

Water management based on coastal fog (Kamanchaka) in a protective forest on a university campus

Paúl Carrión-Mero^{1,2} ; Edmundo Aguilar³ ; Maribel Aguilar-Aguilar^{1,2,4} ; Emily Sánchez^{2,4} ; Sebastián Suárez-Zamora^{1,2} ; Joselyne Solórzano^{1,2} ; Fernando Morante-Carballo^{1,5,6} 

¹ Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra (FICT), ESPOL Polytechnic University, ESPOL, Guayaquil 090902, Ecuador, pcarrion@espol.edu.ec, maesagui@espol.edu.ec, sebasuar@espol.edu.ec, josbasol@espol.edu.ec

² Centro de Investigación y Proyectos Aplicados a las Ciencias de la Tierra (CIPAT), ESPOL Polytechnic University, ESPOL, Guayaquil 090902, Ecuador, emnisanc@espol.edu.ec, fmorante@espol.edu.ec

³ Investigador independiente, Guayaquil, Ecuador, edmundoaquilarnavarro@gmail.com

⁴ Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción (FIMCP), ESPOL Polytechnic University, ESPOL, Guayaquil 090902, Ecuador

⁵ Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas (FCNM), ESPOL Polytechnic University, ESPOL, Guayaquil 090902, Ecuador

⁶ Geo-Recursos y Aplicaciones (GIGA), Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Campus Gustavo Galindo, Km. 30.5 Vía Perimetral, Guayaquil, 090902, Ecuador.

Abstract– Water management at a global level presents a challenge due to high demand driven by population growth and the effects of climate change. In arid to semi-arid zones with seasonal rainfall, the use of Nature-based Solutions (NbS) is common, drawing on ancestral knowledge. In areas dominated by dry forests and high humidity, meteorological phenomena such as coastal fog (kamanchaka), which result from the interaction of ocean currents, temperature, and topography, help maintain equilibrium and provide water for the survival of flora and fauna. In this context, this study aims to contextualize the role of the kamanchaka meteorological phenomenon by integrating analyses of geodiversity and biodiversity, as well as its potential as an alternative water resource, to define a water management strategy across the five subsystems of sustainability and innovation. The research was structured in three phases: i) geographical and geological characterization, ii) water management using Nature-based Solutions (NbS), and iii) a SWOT (Strengths, Weaknesses, Opportunities, and Threats) analysis for developing sustainable water management strategies. The results show the potential of the kamanchaka (a type of fog-harvesting system) for integration as an NbS that promotes the conservation of the protected ecosystem and the campus's water resilience. The participatory analysis suggests implementing fog harvesting as an unconventional water source that needs to be integrated into institutional management plans and the continuous learning environment, which serves as a demonstration site for ecohydrology. This study represents a replicable NbS model for coastal areas with similar conditions.

Keywords– hydrology, NbS, water resilience, meteorological phenomenon, coastal zone, university

Gestión hídrica basada en niebla costera (Kamanchaka) en un bosque protector de un campus universitario

Paúl Carrión-Mero^{1,2} ; Edmundo Aguilar³ ; Maribel Aguilar-Aguilar^{1,2,4} ; Emily Sánchez^{2,4} ; Sebastián Suárez-Zamora^{1,2} ; Joselyne Solórzano^{1,2} ; Fernando Morante-Carballo^{1,5,6} 

¹ Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra (FICT), ESPOL Polytechnic University, ESPOL, Guayaquil 090902, Ecuador, pccarrion@espol.edu.ec, maesagui@espol.edu.ec, sebasuar@espol.edu.ec, josbasol@espol.edu.ec

² Centro de Investigación y Proyectos Aplicados a las Ciencias de la Tierra (CIPAT), ESPOL Polytechnic University, ESPOL, Guayaquil 090902, Ecuador, emnisanc@espol.edu.ec, fmorante@espol.edu.ec

³ Investigador independiente, Guayaquil, Ecuador, edmundoaquilarnavarro@gmail.com

⁴ Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción (FIMCP), ESPOL Polytechnic University, ESPOL, Guayaquil 090902, Ecuador

⁵ Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas (FCNM), ESPOL Polytechnic University, ESPOL, Guayaquil 090902, Ecuador

⁶ Geo-Recursos y Aplicaciones (GIGA), Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Campus Gustavo Galindo, Km. 30.5 Vía Perimetral, Guayaquil, 090902, Ecuador.

Resumen— La gestión hídrica a nivel global representa un desafío, debido a la alta demanda por crecimiento poblacional y a los efectos del cambio climático. En zonas áridas a semiáridas con precipitaciones estacionales es común el empleo de Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN) como parte del conocimiento ancestral. En zonas donde predominan bosques secos y altos índices de humedad, los fenómenos meteorológicos como la neblina costera (kamanchaka) asociada a la interacción entre corrientes marinas, temperatura y topografía, permite mantener el equilibrio y aportar con agua para la vida de la flora y fauna. En este contexto, este estudio tiene como objetivo contextualizar el rol del fenómeno meteorológico kamanchaka mediante la integración de un análisis de la geodiversidad y biodiversidad, así como su potencial como fuente alternativa de recurso hídrico, para la definición de un plan de estrategias de gestión de agua en los cinco subsistemas de la sostenibilidad e innovación. La investigación se estructuró en tres fases: i) caracterización geográfica y geológica, ii) gestión hídrica mediante SbN, y iii) análisis de Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas (FODA) para el planteamiento de estrategias de gestión hídrica sostenible. Los resultados muestran el potencial de la kamanchaka para su integración como SbN que favorece la conservación del ecosistema protegido y la resiliencia hídrica del campus. El análisis participativo sugiere la implementación de la captación de niebla como fuente hídrica no convencional que requiere integrarse a los planes de gestión institucionales y al entorno de aprendizaje continuo, que funciona como sitio demostrativo de ecohidrología. Este estudio representa un modelo replicable de SbN en zonas costeras con condiciones similares.

