

SISTEMA PARA LA INTEGRACIÓN DE INFORMACIÓN AMBIENTAL

COMO HERRAMIENTA DE APROPIACIÓN
SOCIAL DEL CONOCIMIENTO

- **Carmen Inés Báez Pérez**
- **Francisco Arnaldo Vargas Bermúdez**
- **Olga Lucía Usaquén Perilla**
- **Sergio David Torres Piraquive**
- **Mauricio Ochoa Echeverría**

Catalogación en la publicación – Biblioteca Nacional de Colombia

Báez Pérez, Carmen Inés, autora

Sistema para la integración de información ambiental como herramienta de apropiación social del conocimiento / Carmen Inés Báez Pérez [y otros cuatro]. -- Tunja: Ediciones Universidad de Boyacá, [2025].

104 páginas.

Incluye glosario -- Incluye referencias bibliográficas.

ISBN 978-958-5120-68-6 (físico) -- 978-958-5120-72-3 (digital)

1. Gestión ambiental 2. Emprendimiento sostenible 3. Sistemas de información en administración 4. Indicadores de gestión I. Vargas Bermúdez, Francisco Arnaldo, autor II. Usaquén Perilla, Olga Lucía, autora III. Torres Piraquive, Sergio David, autor IV. Ochoa Echeverría, Mauricio, autor

CDD: 333.72 ed. 23

CO-BoBN- a1145558

SISTEMA PARA LA INTEGRACIÓN DE INFORMACIÓN AMBIENTAL

COMO HERRAMIENTA DE APROPIACIÓN
SOCIAL DEL CONOCIMIENTO

- **Carmen Inés Báez Pérez**
- **Francisco Arnaldo Vargas Bermúdez**
- **Olga Lucía Usaquén Perilla**
- **Sergio David Torres Piraquive**
- **Mauricio Ochoa Echeverría**

 **Universidad de Boyacá®**

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

Presidente

Dr. Osmar Correal Cabral

Rectora

Dra. Rosita Cuervo Payeras

Vicerrector Académico

Ing. MSc. Carlos Rafael Lara Mendoza

Vicerrectora Investigación, Ciencia e innovación

Dra. Claudia Patricia Quevedo Vargas

**Vicerrector Proyección Institucional y
Administrativo y de Infraestructura**

Dr. Camilo Correal Cuervo.

Decano Facultad de Ciencias e Ingeniería

Dr. Gabriel Ricardo Cifuentes Osorio

© Los autores

Carmen Inés Báez Pérez
Francisco Arnaldo Vargas Bermúdez
Olga Lucía Usaquén Perilla
Sergio David Torres Piraquive
Mauricio Ochoa Echeverría

**Gestión editorial,
diseño y diagramación**

División de Publicaciones

Director División de Publicaciones

Ing. D.G. Mg. Johan Camilo Agudelo Solano

Gestión editorial

Mg. Natalia Elizabeth Cañizalez Mesa

Diseño de portada y diagramación

D.G. Rafael Alberto Cárdenas Estupiñán

Corrección de texto y estilo

Ling. Diana Araminta Rojas Buitrago

© Ediciones Universidad de Boyacá

Carrera 2ª. Este N° 64-169
Tels.: 608 7452742 - 7450000 Ext. 15405
www.uniboyaca.edu.co
publicaciones@uniboyaca.edu.co
Tunja-Boyacá-Colombia

ISBN Físico: 978-958-5120-68-6

ISBN Digital: 978-958-5120-72-3

Esta edición y sus características gráficas son propiedad de la

UB Universidad de Boyacá®

Vigilada Mineducación

© 2025

Queda prohibida la reproducción parcial o total de este libro, por medio de cualquier proceso reprográfico o fónico, especialmente fotocopia, microfilme, offset o mimeógrafo (Ley 23 de 1982).

Presentación

Me es muy grato presentar este libro que contiene la investigación realizada por los Ingenieros Carmen Inés Báez Pérez, Francisco Arnaldo Vargas Bermúdez, Olga Lucía Usaquén Perilla, Sergio David Torres Piraquive y Mauricio Ochoa Echeverría, docentes de la Universidad de Boyacá, quienes integran los grupos de investigación GIPROCAS, Gestión del Recurso Hídrico y Gestión Ambiental, y se presentaron a la convocatoria de la Gobernación de Boyacá para atender una de las estrategias definidas por dicha dependencia con el propósito de obtener proyectos de innovación y gestión en relación con los problemas regionales del medio ambiente.

Se abordó la problemática del Lago de Sochagota en las inmediaciones del municipio de Paipa, que está influenciado por las actividades turísticas que se desarrollan atraídos por la belleza del paisaje y la existencia de fuentes termales con diversas utilidades en la zona hotelera y la profusión de cultivos de diversa clase dada la fertilidad de los suelos que rodean el lago, por lo cual se debía identificar a los actores que hacen uso del recurso hídrico, y así poder diseñar un instrumento que sirva para la gestión de los sistemas hídricos regionales con visión prospectiva teniendo en cuenta la variabilidad climática.

El resultado final es el diseño de una solución tecnológica que incorpora herramientas de simulación y TIC para integrar información de interés social y ecológico que facilitará la toma de decisiones estratégicas a nivel institucional y comunitario para el manejo del sistema. El manejo es muy fácil por cuanto se diseñaron los siguientes Módulos: el de Administración con todas las interfaces de usuario para facilitar la consulta, el Módulo de Información Básica que permite administrar la información de las tablas básicas, el Módulo de Mesa Técnica Ambiental para gestionar los escenarios y consultar los resultados de las simulaciones, y el Módulo de Mesa Técnica Principal que permite visualizar los resultados a través de la página web por todos los usuarios del sistema.

El uso de esta herramienta, que también se puede consultar con la aplicación móvil que se diseñó, será de una gran utilidad en la toma de decisiones por parte de las autoridades municipales y ambientales de la región.

