresas de agua en la planificación de sus estrategias futuras (González-Zeas *et al.*, 2019b). Los resultados de las simulaciones en la cuenca del Chalpi destacan que los modelos climáticos tienden a sobreestimar la precipitación en un 200% y la temperatura en 10°C. Además se observan fuertes discrepancias estacionales en los patrones de precipitación, con una inversión completa en la estacionalidad. Por lo tanto, el uso de estos modelos en la zona de los Andes tropicales debe realizarse con extrema precaución por parte de los gestores del agua, al momento de la toma de decisiones, planificación y gestión de los recursos hídricos.

Finalmente, el proyecto fomenta una optimización del uso del agua y promueve la difusión y aplicación de herramientas de monitoreo enfocadas en la minimización de los impactos ecológicos, contribuyendo a logro de los objetivos de desarrollo sostenible. Este trabajo constituye un precedente en el uso de metodologías de inteligencia artificial (optimización con Frente de Pareto) que pueden ser aplicadas por los operadores de agua como soluciones innovadoras para optimizar el abastecimiento de agua en las ciudades. Además, es importante mencionar la posibilidad de escalar la optimización a nivel de todo el SIP y los demás sistemas de abastecimiento de agua de Quito, así como la posibilidad de replicar el proyecto en otras cuencas similares de los Andes, donde las ciudades dependen del agua de los páramos (ej. Cuenca, Medellín, Arequipa) y la posibilidad de desarrollar un proyecto en un ámbito más regional.

## **Puntos clave: Soluciones concretas para la Empresa de Agua**

- Propuesta y calibración de un indicador de seguimiento biológico de las algas asociado a la calidad del agua, de fácil y rápido monitoreo in-situ, a través del uso del BenthosTorch.
- Reporte técnico con una propuesta de un plan para la optimización de la gestión adaptativa del agua en cuencas de páramo, fuentes de abastecimiento del sistema de agua de Quito. En este contexto, EPMAPS está reuniendo esfuerzos para escalar el proceso de optimización propuesto a paso temporal diario y a escala de todo el SIP, de tal manera que se pueda contar con un protocolo de optimización que integre los diferentes componentes que forman parte de la operación del sistema (pronóstico de caudales, optimización de la operación de embalses, optimización de la operación de las captaciones).
- Cooperación en la revisión y validación de la base de datos hidrometeorológica de la empresa de agua.
- Ajustes realizados al diseño de la red de monitoreo hidroclimático en la cuenca del Chalpi, los cuales ya fueron implementados por la EPMAPS para disponer de una adecuada cobertura espacial de la red.
- Posibilidad de aplicación de herramientas de inteligencia artificial que ayuden a la toma de decisiones y al mejoramiento de la eficiencia en la gestión y operación del sistema de abastecimiento de agua.

# Referencias bibliográficas

**ARTINGTON, A. H., J. G. KENNEN, E. D. STEIN AND J. A. WEBB (2018)**

*Recent advances in environmental flows science and water management. Innovation in the Anthropocene.* Freshwater Biology.

<https://doi.org/10.1111/fwb.13108>

**CAUVY-FRAUNIÉ, S., P. ANDINO, R. ESPINOSA, R. CALVEZ, D. JACOBSEN AND O. DANGLES (2016)**

*Ecological responses to experimental glacier-runoff reduction in alpine rivers.* Nature Communications, 7, 12025.

<https://doi.org/10.1038/incomms12025>

**FINER, M. AND C. N. JENKINS (2012)**

*Proliferation of hydroelectric dams in the Andean Amazon and implications for Andes-Amazon connectivity.* PloS ONE, 7(4), E35126.

**GONZÁLEZ-ZEAS, D., D. ROSERO-LÓPEZ, T. WALTER, A. FLECKER, P. LLORET, B. DE BIÈVRE, T. CONDOM, R. OSORIO AND O. DANGLES (2019A)**

*Designing Eco-Friendly Water Intake Portfolios in a Tropical Andean Stream Network.* Water Resources Research, 55.

<https://doi.org/10.1029/2019WR025190>

**GONZÁLEZ-ZEAS, D., B. ERAZO, P. LLORET, B. DE BIÈVRE, S. STEINSCHNEIDER AND O. DANGLES (2019B)**

*Liking global climate change to local water availability: Limitations and prospects for a tropical mountain watershed.* Science of the Total Environment, 650, 2577-2586.

**GONZÁLEZ-ZEAS, D., D. ROSERO-LÓPEZ, R. OSORIO, B. DE BIÈVRE AND O. DANGLES (2020)**

*Modelling water provisioning under tipping points, in preparation.*

**GUPPY, L., P. MEHTA AND M. QADIR (2019)**

*Sustainable development goal 6: Two gaps in the race for indicators.* Sustainability Science, 14(2), 501-513.

**HAZEN AND SAWYER (2011)**

*Estudios de Actualización del Plan Maestro Integrado de Agua Potable y Alcantarillado para el DMQ.*

**HERMOSO, V. (2017)**

*Freshwater ecosystem could become the biggest losers of the Paris Agreement.* Global Change Biology, 23, 3433-3436.