Palabras clave— hidrología, SbN, resiliencia hídrica, fenómeno meteorológico, zona costera, universidad

I. INTRODUCCIÓN

El ciclo hidrológico del agua es el responsable de asegurar la circulación continua del agua entre la tierra, atmósfera, océanos y los seres vivos [1]. Por tanto, el equilibrio de los ecosistemas y el desarrollo de la vida depende de la disponibilidad hídrica en la tierra, de ahí la importancia de

estudiar los fenómenos meteorológicos que contribuyen a la disponibilidad de agua en la superficie terrestre. Las precipitaciones son la fuente principal de aporte de agua para ríos y sistemas subterráneos, así como ecosistemas terrestres y acuáticos [2]. Sin embargo, los patrones de lluvia se condicionan de acuerdo con la ubicación geográfica y especialmente por la interacción entre la temperatura y humedad atmosférica [3]. En este sentido se ha registrado que entre 1960 y 2023 el 27,9% de la superficie terrestre global se volvió significativamente más árida [4]. Esto implica una reconfiguración en la disponibilidad de agua mundial, asociado también a cambios en el uso de suelo, sobrepastoreo, expansión urbana, desarrollo industrial y aumento de consumo de agua, especialmente en zonas costeras donde la presión turística aumenta el estrés hídrico [5], [6].

En ambientes costeros, se han registrado fenómenos meteorológicos asociado a la formación de espesos bancos nubosos que se originan cuando el océano Pacífico toca la superficie terrestre, producto de las relaciones entre corrientes marinas y factores como viento, calor y alta evaporación de agua en la costa [7]. Un ejemplo de esto se evidencia en zonas desérticas de Chile, tal como el desierto de Atacama, donde se han identificado oasis de niebla, que permite el desarrollo de la vegetación [8]. Así mismo, el fenómeno ocurre en Perú, donde esta niebla costera ha permitido el desarrollo de ecosistemas particulares. Por tanto, comprender los fenómenos costeros dominados por niebla en Sudamérica es fundamental, ya que dan paso a sistemas ecológicos, especialmente en contextos donde las precipitaciones anuales son escasas [9], [10].

Comprender los climas costeros dominados por niebla en Sudamérica es fundamental, ya que en Perú y el norte de Chile se desarrollan ecosistemas de gran biodiversidad conocidos como lomas u oasis de niebla. Estos sistemas ecológicos

presentan una alta vulnerabilidad ambiental, debido a la sensibilidad de sus especies y a su fuerte dependencia de la humedad proveniente de la niebla, especialmente en contextos donde las precipitaciones anuales son escasas [11]. Los ecosistemas asociados a la kamanchaka en las costas desérticas de Perú y Chile se manifiestan como “islas” de vegetación endémica en medio de desiertos extremadamente secos. También se han identificado especies en ciertas colinas muy específicas (p. ej., *Caesalpinia spinosa*, *Myrcianthes ferreyrae*) [12]. Además de su importancia biológica, estos ecosistemas proveen servicios ambientales cruciales tales como captura de carbono, regulación hídrica y conservación de recursos genéticos de plantas silvestres que pueden ser valiosos para la seguridad alimentaria futura [13].

En Ecuador, en la provincia de Guayas en el cantón Guayaquil ubicado en la cercanía del Cerro Azul y Cerro Blanco se encuentra el campus universitario Gustavo Galindo, que cuenta con una importante área ecosistémica conocida como Bosque y Vegetación Protector Prosperina. Este bosque de vegetación predominantemente seca constituye una de las reservas en donde se ha podido avistar la neblina que emerge desde el océano hasta llegar a la Cordillera Chongón Colonche. Este fenómeno ha sido registrado durante las primeras horas del día y su impacto se ve reflejado en la vegetación. Aunque en el sector no se ha realizado una cuantificación y caracterización de este fenómeno, es imprescindible ya que guarda una fuerte correlación con el ecosistema del Bosque Protector y las fuentes hídricas del

campus. En este contexto se plantea la siguiente pregunta de investigación ¿Cómo el fenómeno meteorológico kamanchaka contribuye a la gestión hídrica del campus universitario y el equilibrio del ecosistema del Bosque y Vegetación Protector Prosperina? Para ello la investigación se plantea el objetivo de contextualizar el rol del fenómeno meteorológico kamanchaka mediante la integración de un análisis de la geodiversidad y biodiversidad, así como su potencial como fuente alternativa de recurso hídrico, para la definición de un plan de estrategias de gestión de agua en los cinco subsistemas de la sostenibilidad e innovación en el Campus Universitario Gustavo Galindo de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL).

A. Zona de estudio

El área de análisis se encuentra ubicada en la zona costera del Ecuador, en la Provincia del Guayas en la ciudad de Guayaquil. Las temperaturas en el sector varían entre 25° a 30°C, con precipitaciones promedios de 800-1000 mm. La zona comprende un campus universitario de 658 ha, con áreas para el desarrollo académico, una Zona Especial de Desarrollo Económico del Litoral (ZEDE) de 200 ha, donde se asientan empresas privadas para el desarrollo de sus actividades [14]. Además, dentro del campus se encuentra un área protegida correspondiente al Bosque Protector Prosperina con 58.64 ha (Fig. 1). Geomorfológicamente el sector presenta sectores colinados y vertientes naturales, con vegetación predominante de bosque seco.