OSMAR CORREAL CABRAL

Presidente

Contenido

Resumen	10
Introducción	12
1. Contexto General del Proyecto BIO	15
2. Identificación del Entorno del Sistema	21
2.1 Conexión entre Variables Ambientales y Socioecológicas para el Análisis de Indicadores e Índice de Sostenibilidad	23
3. Entorno Tecnológico del Sistema de Información SIE	41
3.1 Arquitectura General Conceptual del Modelo Propuesto	43
3.2 Identificación de Actores	51
3.3 Identificación de Requisitos Funcionales	53
3.4 Modelo de Procesos de Negocio	60
3.5 Principales Flujogramas del Sistema	61
3.5.1 Flujograma General	61
3.5.2 Flujograma Mesa Técnica BIO-Ambiental	66
3.5.3 Flujograma Mesa Técnica Principal	73
3.5.4 Flujograma Proceso de Simulación	76

4. Sistema de Información Socio-Ecológico - SISE	79
4.1 Límite del Sistema – General (Caso de Uso)	81
4.2 Back End	81
4.2.1 Límite del Sistema – Detallado (Back End)	84
4.2.2 Diagramas de Caso de Uso	85
4.3 Front End	86
4.3.1 Límite del Sistema – Detallado	87
4.3.2 Diagramas de Caso de Uso	88
5. Acceso Democrático a la Información	91
Conclusiones	99
Referencias	100
Glosario	102

Lista de figuras

Figura 1. Área de influencia directa e indirecta del proyecto y puntos de gestión priorizados	18
Figura 2. Metodología para el tratamiento de la información climática	24
Figura 3. Algoritmo para el llenado de datos faltantes	25
Figura 4. Variación topográfica del área de estudio y distribución geográfica de las estaciones hidrometeorológicas	28
Figura 5. Metodología para el procesamiento de datos en HEC-DSSVue	29
Figura 6. Arquitectura de la infraestructura de tecnologías de información	37
Figura 7. Middleware de la solución tecnológica	38
Figura 8. Arquitectura general conceptual del modelo	47
Figura 9. Flujograma de interacción entre los datos históricos, los modelos ambientales y la base de datos	50
Figura 10. Modelo de procesos del negocio	60
Figura 11. Diagrama general	62
Figura 12. Diagrama flujo datos históricos y modelo de clima	63
Figura 13. Diagrama Flujo Mesa Técnica BIO-Ambiental	64
Figura 14. Diagrama Flujo Mesa Técnica Principal	65
Figura 15. Diagrama Flujo Momentos Mesa Técnica BIO-Ambiental	66
Figura 16. Creación Mesa Técnica BIO-Ambiental	67
Figura 17. Ejecución modelo de clima	69
Figura 18. Ejecución proceso de simulación	69
Figura 19. Consulta resultados escenario base y creación de nuevos escenarios	70
Figura 20. Creación de nuevos escenarios por la MTBA	71
Figura 21. Visualización de escenarios	72
Figura 22. Cierre MTBA	72
Figura 23. Flujograma Mesa Técnica Principal	75
Figura 24. Flujograma Proceso de Simulación HMS y Gestión	77
Figura 25. Flujograma Proceso de Simulación RAS	78

Figura 26. Límite general del sistema	82
Figura 27. Descripción general del back end	83
Figura 28. Límite del sistema detallado (back end)	84
Figura 29. Diagrama de caso de uso (back end)	85
Figura 30. Descripción general del front end	87
Figura 31. Límite del sistema – detallado (front end)	87
Figura 32. Diagrama de caso de uso (front end)	88
Figura 33. Página principal sitio web	93
Figura 34. Página principal app	93
Figura 35. Opciones principales sitio web	95
Figura 36. Sitio web – gestión de contenido	95
Figura 37. Puntos de gestión	96
Figura 38. Información detallada punto de gestión	97
Figura 39. Interfaces de la aplicación móvil	98

Lista de tablas

Tabla 1. Herramientas computacionales empleadas en la modelación ambiental	33
Tabla 2. Actores del sistema	51
Tabla 3. Identificación y descripción de requerimientos funcionales y no funcionales del back end	55
Tabla 4. Identificación y descripción de requerimientos funcionales y no funcionales del front end	56

Resumen

La Universidad de Boyacá, en colaboración con los grupos de investigación Giprocas, Gestión del Recurso Hídrico y Gestión Ambiental, se ha sumado a las iniciativas de la Gobernación de Boyacá para fomentar proyectos innovadores y abordar problemas ambientales regionales, particularmente en la gestión del recurso hídrico. En este contexto se desarrolló el proyecto titulado *Resiliencia y gestión de sistemas socioecológicos estratégicos para la actividad agrícola en escenarios de variabilidad climática: caso de estudio lago Sochagota, Boyacá, Colombia*.

El objetivo general del proyecto fue “Desarrollar una herramienta de gestión que fortalezca la resiliencia del sistema socioecológico asociado al lago Sochagota, al recurso termomineral del municipio de Paipa, y a las dinámicas agrícolas regionales bajo escenarios de variabilidad climática”, buscando un equilibrio adecuado entre las condiciones medioambientales y las actividades humanas en el área de influencia del proyecto.

Para el cumplimiento del objetivo general se definieron tres objetivos específicos, uno de ellos “Desarrollar una solución tecnológica que integre variables socioecológicas para la apropiación social del conocimiento en la gestión del recurso hídrico con enfoque regional y prospectivo”, el cual permitió la implementación de una solución basada en tecnologías de información y comunicaciones.

El presente libro aborda el desarrollo de este objetivo a través de la metodología SCRUM, la cual permitió estructurar de manera ordenada, eficiente y eficaz el trabajo de construcción de la herramienta tecnológica, lo que hizo posible una gestión óptima de los recursos humanos, técnicos y de tiempo, entre otros; así, se dio cumplimiento a los requerimientos de los diferentes *stakeholders* involucrados en el proceso.

Este proyecto, avalado por las autoridades gubernamentales, representa un esfuerzo significativo para abordar los desafíos ambientales en la región y contribuir al desarrollo sostenible.

Palabras clave: tecnología de la información, medio ambiente, *software*, agua, acceso a la información.

Abstract

Universidad de Boyacá, in collaboration with the research groups Giprocas, Gestión del Recurso Hídrico y Gestión Ambiental, has partnered with Gobernación de Boyacá to promote innovative projects aimed at addressing regional environmental challenges, particularly in water resource management. In this context, the project titled “Resilience and Management of Strategic Socio-Ecological Systems for Agricultural Activity in Climate Variability Scenarios: Case Study of Lago Sochagota, (Boyacá, Colombia)” was conceived.

The main goal of the project was to develop a management tool that enhances the resilience of the socio-ecological system linked to Lago Sochagota, the thermal mineral spring of Paipa municipality, and the agricultural dynamics of the region amidst climate variability scenarios. This endeavor sought to strike a balance between environmental preservation and human activities within the project’s sphere of influence.

To achieve this goal, three specific objectives were outlined, one of which was to develop a technological solution integrating socio-ecological variables to facilitate the social appropriation of knowledge in water resource management with a regional and forward-looking approach. This paved the way for the implementation of a solution based on information and communications technologies.

This publication delves into the execution of this objective through the SCRUM methodology, which structured the construction of the technological tool in an orderly, efficient, and effective manner. This approach enabled optimal utilization of human, technical, and temporal resources, among others, ensuring compliance with the requirements of the diverse stakeholders involved in the process.

This project, endorsed by governmental authorities, represents a significant endeavor to tackle environmental challenges in the region and foster sustainable development.