**HERRERA, V. (2019)**

*Reconciling global aspirations and local realities: Challenges facing the Sustainable Development Goals for water and sanitation.* World Development, 118, 106-117.

**IRD (2019)**

*Plan para la optimización de la gestión adaptativa del agua en cuencas de páramo. Proyecto CHALPI-FLOW, Desarrollando soluciones para el manejo del recurso hídrico en los páramos de Quito.*

**JACOBSEN, D. AND O. DANGLES (2017)**

*Ecology of high altitude waters.* Oxford University Press, 284 p.

**LIU, Y., H. GUPTA, E. SPRINGER AND T. WAGENER (2008)**

*Linking science with environmental decision making: Experiences from an integrated modeling approach to supporting sustainable water resources management.* Environmental Modelling & Software, 23, 846-858.

**MAE (2007)**

Registro Oficial # 41 del 14.03.2007 del Acuerdo Ministerial 155. Anexo 1B. *Norma para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental del Recurso Agua de Centrales Hidroeléctricas.*

**MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT, MEA (2005)**

*Ecosystem and human well-being: Synthesis.* Washington, DC: Island Press.

**NU.CEPAL (2019)**

*La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe.* Objetivos, metas e indicadores mundiales, 93 p.

**POFF, N. L. (2018)**

*Beyond the natural flow regime? Broadening the hydro-ecological foundation to meet environmental flows challenges in a non-stationary world.* *Freshwater Biology*, 63(8), 1011-1021.

**ROSERO-LÓPEZ, D., M. T. WALTER, A. S. FLECKER, P. LLORET,**

**B. DE BIÈVRE, D. GONZÁLEZ-ZEAS, R. CALVE AND O. DANGLES (2019)**

*Streamlined eco-engineering approach helps define environmental flows for tropical Andean headwaters.* *Freshwater Biology*  
<https://doi.org/10.1111/fwb.13307>.

**ROSERO-LÓPEZ, D., T. WALTER, B. DE BIÈVRE, D. GONZÁLEZ-ZEAS, A. FLECKER, R. OSORIO AND O. DANGLES (2020A)**

*Design of a paired-weir system for experimental manipulation of environmental flows in streams.* *Journal of Ecohydraulics*,  
<https://doi.org/10.1080/24705357.2020.1830002>

**ROSERO-LÓPEZ, D., T. WALTER, B. DE BIÈVRE, D. GONZÁLEZ-ZEAS, A. FLECKER, R. OSORIO AND O. DANGLES (2020B)**

*Standardization of instantaneous fluoroprobe measurements of benthic algal biomass and composition in streams.* *Ecological Indicators*, in press.

**ROSERO-LÓPEZ, D., J. KNIGHTON, P. LLORET AND A. C. ENCALADA (2020c)**

*Invertebrate response to impacts of water diversion and flow regulation in high-altitude tropical streams.* *River Research and Applications*, 36(2), 223-233.

**ROSENFELD, J. S. (2017)**

*Developing flow-ecology relationships: Implications of nonlinear biological responses for water management.* *Freshwater Biology*, 62(8), 1305-1324.

**SHUTERLAND, W. J., M. P. DIAS, L. V. DICKS, H. DORAN ET AL. (2020)**

*A Horizon Scan of Emerging Global Biological Conservation Issues for 2020.* *Trends in Ecology & Evolution*, 35(1), 81-90.

**SCHMITT, R. J. P., S. BIZZI, A. CASTELLETTI AND G. M. KONDOLF (2018)**

*Improved trade-offs of hydropower and sand connectivity by strategic dam planning in the Mekong.* *Nature Sustainability*, 1, 96-10



### ¿Qué es AFD?

El grupo Agence Française de Développement (AFD) lleva a la práctica la política de Francia en materia de desarrollo y de solidaridad internacional. Formado por la AFD, a cargo del financiamiento del sector público y de las ONG, de PROPARCO, enfocada en el financiamiento del sector privado, y próximamente de Expertise France, agencia de cooperación técnica, financia, ayuda e impulsa las transiciones hacia un mundo más coherente y resiliente.

Junto con nuestros socios elaboramos soluciones compartidas, a las cuales contribuyen las poblaciones destinatarias de los países emergentes y en desarrollo. Nuestros equipos trabajan en más de 4 000 proyectos locales en 115 países, en los territorios de Ultramar franceses así como en territorios en crisis, en beneficio de los bienes comunes –el clima, la biodiversidad, la paz, la igualdad de género, la educación o bien la salud. De esta manera contribuimos al compromiso de Francia y de los franceses para cumplir con los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Por un mundo en común.

**Publication Director** Rémy Rioux  
**Editor-in-Chief** Thomas Melonio

**Legal deposit** 1<sup>st</sup> quarter 2021  
**ISSN** 2492 - 2846

### Rights and permissions

Creative Commons license

Attribution - No commercialization - No modification

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>



**Graphic design** MeMo, Juliegilles, D. Cazeils  
**Layout** Denise Perrin, AFD  
**Printed by** the AFD reprography service

To browse our publications:

<https://www.afd.fr/en/ressources-accueil>