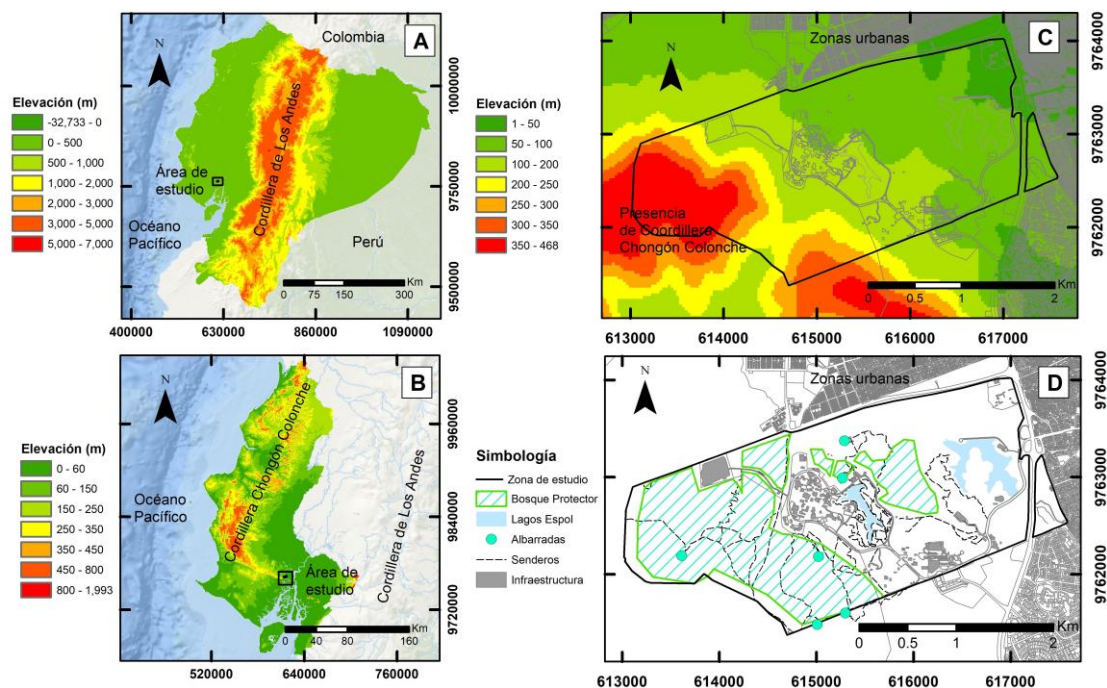


Fig. 1 Mapa de ubicación de la zona de estudio.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Esta investigación plantea un enfoque metodológico integral, que considera características geográficas, geológicas y biológicas de un ecosistema protegido, considerando su gestión sostenible para preservar los servicios ecosistémicos, considerando clave la comprensión del fenómeno costero kamanchaka y sus implicaciones en la gestión sostenible del recurso hídrico en un bosque protector ubicado en un campus universitario. La investigación se estructura en tres fases complementarias que incluyen: i) caracterización geográfica y geológica, ii) gestión hídrica mediante SbN, y iii) estrategias de gestión hídrica sostenible (Fig. 2).

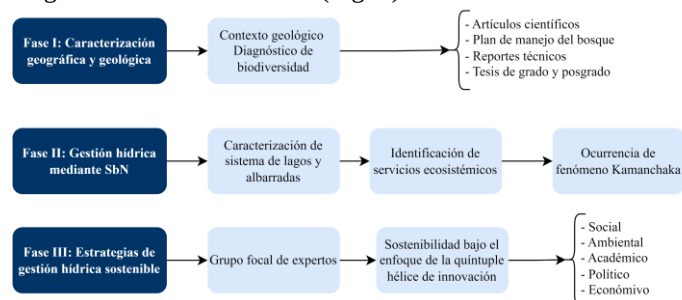


Fig. 2 Esquema metodológico general del estudio.

A. Fase I: Caracterización geográfica y geológica

La primera fase consistió en un análisis cualitativo-descriptivo de la geología y biodiversidad del área de estudio basado en información bibliográfica disponible. Este análisis con el objetivo de comprender las condiciones físico-territoriales que favorecen la formación de la niebla costera y las especies de flora y fauna principales que habitan el bosque protector del campus estudiado. Esta fase integró datos cartográficos, herramientas de sistemas de información geográfica (SIG) y datos reportados principalmente en artículos científicos, tesis y reportes técnicos.

B. Fase II: Gestión hídrica mediante SbN

La segunda fase abordó la gestión del agua actual del campus, exponiendo las SbN existentes, sus beneficios y desafíos registrados, a través de un diagnóstico de las fuentes de agua y sistemas de almacenamiento existentes. Adicionalmente, se analizó el fenómeno atmosférico de la kamanchaka como aporte hídrico no convencional. Este análisis permitió reconocer la importancia de la niebla costera en el sistema socioecológico del campus y su potencial para la implementación de SbN.

C. Fase III: Estrategias de gestión hídrica sostenibles

La tercera fase comprendió un análisis participativo del potencial de la kamanchaka en un campus universitario a través de un análisis de Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas (FODA) [15], [16], [17] aplicado a un grupo focal de expertos. A partir de la matriz de aspectos internos y externos, se formularon líneas de acción orientadas a la articulación del conocimiento científico, gestión

institucional, dimensión ambiental, participación social y sector económico, en concordancia con el modelo de innovación de quintuple hélice [18], [19]. Esto permitió estructurar un plan estratégico para la gestión hídrica del campus como un laboratorio vivo de innovación ambiental en entornos costeros.

III. RESULTADOS

A. Características geográficas, geológicas y biológicas

Geográficamente el sector de estudio se encuentra influenciado por los tres macro-dominios geológicos que describe Benítez [20] con sus distintas características geomorfológicas, de las cuales la que se encuentra asociada al fenómeno de la kamanchaka es la Cordillera Chongón Colonche. Esta se desarrolla desde los cerros de Barrio San Pedro y la ciudadela Bellavista, esta estructura posee un rumbo de N110°, y su marco geológico corresponde a las rocas de las formaciones San Eduardo, Guayaquil, Cayo y Piñón [20].

Geológicamente en el contexto regional en Guayaquil afloran cuatro formaciones que han sido caracterizadas como sedimentarias y volcano-sedimentarias. La **Tabla 1** resume la litología que aflora en la ciudad de Guayaquil, donde predominan materiales correspondientes a la Cordillera Chongón Colonche y sedimentos que han sido retrabajados por procesos erosivos que se correlacionan con la actividad geológica de la costa ecuatoriana [21]. También se presentan emplazamientos de rocas graníticas-granodioritas [22].

TABLA I
CONTEXTO GEOLÓGICO DE LA ZONA DE ESTUDIO.

Formación*	Litología
Fm. San Eduardo (Eo) [23]	Corresponde a un flysch turbidítico calcáreo depositado en los bordes de la cordillera Chongón-Colonche. Su en litología está compuesta por calizas bioclásticas, calizas microcristalinas bien estratificadas de color gris claro a crema.
Fm. Guayaquil (K) [20]	Compuesta por argilitas silicificadas color café grisáceo con capas de chert, lutitas silíceas, con presencia de nódulos de pedernal color gris oscuro definidos como chert.
Fm. Macuchi (K) [20]	Serie compuesta en de lavas porfíricas (andesitas y basaltos), brechas, aglomerados, lutitas, areniscas, limolitas volcánicas.
Fm. Cayo (K) [24]	Resultado de la compresión, del piso oceánico que dio origen a la acumulación de sedimentos pelágicos de carácter turbidítico. Su litología corresponde a limolitas de color verde, arenisca color amarillento, grauvacas, tobos y aglomerados que se presentan como una secuencia sedimentaria de origen volcánica

	estratificada.
Fm. Piñón (J) [23]	Consiste en corteza oceánica acrecionada al continente correspondientes a lavas basálticas en forma de pillow lavas y varias intercalaciones volcánicas

*Se muestra en negritas las edades abreviadas de cada formación geológica.