Keywords: information technology, environment, *software*, water, access to information

Introducción

Dentro de las estrategias definidas por la Gobernación de Boyacá para incentivar proyectos de innovación y gestión frente a problemas regionales relacionados con el medio ambiente, se han creado convocatorias orientadas a la postulación de proyectos que requieran recursos de las regalías para su ejecución. Es por ello que la Universidad de Boyacá, a través de los grupos de investigación Giprocas, Gestión del Recurso Hídrico y Gestión ambiental, se presentó a una de esas convocatorias, con el fin de obtener financiación para parte de la investigación que se plasma como resultado en el presente documento.

Así las cosas, el proyecto *Resiliencia y gestión de sistemas socioecológicos estratégicos para la actividad agrícola, en escenarios de variabilidad climática: caso de estudio: lago Sochagota, Boyacá, Colombia* recibió el aval por parte de los entes gubernamentales para su desarrollo.

Para el desarrollo de este proyecto se toma como punto de partida la metodología OSSEM (Overall Susceptibility Assessment for Sustainable Environmental Management), propuesta por Usaquén *et al.* (2012), la cual propende por un adecuado equilibrio entre las condiciones medioambientales y las actividades humanas, lo cual se ajusta a la problemática que se abordó en el área de influencia del proyecto.

Para la ejecución del proyecto se definieron tres objetivos específicos, uno de ellos “Desarrollar una solución tecnológica que integre variables socioecológicas, para la apropiación social del conocimiento en la gestión del recurso hídrico con enfoque regional y prospectivo”, el cual se enfoca en la implementación de una solución mediada por tecnologías de información y comunicaciones, con el objeto de integrar los diferentes elementos y actores que convergen en el mismo.

Para el desarrollo de este objetivo se realizó la identificación de los actores involucrados en el uso y gestión del recurso hídrico, a los cuales se les aplicaron instrumentos a fin de conocer las necesidades, los procesos y actividades realizadas por cada uno, con el objeto de diseñar una arquitectura que permitiera a los mismos interactuar de manera coordinada para la ejecución del proceso planteado, buscando el mejor escenario para la gestión del recurso hídrico y, por ende, su aprovechamiento en las actividades turísticas y agropecuarias propias de la zona de influencia del proyecto.

El libro cuenta con un primer capítulo donde se realiza una contextualización sobre el alcance del proyecto BIO, seguido de un capítulo donde se describe el área de estudio y se explica cómo se obtienen los datos, se transforman y procesan, pues son el insumo inicial para los procesos de simulación; asimismo se presentan los modelos ambientales utilizados y, por último, se realiza la explicación de la arquitectura de la infraestructura tecnológica. En el tercer capítulo se desglosa el entorno tecnológico del sistema de información SIE, para explicar la manera como se interrelacionan los diferentes componentes lógicos del producto *software* desarrollado. En el cuarto capítulo se describe la implementación del sistema de información Socio-Ecológico-SISE, y, en el último capítulo, se detalla la manera como el usuario final podrá interactuar con las herramientas tecnológicas, para así obtener un acceso democrático a la información. Finalmente, se muestran las conclusiones y un glosario de términos técnicos.



1. Contexto General del Proyecto BIO

El proyecto denominado: *Resiliencia y gestión de sistemas socioecológicos estratégicos para la actividad agrícola, en escenarios de variabilidad climática. Caso de estudio: lago Sochagota, Boyacá, Colombia*, en adelante proyecto SIE, se enmarca en el programa Boyacá BIO, de la Gobernación de Boyacá (Gobernación de Boyacá, 2022). Este se orienta a diseñar e implementar una herramienta de gestión de sistemas hídricos con enfoque regional y visión prospectiva en escenarios de variabilidad climática.

La investigación contempla el desarrollo de una solución tecnológica que incorpora herramientas de simulación y Tecnología de la Información y la Comunicación [TIC], para integrar y visibilizar información de interés social y ecológico que facilite la toma de decisiones del orden institucional y comunitario para el manejo del sistema. La herramienta tecnológica permite proyectar la variabilidad climática local a escala diaria durante un año de predicción, con el fin de anticipar la respuesta de los sistemas hídricos en términos de su nivel, caudal y calidad e indicadores estratégicos de sostenibilidad.

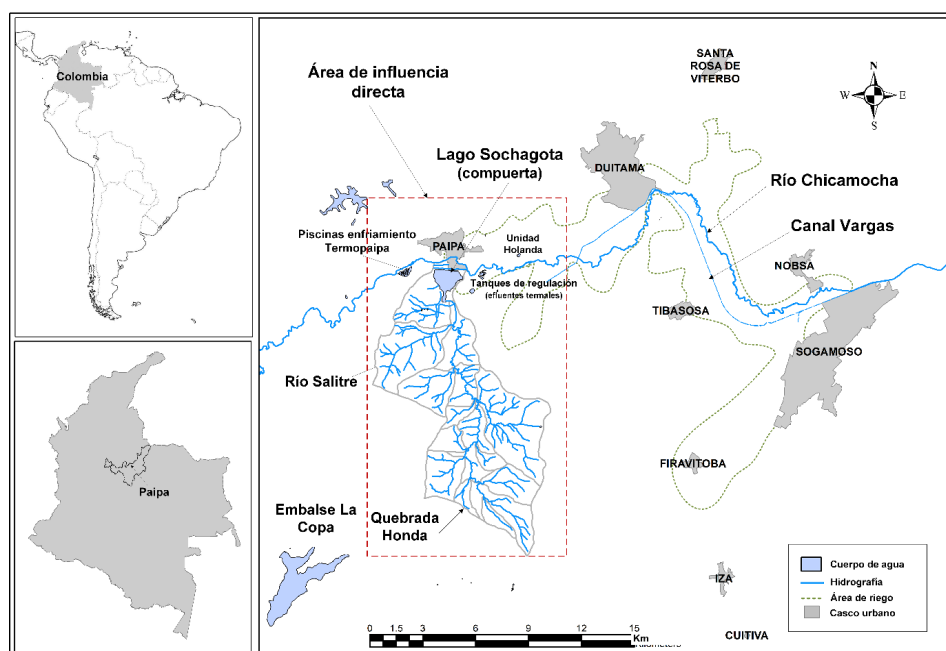
La solución tecnológica se concibe para facilitar la operación de sistemas hídricos lénticos y lóticos interconectados, bajo condiciones de variabilidad climática local. Los modelos de predicción climática y de simulación hidrológica, hidrodinámica y de gestión brindan soporte técnico-científico para la toma de decisiones a partir de la anticipación de la respuesta del sistema frente a diferentes alternativas de manejo. Los indicadores propuestos por la metodología OSSEM (Overall Susceptibility Assessment for Sustainable Environmental Management), (Usaquén Perilla *et al.*, 2012; Usaquén-Perilla, 2017), se adaptan para el desarrollo de la herramienta de gestión y de fortalecimiento de la resiliencia del sistema socioecológico de interés.