Respecto a la biodiversidad del campus, esta corresponde a la misma que se presenta dentro del Bosque Protector Prosperina. El ecosistema predominante es el Bosque semideciduo de tierras bajas del Jama-Zapotillo, que cubre aproximadamente el 78% del área. Las zonas de mayor altitud al oeste corresponden al bosque semideciduo de la cordillera costera del Pacífico Ecuatorial. Esta clasificación lo sitúa dentro del macrogrupo del Bosque Seco Estacional Tumbesino-Guayaquil, un ecosistema considerado En Peligro Crítico (CR) de extinción a nivel global debido a la alta deforestación y fragmentación de hábitat en la región [25]. El área presenta una topografía colinada, con paisaje heterogéneo de quebradas estacionales y cuerpos de agua como las albarrradas "Martín Pescador" y "Los Monos". Estos cuerpos de agua son vitales para la regulación hídrica local y para mantener la fauna asociada, especialmente durante la estación seca [26].

La flora vascular está compuesta por 217 especies pertenecientes a 62 familias. La familia Fabaceae es la más diversa, con 38 especies, seguida de Malvaceae con 15. Entre las especies arbóreas representativas del bosque seco tropical se destacan el ceibo (*Ceiba trichistandra*), el guayacán (*Handroanthus billbergii* y *H. chrysanthus*), el palo santo (*Bursera graveolens*) y el guachapelí (*Pseudosamanea guachapele*) [27].

La comunidad de insectos es la más diversa, con 237 especies en 60 familias. El orden Lepidoptera es el más representativo, con cerca del 61% de las especies, destacando las familias Nymphalidae y Hesperidae. Se han registrado 20 especies de arácnidos, incluyendo arañas, escorpiones y opiliones. Además, se han reportado 15 especies de anfibios y 27 especies de reptiles. En reptiles, se identifican especies amenazadas como la lagartija de sombra de Festa (*Alopoglossus festae*, VU) y la serpiente corredora (*Coniophanes dromiciformis*, VU), además de especies incluidas en apéndices CITES como la iguana verde (*Iguana iguana*) y la boa (*Boa imperator*) [26].

Las aves son el grupo vertebral más visible del bosque con 215 especies agrupadas en 48 familias. La familia Tyrannidae es la más diversa, con 30 especies. Un total de 27 especies son endémicas de la región Tumbesina. Dieciocho especies se encuentran en alguna categoría de amenaza nacional o global, incluyendo el gavilán dorsigrís (*Pseudastur occidentalis*), un valor de conservación clasificado como en Peligro (EN). Otras especies notables son el perico cachetigrís (*Brotogeris pyrrhoptera*, VU), el perico caretirrojo (*Psittacara*

erythrogenys, NT) y el tinamú cejiblanco (*Crypturellus transfasciatus*, NT) [28].

Además, se han registrado 36 especies de mamíferos. Los primates, con poblaciones de mono aullador de la costa (*Alouatta palliata*) y mono capuchino blanco de occidente (*Cebus aequatorialis*). Ambas especies son consideradas valores de conservación y enfrentan serias amenazas, estando el capuchino clasificado como en Peligro Crítico (CR) a nivel nacional y global, y el aullador como en Peligro Crítico (CR) a nivel nacional. Otros mamíferos importantes incluyen el pecarí de collar blanco (*Dicotyles tajacu*, VU), el hormiguero de chaleco (*Tamandua mexicana*, EN) y la ardilla de Guayaquil (*Simosciurus stramineus*), una especie endémica y emblemática de la ciudad [29].

B. Estructura y dinámica del sistema hídrico del campus

El sistema de SbN actual del campus comprende dos lagos artificiales y seis albarrradas distribuidas dentro del campus (Fig. 3). Este conjunto de infraestructura hídrica cumple con funciones específicas como i) control de inundaciones y uso en actividades de riego y limpieza del campus, ii) control de incendios forestales en el bosque y la zona en general, iii) restauración y control del ecosistema, y iv) entorno de aprendizaje continuo como sitio demostrativo de ecohidrología que permite la interacción de la comunidad del campus en temas asociado al agua y biodiversidad.



Fig. 3 Sistema de SbN en el campus universitario: a) lago y b) albarrrada

La kamanchaca es el nombre de la niebla en idioma aymara que significa “Oscuridad”, es un tipo de niebla más conocido por “Bruma costera”, se produce en el mar durante el día, debido a la intensidad de la radiación del calor del sol que es absorbido por el mar. Este calor se libera y sale a la atmosfera formando vapor y debido a los vientos avanza hacia el interior de la costa, en este caso la cordillera Chongón-Colonche. En este proceso los vapores de agua a medida que se elevan y llegan a las montañas, forman una espesa niebla que contiene gotas de agua que miden entre 1 y 40 micras de diámetro.

La abundante vegetación en la cordillera con bosques húmedos en la parte alta y bosques secos en las partes bajas permite que la bruma deposite sus gotas de rocío sobre la vegetación la misma que se acumula y forman pequeños esteros y cataratas (Fig. 4a,b).



Fig. 4 a) y b) Ocurrencia de fenómeno kamanchaca en campus universitario.

La Fig. 5 muestra un modelo de regulación dual propuesto para el sistema de SbN del campus, en el cual, los lagos, albarradas y la ocurrencia del fenómeno de kamanchaca interactúan como un mecanismo bidireccional entre hidrología y biota. La infraestructura hídrica regula caudales, es fuente de abastecimiento para la flora y fauna, y facilitar la conectividad ecológica del campus. Por otro lado, la gestión de la biota del bosque protector permite mejorar el sistema hídrico a través de barreras vegetales para captura de nutrientes, restauración ecológica, control de especies nativas e invasoras.