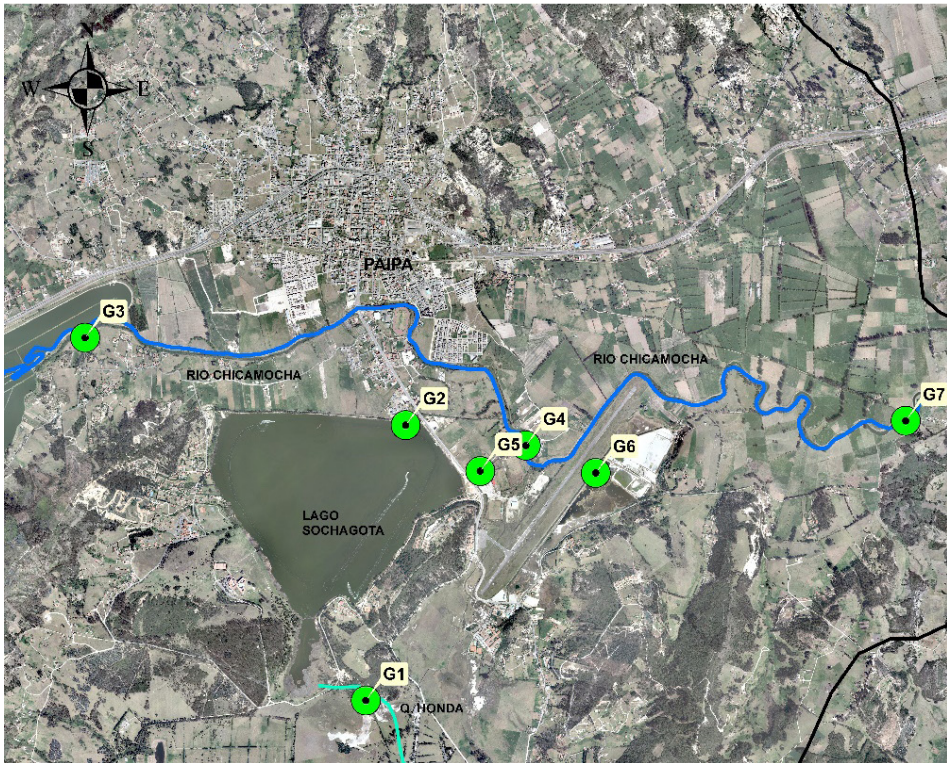
El sistema de información que forma parte de la solución tecnológica permite la integración y transformación de datos generados por actores locales, regionales o del orden nacional e internacional en información útil para la proyección de escenarios de manejo de los sistemas hídricos y, con ello, se busca facilitar la toma de decisiones anticipada y el acceso democrático a tales decisiones, como mecanismo de comunicación oportuna a los actores territoriales y comunitarios.

La toma de decisiones obedece al análisis de los efectos que reflejan los indicadores e índice de sostenibilidad propuestos en la metodología OSSEM, y se calculan en puntos estratégicos de gestión. En el desarrollo de la herramienta se priorizan los efectos de déficit hídrico, salinización y eutrofización, por su afectación a los sistemas socioecológicos del área de influencia del proyecto, que corresponde al lago Sochagota, al recurso termomineral del municipio de Paipa y al sistema agrícola regional.

El área de influencia del proyecto se enmarca en la cuenca alta del río Chicamocha, entre las provincias Centro y Tundama, del departamento de Boyacá. Los subsistemas incluidos en la implementación de la solución tecnológica (figura 1) son la microcuenca de la quebrada Honda y el río Salitre (punto G1), el lago Sochagota (punto G2), un tramo del río Chicamocha (puntos G3, G4, G7) y los sistemas de regulación del agua termomineral utilizada por el sector turístico de Paipa (puntos G5 y G6).

Figura 1. Área de influencia directa e indirecta del proyecto y puntos de gestión prioritizados





Fuente: Usaquén-Perilla, 2017; Universidad de Boyacá, 2020.

La Universidad de Boyacá ha identificado, a través de estudios realizados en la región, tres aspectos importantes que motivan el enfoque del proyecto SIE: (i) la variabilidad climática regional incide en la toma de decisiones de manejo del sistema hídrico; (ii) la toma de decisiones de apertura o cierre de compuertas se realiza de forma reactiva, por parte de un comité interinstitucional y con base en la experiencia de los operadores del sistema, y (iii) las decisiones de manejo se informan a la comunidad (agricultores, ganaderos y turistas, entre otros) con pocos días de antelación y empleando diferentes medios de comunicación.

El Sistema de Información propuesto en el marco del proyecto se diseña con el fin de incorporar en la toma de decisiones de manejo y en su comunicación a la comunidad el análisis previo de la respuesta de los diferentes subsistemas ante eventos climáticos y acciones de operación. El sistema integra los procesos de simulación, planteamiento de escenarios de operación, la toma de decisiones de manejo por parte del Comité Técnico Interinstitucional y el acceso a la información por parte de la comunidad a través de una página web y una aplicación móvil.

El desarrollo de la solución tecnológica incluyó un ejercicio de participación ciudadana durante la etapa de diseño de los diferentes componentes, entre ellos, del modelo de predicción climática con actores institucionales y de la página web con actores comunitarios. Sin embargo, el uso del sistema de información desarrollado en el marco del proyecto SIE está sujeto a contar con la voluntad de adopción de la herramienta por parte de los actores institucionales que conforman el Comité Técnico, y de crear las condiciones administrativas, tecnológicas y financieras para garantizar su funcionamiento y sostenibilidad.

La solución basada en tecnologías de información y comunicaciones, en síntesis, permite:

- Centralizar en un único sistema los datos que sirven de insumo para el planteamiento de los diferentes escenarios de simulación;
- Integrar en un solo sistema los diferentes modelos ambientales (clima, hidrológico, hidrodinámico y de gestión), con el fin de garantizar la secuencia requerida para calcular los indicadores e índices necesarios para proyectar los efectos esperados en cada subsistema ante las decisiones de manejo objeto de análisis;
- Brindar un espacio mediante el cual, a través de simulaciones, se puedan plantear diferentes escenarios de manejo, y obtener reportes que permitan analizar el posible impacto que la propuesta de manejo y gestión tendrá sobre la sostenibilidad del sistema hídrico y socioecológico;
- Un acceso democrático a las decisiones que se proyecten sobre la gestión del sistema.