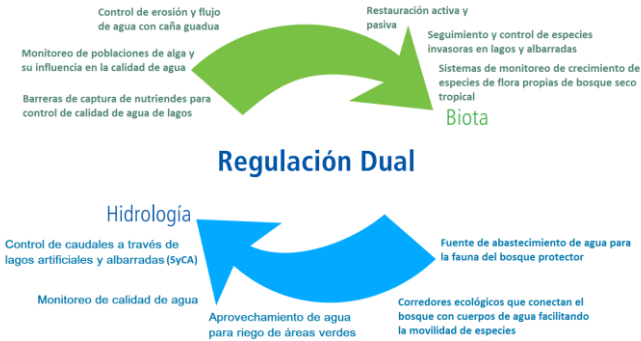


Fig. 5 Modelo propuesto de regulación dual del sistema hídrico actual y los beneficios de la kamanchaca.

C. Marco estratégico para la resiliencia hídrica

La Fig. 6 muestra un resumen de los resultados obtenidos en el análisis FODA. En general, se expone el potencial del a kamanchaca como fuente hídrica no convencional que favorecería los objetivos de conservación de flora y fauna del bosque. Sin embargo, se resalta la necesidad de integrar a la captura de niebla a los planes de gestión de agua del campus universitario, potenciando planes de inversión para proyectos de resiliencia hídrica potenciando con la articulación de aliados estratégicos.

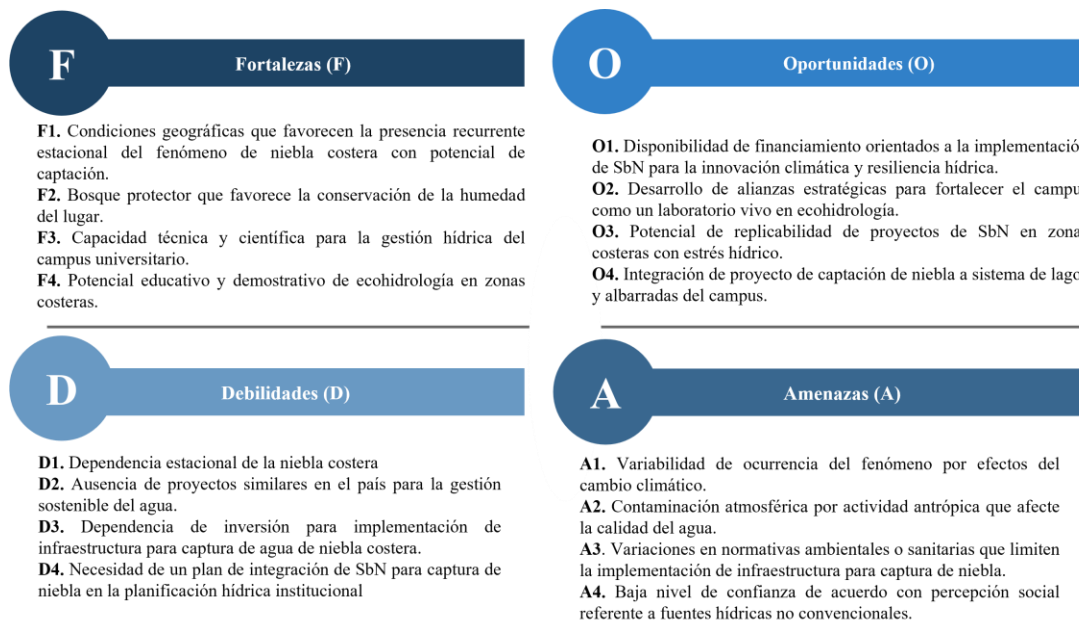


Fig. 6 Resultados de aspectos interno y externos (FODA) del potencial hídrico de la kamanchaka.

De acuerdo con el análisis FODA, el estudio plantea estrategias de gestión hídrica en el campus universitario clasificadas en los sistemas de innovación resaltando la importancia de integrar actores clave, potencial la implementación de SbN y exponer la importancia de la kamanchaka como fuente hídrica no convencional:

Sistema ambiental:

- **F1F2O4.** Implementar SbN para la captura de niebla costera como proyecto piloto para futura implementación a gran escala.
- **D1O2.** Desarrollar un estudio de balance hídrico integral que permita cuantificar la contribución de la kamanchaka.
- **F1A1.** Implementar SbN para la captura de niebla costera como proyecto piloto para futura implementación a gran escala.
- **D1A1.** Establecer protocolos de gestión hídrica ante la variabilidad climática y capacidad de almacenamiento de lagos y albarradas.

Sistema educativo:

- **F3F4O2.** Integrar el fenómeno kamanchaka a la infraestructura hídrica existente como laboratorio vivo y entorno de aprendizaje continuo.
- **D2O3.** Desarrollar proyectos de investigación de eficiencia hídrica del campus que evalúe el sistema de lagos, albarradas y la captura de niebla en el campus.
- **F3A2.** Desarrollar proyectos piloto de captura de niebla para estudiar la calidad del agua captada y su interacción con cuerpos de agua existentes.
- **D3A3.** Implementar campañas de conciencia ambiental y cuidado del agua en el campus universitario.

Sistema Social:

- **F4O3.** Desarrollar proyecto de sitio demostrativo de ecohidrología que integre la comunidad universitaria como modelo replicable en entornos costeros.
- **D2O2.** Fortalecer redes de colaboración nacionales e internacionales para promover la transferencia de conocimientos en SbN para resiliencia hídrica.
- **F4A4.** Implementar un sistema digital de comunicación en cuidado del agua para la comunidad del campus.
- **D4A4.** Integrar la participación de estudiantes, profesores e investigadores en proyectos de investigación para la conservación del ecosistema y gestión del agua.

Sistema Político-Institucional

- **D4O4.** Desarrollar un plan de operación conjunta de lagos, albarradas y captura de niebla.
- **F3A3.** Incorporar la captura de niebla en el marco normativo institucional que permita dar continuidad a los proyectos del campus.
- **D4A3.** Establecer un proyecto anual de monitoreo de cantidad y calidad de agua gestionada con SbN en el campus.

Sistema Económico

- **D3D2O1.** Realizar un proyecto de evaluación de la inversión y los beneficios de integrar la captación de niebla al sistema hídrico existente para buscar cofinanciamiento externo.
- **D2D4O2.** Alcanzar una certificación ambiental del campus que incorpore la captación de niebla como indicador de gestión hídrica sostenible.

- **D3D4A4.** Diseñar un plan de captación de fondos para prevenir y mitigar riesgos operativos en el campus en relación con el sistema de albarradas, lagos y captura de niebla.

IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

La investigación muestra la interacción del fenómeno meteorológico de la kamanchaka y los servicios ecosistémicos del Campus Gustavo Galindo. Principalmente se identifica la oportunidad de integrar prácticas de cosecha de agua para la implementación de la kamanchaka en el sistema hídrico de la ESPOL. Mientras que, la presencia del Bosque y Vegetación Protector Prosperina actúa con un ente regulador entre la biota y la hidrología creando una relación dual que beneficia no solo a la biodiversidad del campus, sino también, contribuye a la disponibilidad hídrica en albarradas y lagos que son usados para diferentes actividades antrópicas.

Respecto al contexto geográfico-geológico la presencia de la Cordillera Chongón Colonche y los suelos de origen sedimentario a volcano-sedimentarios permiten retener la humedad en los suelos y vegetación circundante. La Cordillera por su parte actúa como una barrera orográfica permitiendo interceptar la neblina y favoreciendo el proceso de condensación. Aunque este fenómeno aún no se ha cuantificado, se evidencia con el cambio en la vegetación, considerando la estacionalidad temporal en el Bosque y Vegetación Protector Prosperina. Este efecto responde a la interacción entre las corrientes marinas del Océano Pacífico y la orografía de la cordillera, un dinámica que se asemeja con los oasis de niebla reportados en Perú y Chile, particularmente en los desiertos de Sechura y Atacama donde la presencia de la niebla, la cordillera y la formación de vegetación, permiten la conservación de un ecosistema endémico [11].

Desde el punto de vista ecohidrológico el Bosque y Vegetación Protector Prosperina es la representación de la relación dual entre el agua y la biota. En el sector ya se evidencia una función reguladora compuesta por el sistema de albarradas, quebradas estacionales y cuerpos de agua artificiales (lagos). Sin embargo, el fenómeno de la kamanchaka puede representar un papel complementario en la regulación del microclima y en el mantenimiento de la humedad del suelo. Como es el caso reportado en Chile donde se estableció un sitio de investigación a partir de la estación Atacama donde se utilizó un neblinómetro para cuantificar el aporte hídrico, obteniendo registros de hasta 112 l m²/días [30]. La captura de neblina es una opción prometedora para el suministro de agua para uso doméstico y restauración de ecosistemas [31], [32]. Este proceso ha permitido captar en promedio de 3 a 10 L/m²/día en sitios adecuados [33], [34]. En zonas de Chile como Antofagasta y el desierto de Atacama, se ha registrado captaciones promedio de hasta 0.37 L/m²/día y 3.3 L/m²/día respectivamente [35], [36].

Estudios han reportado que, aunque los costos de instalación están sujetos al tamaño del sistema, materiales

empleados y accesibilidad del terreno, los costos operativos suelen ser bajos, principalmente por no requerir insumos energéticos. Por ejemplo, en Chile, el costo inicial de instalación de 60 unidades colectores de niebla, junto con una tubería de 6.2 km y tanques de almacenamiento de 100 m³ fue de USD 37 000 [37]. En general, para una comunidad pequeña, puede ser ideal el uso 100 colectores de neblina, cuyo costo de instalación estaría alrededor de los USD 40 000 [38]. Por tanto, en zonas con altas recurrencias de niebla puede resultar una opción económicamente viable.

El análisis cualitativo realizado sugiere que la captura de niebla podría integrarse como una fuente hídrica no convencional complementaria al sistema existente. Esta integración permitiría diversificar las fuentes de agua, reducir la vulnerabilidad frente a variabilidad climática y fortalecer la resiliencia del campus ante escenarios de sequía prolongada. Además de su potencial hídrico, la implementación de proyectos piloto de captura de niebla aportaría beneficios educativos y demostrativos, posicionando al campus como un laboratorio vivo de innovación ecohidrológica. Dentro del campus Gustavo Galindo de la ESPOL se han realizado estudios previos para impulsar la gestión hídrica sostenible del campus, con propuestas como el autoabastecimiento a partir de lagos artificiales [39] y la recircularidad de las aguas residuales producidas [40], reforzando su pertinencia dentro de un modelo o de gestión sostenible.

El análisis FODA evidencia que el principal valor estratégico de la kamanchaka en el contexto del campus universitario radica en su capacidad para articular actores institucionales, académicos y sociales en torno a la resiliencia hídrica. La integración bajo el modelo de quintuple hélice permite vincular el sistema ambiental, educativo, social, político-institucional y económico. Desde el componente ambiental, la implementación de SbN orientadas a la captura de niebla representa una oportunidad de innovación ecológica. Mientras que, en el ámbito educativo, el fenómeno puede incorporarse como objeto de estudio interdisciplinario, fortaleciendo la investigación aplicada. A nivel social e institucional, la generación de protocolos y marcos normativos garantizaría continuidad y sostenibilidad en el tiempo de las estrategias que se plantean en esta investigación. Este enfoque posiciona al campus como un modelo replicable para otros entornos costeros de América Latina que enfrentan desafíos similares de variabilidad climática y presión hídrica y que poseen características geográficas y geológicas similares. Futuras investigaciones en el área deben considerar la medición experimental de la niebla complementada con análisis hidrológicos que permitan determinar la viabilidad técnica, económica y ambiental de su implementación en un bosque seco tropical en estado de protección.

IV. CONCLUSIONES

El estudio exhibe la importancia del fenómeno la kamanchaka como una alternativa de fuente hídrica no

convencional a través de la implementación de un sistema de captura de niebla que se integre al sistema de lagos y albardas actuales en el campus. Las SbN del campus se presentan como un sitio demostrativo de ecohidrología que funciona como un laboratorio vivo de aprendizaje continuo y conservación de un bosque seco protector.

El análisis FODA permitió definir que las condiciones climáticas favorables y capacidades técnicas institucionales son clave para implementar la captura de niebla, sin embargo, la variabilidad climática y posibles restricciones económicas podrían amenazar su implementación. La investigación propone un plan estratégico que busca la sostenibilidad integrando los sistemas de innovación, orientados a articular la comunidad politécnica como actores clave que refuerzan la resiliencia hídrica, donde las SbN son componentes esenciales frente a los efectos del cambio climático y la presión antrópica.