2. Identificación del Entorno del Sistema

El sistema de información propuesto integra variables ambientales y socioecológicas descritas en la metodología OSSEM, con el fin de ofrecer información técnico-científica, que brinde soporte a los actores institucionales encargados de la toma de decisiones de manejo de los subsistemas objeto de regulación hidráulica. Estas variables se conectan entre sí, a través de una serie de modelos de predicción climática, hidrológica, hidrodinámica y gestión, que forman parte del sistema de información.

En el caso de estudio, el lago Sochagota y los sistemas de almacenamiento de agua termominerales cuentan con compuertas que son operadas por actores locales de la Asociación de Usuarios del Distrito de Riego y Drenaje de Gran Escala del Alto Chicamocha y Firavitoba, Usochicamocha. Las compuertas constituyen el punto de conexión con el río Chicamocha, sistema lótico de gran importancia en la región, por su uso con fines de consumo humano, riego y producción eléctrica, entre otros.

La decisión de apertura o cierre de las compuertas del lago, los tanques de almacenamiento de aguas termominerales, localmente conocidos como “dársenas”, es tomada por un comité técnico conformado por las alcaldías municipales de Paipa, Duitama, Sogamoso, Nobsa, Tibasosa y Santa Rosa de Viterbo, Usochicamocha y Corpoboyacá. Dicha decisión se informa a la comunidad a través de correos electrónicos, páginas oficiales y redes sociales o vía telefónica.

El proceso de conexión y el alcance de los diferentes modelos se describe a continuación:

2.1 Conexión entre Variables Ambientales y Socioecológicas para el Análisis de Indicadores e Índice de Sostenibilidad

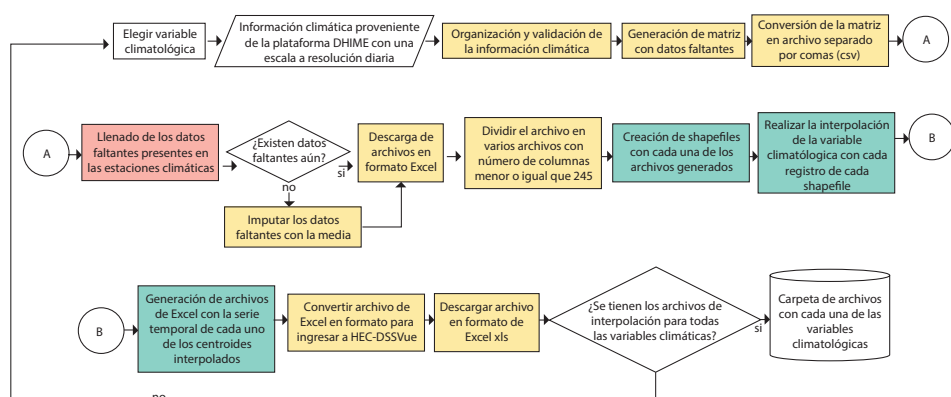
Recolección de datos empleados en los modelos ambientales. Los datos diarios hidrometeorológicos fueron recolectados para un periodo de 33 años, entre los años de 1985 y 2018, esta información fue suministrada por el banco de datos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam) presentes en la plataforma de descarga de Datos Hidrometeorológicos (Dhime). La información histórica de niveles de los sistemas lénticos fue suministrada por la Asociación de Usuarios del Distrito de Riego y Drenaje del Alto Chicamocha y Firavitoba (Usochicamocha). La

información geográfica se obtuvo a través de un modelo de elevación digital con una resolución de 12.5 m y una ortofoto del área de influencia suministrados por la Gobernación de Boyacá. La información sobre el tipo de suelo y los usos de suelo fueron proporcionados por la Corporación Autónoma Regional de Boyacá (Corpoboyacá).

Preprocesamiento de la información. El tratamiento de la información de origen climático proveniente de la plataforma Dhime; se organiza y extrae mediante la programación de un *script* en Python, con el cual se crea una única matriz con un tamaño de $m \times n$, donde m se refiere al intervalo diario de fechas y n hace referencia al número de estaciones por variable climática.

Los datos hidrometeorológicos fueron recolectados y procesados a una escala diaria. Se identificaron los datos faltantes y se eliminaron los valores atípicos, realizando una adaptación de la metodología de Chow *et al.* (1988), en función de la variable climatológica. Teniendo como base estos conjuntos de datos, se procedió a completar los datos faltantes, para llevar a cabo posteriormente la discretización espacial de la información mediante una técnica de interpolación geoestadística. Este procedimiento se realizó con las series temporales de precipitación, temperatura, evaporación, velocidad del viento y humedad relativa de cada una de las estaciones presentes en el área de estudio (figura 2).

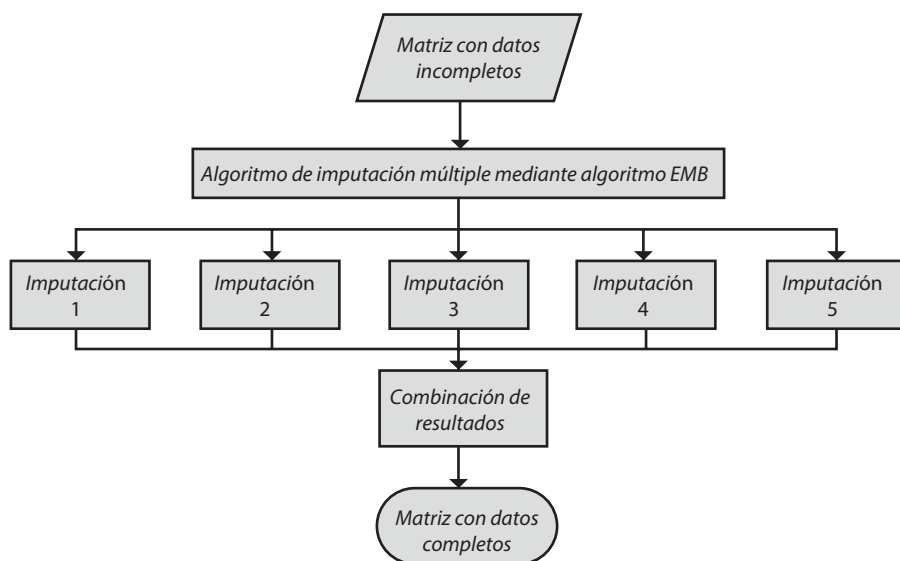
Figura 2. Metodología para el tratamiento de la información climática



Fuente: Universidad de Boyacá, 2020.

La identificación y la estimación de los datos faltantes es una tarea de suma importancia para los diferentes estudios de carácter hidrológico y ambiental, pues es muy común encontrar vacíos de información en las series reportadas por las estaciones (figura 3). Existen diferentes razones que llevan a la generación de datos faltantes en una estación, como la ausencia de operadores, fallas instrumentales y fallos en la transmisión de información (Hasanpour Kashani y Dinpashoh, 2012).

Figura 3. Algoritmo para el llenado de datos faltantes



Fuente: Universidad de Boyacá, 2020.

Actualmente, existen diferentes técnicas que permiten realizar el completado de datos faltantes, las cuales van desde métodos simples y empíricos, como promedio aritmético e interpolaciones simples (Hasanpour Kashani y Dinpashoh, 2012) hasta métodos más complejos, como el empleo de redes neuronales (Nkuna y Odiyo, 2011) y técnicas de imputación de datos (Habibi *et al.*, 2015).

El método de imputación múltiple ha sido validado para series hidrológicas (Gao *et al.*, 2018; Habibi *et al.*, 2015) y se empleó para completar las series temporales de las diferentes variables climatológicas requeridas para la modelación ambiental. En el marco del proyecto SIE, se desarrolló un *script* en Python, el cual permitió organizar la información disponible en la plataforma

Dhime del Ideam en una sola matriz, e identificar plenamente las celdas con datos perdidos en las estaciones de interés.

La matriz con datos faltantes fue exportada en un formato csv, e importada en la interfaz gráfica de Amelia II (Honaker *et al.*, 2018), para realizar el proceso de imputación múltiple ($m = 5$), resultando en n archivos de Excel, equivalentes al número de imputaciones realizadas. Amelia II es un paquete desarrollado en el lenguaje de programación R, el cual asume que tanto los datos observados como los valores faltantes siguen una distribución normal multivariada.

El *software* Amelia II permite generar múltiples imputaciones en los datos faltantes mediante el algoritmo EMB (Expectation-Maximitation with Bootstraping) (Horton y Kleinman, 2007), y mediante el *script* en Python, los valores estimados se calculan como el promedio de los valores sustituidos, lo cual según Medina y Galván (2007) garantiza que se mantenga la variabilidad en la matriz de datos completa.

Finalmente, se llevó a cabo la discretización espacial de la información, mediante una técnica geoestadística de interpolación denominada EBK-Regression Predictor. Para desarrollar esta metodología, se implementó el paquete de Python y ArcGIS: ArcPy, el cual permitió la automatización y optimización del proceso de interpolación diaria de la información. Para efectos de la investigación únicamente se extrajo información de todas las variables climáticas, en los centroides asociados a cada una de las microcuencas, posteriormente en la interfaz de HEC-DSSVue se exporta la información en un formato compatible con el modelo hidrológico.

Modelo de predicción climática. El modelo SIE-clima es una herramienta metodológica y tecnológica, que permite proyectar a escala diaria o mensual, el comportamiento anual de dos (2) variables climáticas (precipitación y temperatura) en una estación o zona de referencia (Sierra-Cárdenas *et al.*, 2022). La proyección de las series climáticas se realiza a partir de la información histórica local (preprocesada) y de la caracterización del fenómeno de variabilidad climática a escala global (índice macroclimático) que mayor incidencia (correlación) presente en el área de estudio.

La metodología para el desarrollo del modelo de predicción incluye el análisis de la información climática y la validación estadística de los resultados del modelo. El análisis permite la definición de la escala espacio-temporal, la selección de

las variables y las estaciones climáticas en el punto de interés y la identificación de la respuesta local a fenómenos macroclimáticos, que inciden en la variabilidad climática intraestacional, interanual e interdecadal. La validación estadística reúne las pruebas empleadas en el desarrollo del modelo de predicción para validar sus resultados, cuya aplicación se orienta a anticipar la respuesta hidrológica e hidrodinámica de los sistemas socioecológicos con fines de gestión.

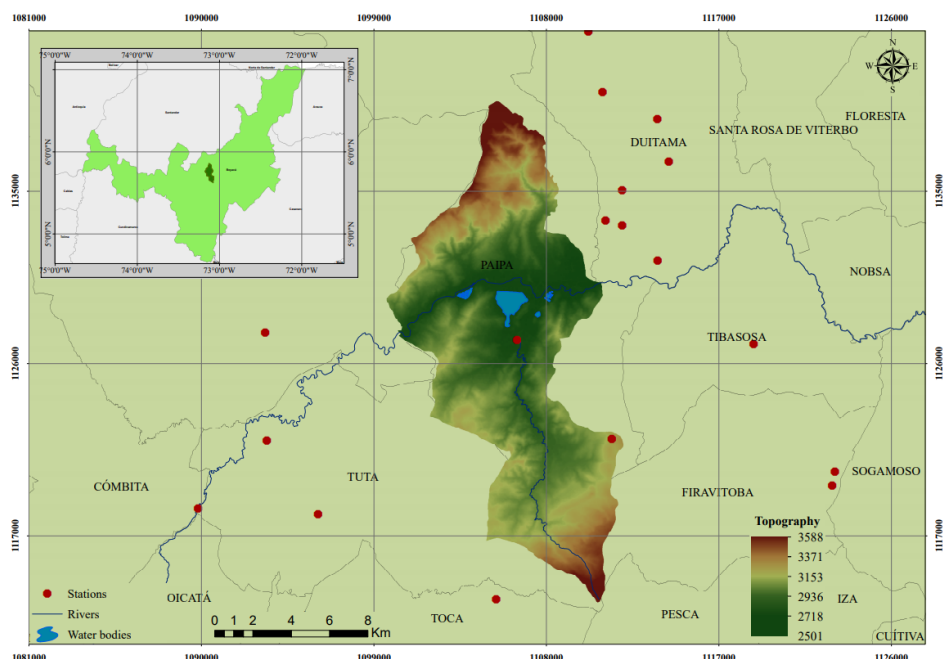
El método desarrollado requiere identificar en la base de datos configurada a nivel local (base de datos completa) y global (base de datos con índice macroclimático correlacionado) los acontecimientos meteorológicos históricos previos al periodo de predicción y, a partir de estos, encuentra tres series representativas del comportamiento de las variables climáticas objetivo en el periodo de interés y en la estación de referencia.

La herramienta de predicción SIE-Clima ofrece la potencialidad de configuración y adaptación para diferentes cuencas o regiones. En sistemas con información dispersa o incompleta, la disponibilidad de datos climatológicos históricos confiables es la principal fuente de incertidumbre. La reconstrucción de la serie climática descrita es un aspecto importante para garantizar la fiabilidad de los resultados y la aplicación de la metodología.

La delimitación del sistema (microcuenca o cuenca de interés) para el estudio hidrológico, hidrodinámico y de gestión, la localización y la variabilidad topográfica, morfológica y del clima regional son factores de interés para la definición de la escala espacial y de las estaciones climáticas que se incluyen en el modelo de predicción (figura 4). Así mismo, se tiene en cuenta la disponibilidad de información y la tipología de las estaciones cercanas a la microcuenca o sistema, como un factor condicionante de la delimitación del área de influencia del estudio.