Futuras investigaciones podrían incluir estudios sobre la posible existencia de prácticas ancestrales de captación de niebla en culturas aborígenes de la región costera del país. Explorando la posibilidad de que grupos como los Guancavilcas hayan desarrollado estrategias empíricas de aprovechamiento de la kamanchaka, revalorizando el conocimiento ancestral en la implementación de SbN.

AGRADECIMIENTO/RECONOCIMIENTO

Este trabajo ha sido apoyado por el Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED) a través de la Red Soluciones Basadas en la Naturaleza para la Gestión Integral del Agua en comunidades vulnerables” (SbN-GIA) con código 625RT0176. Además, contó con el apoyo de los proyectos de investigación de la ESPOL "Registro de sitios de interés geológico del Ecuador para estrategias de desarrollo sostenible", con el código CIPAT-004-2024, Proyecto “AGUA ESPOL: Exploración geoelectrica del agua subterránea para el fortalecimiento de la gestión hídrica institucional”, con código FICT-007-2026, y Proyecto “Siembra y Cosecha de Agua (SyCA), fortaleciendo la resiliencia comunitaria”, con código PG13-PY26-07. Finalmente, los autores agradecen al Arqueólogo Jorge Marcos, promotor de las investigaciones sobre kamanchaka en Ecuador, por su inspiración, orientación y compromiso permanente con el estudio de estos sistemas naturales. Adjuntamos un archivo audiovisual sobre kamanchaka disponible en el siguiente enlace: <https://www.youtube.com/watch?v=4sxxgQDNmn2o&t=11s>

REFERENCIAS

- [1] B. W. Abbott *et al.*, “Human domination of the global water cycle absent from depictions and perceptions,” *Nat. Geosci.*, vol. 12, no. 7, pp. 533–540, Jul. 2019, doi: 10.1038/s41561-019-0374-y.
- [2] T. Oki and S. Kanae, “Global Hydrological Cycles and World Water Resources,” *Science (80-.)*, vol. 313, no. 5790, pp. 1068–1072, Aug. 2006, doi: 10.1126/science.1128845.
- [3] K. E. Trenberth and D. J. Shea, “Relationships between precipitation and surface temperature,” *Geophys. Res. Lett.*, vol. 32, no. 14, Jul. 2005, doi: 10.1029/2005GL022760.
- [4] J. Sardans, A. Miralles, A. Tariq, F. Zeng, R. Wang, and J. Peñuelas, “Growing aridity poses threats to global land surface,” *Commun. Earth Environ.*, vol. 5, no. 1, p. 776, Dec. 2024, doi: 10.1038/s43247-024-01935-1.
- [5] C. J. Vörösmarty, P. Green, J. Salisbury, and R. B. Lammers, “Global Water Resources: Vulnerability from Climate Change and Population Growth,” *Science (80-.)*, vol. 289, no. 5477, pp. 284–288, Jul. 2000, doi: 10.1126/science.289.5477.284.
- [6] S. Gössling and C. Hall, “Tourism and water: interactions and impacts,” *Tour. Geogr.*, vol. 21, no. 3, pp. 367–386, 2019.
- [7] A. Dye *et al.*, “Fog in western coastal ecosystems: inter-disciplinary challenges and opportunities with example concepts from the Pacific Northwest, USA,” *Front. Environ. Sci.*, vol. 12, 2024, doi: 10.3389/fenvs.2024.1471406.
- [8] P. Cereceda, H. Larrain, P. Osses, M. Farías, and I. Egaña, “The spatial and temporal variability of fog and its relation to fog oases in the Atacama Desert, Chile,” *Atmos. Res.*, vol. 87, no. 3–4, pp. 312–323, Mar. 2008, doi: 10.1016/j.atmosres.2007.11.012.
- [9] F. N. Gonzales, D. Craven, and J. J. Armesto, “Islands in the mist: A systematic review of the coastal lomas of South America,” *J. Arid Environ.*, vol. 211, p. 104942, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.jaridenv.2023.104942.
- [10] D. Beresford-Jones *et al.*, “Re-evaluating the resource potential of lomas fog oasis environments for Preceramic hunter–gatherers under past ENSO modes on the south coast of Peru,” *Quat. Sci. Rev.*, vol. 129, pp. 196–215, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.quascirev.2015.10.025.
- [11] J. Moat *et al.*, “Seeing through the clouds – Mapping desert fog oasis ecosystems using 20 years of MODIS imagery over Peru and Chile,” *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, vol. 103, p. 102468, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.jag.2021.102468.
- [12] F. N. Gonzales Guillén and F. Villasante Benavides, “Estado de conservación de *Myrcianthes ferreyrae* un árbol endémico de las lomas costeras del sur del Perú,” *Rev. Peru. Biol.*, vol. 26, no. 2, pp. 235–242, Jul. 2019, doi: 10.15381/rpb.v26i2.16380.
- [13] D. Abanto, “Reservas de carbono en un ecosistema del desierto sudamericano: El caso de las Lomas de Amancaes (Lima, Perú),” *Rev. la Acad. Colomb. Ciencias Exactas, Físicas y Nat.*, 2022, doi: 10.18257/raccefyn.1689.
- [14] P. Carrión-Mero, J. Solórzano, K. A. Cabrera, B. Vera-Muentes, J. Briones-Bitar, and F. Morante-Carballo, “Geotechnical Characterization for Territorial Planning of a Special Economic Zone at a University Campus in Ecuador,” *Int. J. Des. Nat. Ecodynamics*, vol. 18, no. 4, pp. 939–950, Aug. 2023, doi: 10.18280/ijdne.180421.
- [15] R. G. Dyson, “Strategic development and SWOT analysis at the University of Warwick,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 152, no. 3, pp. 631–640, Feb. 2004, doi: 10.1016/S0377-2217(03)00062-6.
- [16] A. Fahim, Q. Tan, B. Naz, Q. ul Ain, and S. U. Bazai, “Sustainable Higher Education Reform Quality Assessment Using SWOT Analysis with Integration of AHP and Entropy Models: A Case Study of Morocco,” *Sustainability*, vol. 13, no. 8, p. 4312, Apr. 2021, doi: 10.3390/su13084312.
- [17] D. Leigh, “SWOT Analysis,” in *Handbook of Improving Performance in the Workplace: Volumes 1-3*, Wiley, 2009, pp. 115–140. doi: 10.1002/9780470592663.ch24.
- [18] E. G. Carayannis, G. Acikdilli, and C. Ziemniewicz, “Creative Destruction in International Trade: Insights from the Quadruple and Quintuple Innovation Helix Models,” *J. Knowl. Econ.*, vol. 11, no. 4, pp. 1489–1508, Dec. 2020, doi: 10.1007/s13132-019-00599-z.
- [19] J. Morawska-Jancelewicz, “The Role of Universities in Social Innovation Within Quadruple/Quintuple Helix Model: Practical Implications from Polish Experience,” *J. Knowl. Econ.*, vol. 13, no. 3, pp. 2230–2271, Sep. 2022, doi: 10.1007/s13132-021-00804-y.
- [20] S. Benitez, “Évolution géodynamique de la province cotiere sud-