En relación con la escala temporal, el modelo estima las condiciones diarias del clima durante un año de gestión. Esta escala es adecuada para la toma de decisiones en la operación y manejo de los sistemas hídricos de interés, en el cambio estacional de cultivos o en la incidencia y frecuencia estacional de enfermedades ligadas a las condiciones climáticas (Amador y Alfaro, 2008). Por su enfoque metodológico, el modelo incluye la variabilidad estacional histórica, con lo cual se incorpora el efecto en el clima local de los fenómenos macroclimáticos, como el de El Niño y La Niña y el cambio climático, entre otros.

Figura 4. Variación topográfica del área de estudio y distribución geográfica de las estaciones hidrometeorológicas



Fuente: Universidad de Boyacá, 2020.

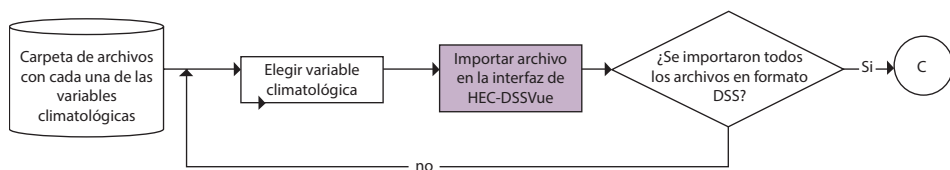
La definición de las variables priorizadas para el desarrollo del modelo de predicción parte del análisis de estudios previos, en los cuales se identifican las variables con mayor variabilidad a escala regional. La precipitación se considera la variable crítica por su mayor variabilidad intra e interanual, con una media anual en la estación Tunguavita (Paipa, Boyacá) de 977.1 mm y un rango de variación de 0 a 77 mm. d-1, predominando el régimen bimodal a lo largo de los años. La temperatura es una variable que se relaciona con los fenómenos climáticos de macro y microescala, por lo tanto, se prioriza para el desarrollo del modelo de predicción, aunque su variabilidad es inferior a la de la precipitación, siendo su media anual de $13.7 \pm 0.8^\circ\text{C}$.

Modelo hidrológico. El sistema de modelamiento hidrológico (HEC-HMS) es un *software* de uso libre, desarrollado por el cuerpo de ingenieros de las fuerzas armadas de los Estados Unidos, y permite modelar tanto eventos independientes como períodos continuos en diferentes componentes del ciclo hidrológico en el sistema de interés. El modelo HEC-HMS es un modelo semidistribuido

que tiene en cuenta la distribución espacial del clima y del tipo de suelo en la cuenca (Feldman, 2000); como resultado de la simulación hidrológica, se obtiene el caudal de la cuenca o microcuenca en puntos de gestión predefinidos y se continúa el proceso de modelación hidrodinámica.

La configuración del modelo hidrológico parte de la importación de datos climatológicos con el apoyo de la herramienta HEC-DSSVue (figura 5), mediante un proceso de entrada manual de archivos en Excel. Esta base de datos en formato DSS puede ser empleada en cualquier *software* del Centro de Ingeniería Hidrológica (HEC). Así mismo, en la presente investigación, se empleó la herramienta HEC-GeoHMS para realizar la delimitación de las zonas de drenaje dentro del área de estudio. Producto de esta delimitación, el área fue dividida en 29 microcuencas, dentro de las cuales están 12 presentes en Quebrada Honda, y 17, en la zona alta del río Chicamocha.

Figura 5. Metodología para el procesamiento de datos en HEC-DSSVue



Fuente: Universidad de Boyacá, 2020.

Posterior a la delimitación de las áreas de drenaje y de las microcuencas, se exportó la información en la herramienta de HEC-HMS para realizar el proceso de simulación hidrológico, previo completado de los parámetros del modelo con información de referencia y con la información climática determinada mediante el modelo de predicción climática. Este modelo arroja tres series de datos diarios para la precipitación y la temperatura; para las demás variables necesarias para la modelación hidrológica, se adoptan los registros existentes en la base de datos histórica, correspondientes con los años predichos para la variable crítica.

Modelo simplificado hidrodinámico de sistemas lénticos. La modelación hidrodinámica de los sistemas lénticos se desarrolló a partir de una adaptación al modelo de cajas propuesto originalmente por Usaquén Perilla (2017). Los modelos adaptados simulan el comportamiento medio del lago en cuanto a su

calidad e hidrodinámica (Li *et al.*, 2015); el modelo de cajas refleja la afectación ocasionada principalmente por los vertimientos y las abstracciones, propios de la dinámica del sistema.

Los modelos hidrodinámicos calculan en primera instancia la variación del nivel, en función de los caudales afluentes y efluentes al cuerpo hídrico a lo largo de la serie temporal. Además, de acuerdo con el mecanismo de desagüe del sistema (compuertas, sistemas de bombeo) es posible cuantificar el caudal efluente por cada sistema de regulación.

Con el objetivo de llevar a cabo la simulación en los sistemas lénticos del área de estudio, se desarrollaron dos códigos en Python que permitieron realizar dichas simulaciones hidrodinámicas. Para esto, se empleó la información calculada en la fase anterior, la cual sirvió como insumo para el cálculo del balance hídrico y el balance de masas en cada uno de los cuerpos lénticos. Luego, se establecieron las condiciones iniciales en ambos sistemas (lago Sochagota-Dársena 1-Dársena 2), los cuales, al no tener interacción entre ellos, se simularon en paralelo.

Las condiciones iniciales incluyeron la salinidad inicial del sistema, el nivel de arranque y las condiciones de operación: apertura de compuertas (lago Sochagota y Dársena 2), caudal de transvase (lago Sochagota) y las horas de bombeo (Dársena 1). Posterior al cumplimiento de este requisito, se llevó a cabo la simulación de los dos sistemas teniendo en cuenta las tres series climáticas obtenidas para el año de gestión predicho.

Finalmente, este desarrollo en Python permite la determinación de los indicadores socioecológicos (potenciales de renovación, salinización y déficit hídrico) y el cálculo del índice de susceptibilidad conjunta (OSI) para los sistemas del lago Sochagota, Dársena 1 y Dársena 2. Además, se almacenó la información de caudales y las salinidades efluentes de los sistemas de lago Sochagota y Dársena 1, los cuales son insumos para la fase posterior de modelación hidráulica del sistema lótico con el que se conectan (río Chicamocha).

Modelo hidráulico para sistemas lóticos. El cálculo de los potenciales e indicadores socioecológicos en los sistemas lóticos requiere conocer ciertos parámetros hidráulicos (calado y radio hidráulico de las secciones), para lo cual se desarrolló un modelo hidráulico de los cauces presentes en el área de estudio (río Chicamocha y quebrada Honda) empleando las herramientas HEC-RAS y HEC-GeoRAS.