- équatorienne au Crétacé supérieur-Tertiaire TOMO 71 □
EVOLUCIÓN GEODINÁMICA DE LA COSTA SUR
ECUATORIANA DESDE EL CRETÁCICO SUPERIOR AL
TERCIARIO,” *Geol. Alp.*, p. 1, 1995.
- [21] F. Morante-Carballo *et al.*, “Sites of Geological Interest Assessment for Geoeducation Strategies, ESPOL University Campus, Guayaquil, Ecuador,” *Land*, vol. 11, no. 6, p. 771, May 2022, doi: 10.3390/land11060771.
- [22] C. Sánchez, J. Rivadeneira, and N. Lucas, “Levantamiento Geológico en el Campus Gustavo Galindo (ESPOL), Guayaquil-Ecuador,” Guayaquil, 2017.
- [23] T. Wolf, “Geografía y geología del Ecuador: publicada por orden del Supremo Gobierno de la República,” *Leipzig, Tipografía F. A. Brockhaus*, pp. 1–671, 1892.
- [24] E. Nuñez del Arco, *Geología del Ecuador*, Escuela Su. in Colección Nuestros valores. Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2003.
- [25] Escuela Superior Politécnica del Litoral, “Plan de Manejo Integral Bosque y Vegetación Protector Prosperina,” 2023, *Guayaquil*.
- [26] E. Quelal and C. Colina, “Catálogo Científico Entomológico,” 2020, *Guayaquil*.
- [27] J. Naranjo, M. Vera, E. Jiménez, and A. Pino, “Flores del Bosque Seco Tropical Arte y Botánica. (1era ed.) Red de Bosques Secos. Bosque Protector ‘La Prosperina’,” Guayaquil, 2021.
- [28] M. Pozo, A. Quinteros, A. Pino, and P. Piedrahita, *Un paraíso a grandes alturas: Aves del Bosque Protector La Prosperina y alrededores*. Guayaquil, 2017.
- [29] J. Naranjo-morán, M. Barcos-arias, A. Pino-acosta, L. Sornoza-quijije, and O. Ruiz-barzola, “Biodiversidad y Etnobotánica de árboles representativos del Bosque Protector Prosperina ESPOL RESULTADOS Y DISCUSIÓN Introducidos Natvos Endémicos MATERIALES Y MÉTODOS,” p. 2019, 2019.
- [30] P. Osses, R. Escobar, C. del Río, R. Garcia, and C. Vargas, “El Clima desértico costero con nublados abundantes del desierto de Atacama y su relación con los recursos naturales energía solar y agua de niebla. Caso de estudio Alto Patache (20,5°S), región de Tarapacá, Chile,” *Rev. Geogr. Norte Gd.*, vol. 48, no. 68, pp. 33–48, 2017, doi: 10.4067/s0718-34022017000300033.
- [31] O. Klemm *et al.*, “Fog as a Fresh-Water Resource: Overview and Perspectives,” *Ambio*, vol. 41, no. 3, pp. 221–234, May 2012, doi: 10.1007/s13280-012-0247-8.
- [32] M. Qadir, G. C. Jiménez, R. L. Farnum, and P. Trautwein, “Research History and Functional Systems of Fog Water Harvesting,” *Front. Water*, vol. 3, Apr. 2021, doi: 10.3389/frwa.2021.675269.
- [33] Z. Ismail and Y. I. Go, “Fog-to-Water for Water Scarcity in Climate-Change Hazards Hotspots: Pilot Study in Southeast Asia,” *Glob. Challenges*, vol. 5, no. 5, May 2021, doi: 10.1002/gch2.202000036.
- [34] H. Jarimi, R. Powell, and S. Riffat, “Review of sustainable methods for atmospheric water harvesting,” *Int. J. Low-Carbon Technol.*, vol. 15, no. 2, pp. 253–276, May 2020, doi: 10.1093/ijlct/ctz072.
- [35] F. Albornoz, C. del Río, V. Carter, R. Escobar, and L. Vásquez, “Fog Water Collection for Local Greenhouse Vegetable Production in the Atacama Desert,” *Sustainability*, vol. 15, no. 22, p. 15720, Nov. 2023, doi: 10.3390/su152215720.
- [36] D. Carvajal, M. Mora-Carreño, C. Sandoval, and S. Espinoza, “Assessing fog water collection in the coastal mountain range of Antofagasta, Chile,” *J. Arid Environ.*, vol. 198, p. 104679, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.jaridenv.2021.104679.
- [37] R. S. Schemenauer, H. Fuenzalida, and P. Cereceda, “A Neglected Water Resource: The Camanchaca of South America,” *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, vol. 69, no. 2, pp. 138–147, Feb. 1988, doi: 10.1175/1520-0477(1988)069<0138:ANWRTC>2.0.CO;2.
- [38] R. S. Schemenauer and P. Cereceda, “Fog collection’s role in water planning for developing countries,” *Nat. Resour. Forum*, vol. 18, no. 2, pp. 91–100, May 1994, doi: 10.1111/j.1477-8947.1994.tb00879.x.
- [39] B. Merchán-Sanmartín *et al.*, “Water availability in a university campus: the role of an artificial lake as a nature-based solution,” *Front. Water*, vol. 7, Oct. 2025, doi: 10.3389/frwa.2025.1631938.
- [40] B. Merchán-Sanmartín *et al.*, “Sanitary Sewerage Master Plan for the Sustainable Use of Wastewater on a University Campus,” *Water*, vol. 14, no. 15, p. 2425, Aug. 2022, doi: 10.3390/w14152425.