HEC-RAS es un sistema integrado de *software*, diseñado para uso interactivo en un entorno multitarea. El sistema consta de una interfaz gráfica de usuario (GUI), componentes de análisis separados, capacidades de gestión y almacenamiento de datos, gráficos y funciones de informes (US Army Corps of Engineers, 2000).

El sistema HEC-RAS permite la simulación de los siguientes componentes para el análisis de ríos: cálculos del perfil de la superficie del agua de flujo constante, cálculos de transporte de sedimentos en límites móviles de flujo inestable unidimensional y/o bidimensional y análisis de la calidad del agua (US Army Corps of Engineers, 2000).

Una vez importada la información hidrológica de las microcuencas de interés, se vincularon los archivos de salida de HEC-HMS (caudales) a las secciones correspondientes dentro del modelo hidráulico, y se realizó un procesamiento por lotes para obtener simulaciones diarias en estado estacionario y con régimen mixto.

Finalmente, se emplearon los resultados obtenidos en HEC-HMS y HEC-RAS como insumos para el modelo de dispersión axial, el cual se desarrolló en Python, y permitió el cálculo de la salinidad en diferentes puntos del cauce. Con estos resultados se determinaron los indicadores socioecológicos y se calculó el índice de susceptibilidad conjunta (OSI) para el sistema de quebrada Honda, y, en el caso del subsistema río Chicamocha, el modelo integró los resultados obtenidos en los modelos hidrodinámicos del lago y el sistema Dársena 1-Dársena 2.

Modelo de gestión mediante el uso de los indicadores socioecológicos e índice de susceptibilidad conjunta OSI. Los sistemas lénticos (lagos, lagunas, estanques) están expuestos a presiones antropogénicas, entre ellas, las actividades agrícolas. Estas presiones suelen tener un impacto a nivel socioecológico, puesto que generan efectos como el aumento en la concentración de nutrientes, el incremento de la carga contaminante sobre el cuerpo y cambios en la salinidad natural (McLusky y Elliott, 2007, citado en Usaqué Perilla *et al.*, 2012).

Los efectos comunes que se identifican en los sistemas hídricos son generadores de cambios paulatinos dentro del propio cuerpo de agua y en los sistemas adyacentes con los cuales se conectan, hasta el punto de afectar significativamente sus dinámicas naturales. En el año de 2012, la metodología OSSEM

(Overall Susceptibility Assessment for Sustainable Environmental Management), propone el uso de indicadores socioecológicos y su integración a través del índice OSI, para la gestión conjunta de los aspectos ambientales y humanos que afectan la sostenibilidad de los sistemas socioecológicos en los cuales se desarrolla actividad agrícola (Usaquén Perilla *et al.*, 2012).

Teniendo en cuenta que dicha metodología parte de la hipótesis de que el sistema acuático asociado al área de interés presenta susceptibilidad a desarrollar problemas de eutrofización, cambios de salinidad y déficit hídrico, que comprometen alcanzar los objetivos, límites o metas del sistema socioecológico (Usaquén Perilla *et al.*, 2012), se desarrolla una serie de modelos que contribuyen a determinar los indicadores y el índice de susceptibilidad (OSI) en sistemas lénticos y lóticos interconectados en el marco del proyecto SIE.

En la presente investigación se desarrollaron herramientas computacionales que permiten evaluar la situación actual de la zona de estudio y generar futuros escenarios de manejo para una mejor gestión del sistema en su conjunto. Las herramientas de simulación ambiental permiten calcular los tres indicadores socioecológicos: el potencial de renovación (PR), el potencial de salinización (PS) y el potencial de déficit hídrico (PWD).

El potencial de renovación es el indicador que caracteriza la susceptibilidad de un dominio frente a la eutrofización. El potencial de salinización evalúa la posibilidad de que un dominio supere unas salinidades de referencia, las cuales representan el máximo contenido de sales disueltas que admite una actividad (crítica) bajo diferentes condiciones o límites de aceptabilidad. El potencial de déficit hídrico evalúa la susceptibilidad frente a la disponibilidad del recurso para los subsistemas natural y humano, es decir, a presentar o no un déficit o descenso en el nivel con respecto a niveles de referencia y a los requerimientos mínimos ambientales o recurso base.

El desarrollo de la metodología de integración de los modelos numéricos de simulación (climáticos, hidrológicos e hidrodinámicos) se orienta a analizar las dinámicas del sistema y a cuantificar los indicadores de susceptibilidad para cada punto de interés (G1 a G7 (figura 1)). La integración de estos indicadores se realiza a través del índice OSI, y permite evaluar el manejo de cada subsistema como parte de un sistema mayor que los conecta.

El índice OSI (Overall Susceptibility Index) integra la susceptibilidad de los tres descriptores estratégicos y permite clasificar en cuatro niveles de priorización, la gestión ambiental durante el ciclo de gestión predicho o seleccionado, con lo cual se evalúa si cada subsistema tiende o no a ser sostenible frente a los efectos priorizados de salinización, déficit hídrico y eutrofización.

Software empleado para el desarrollo de los modelos ambientales. Las herramientas de modelación empleadas para establecer las interacciones entre variables ambientales en los diferentes sistemas del área de estudio se describen a manera de síntesis en la tabla 1. Estos modelos se operan con el apoyo del sistema de información y de un comité técnico que se denomina BIO-Ambiental que facilita el proceso de intercomunicación de los modelos: climático, hidrológico, hidrodinámico y de gestión, bajo diferentes escenarios de manejo. Dichos escenarios se evalúan por parte de un comité interinstitucional y, luego de tomar las decisiones de operación, comunica a través del sistema (página web) los resultados a la comunidad interesada en la gestión del sistema.

Tabla 1. *Herramientas computacionales empleadas en la modelación ambiental*

software	Uso	Referencia
Amelia II	Completado de series temporales	Honaker, King, y Blackwell from a time series (like variables collected for each year in a country)
ArcGIS (ArcMap)	Visualización de datos geoespaciales, delimitación de las cuencas empleando un modelo de elevación digital (DEM), generación de cartografía	ESRI
ArcPy	Interpolación de los datos climáticos	ESRI
HEC-DSSVue	Migración de datos entre modelos HEC	US Army Corps of Engineer
HEC-HMS-HEC-GeoHMS	Simulación de los procesos hidrológicos en las cuencas	US Army Corps of Engineer

software	Uso	Referencia
HEC-RAS-HEC-GeoRAS	Modelación hidráulica de los cauces principales (quebrada Honda y río Chicamocha)	US Army Corps of Engineer
Python	Automatización de procesos de organización, depuración y validación de las series temporales, simulación de los sistemas lénticos (lago Sochagota y sistema dársenas), generación de los indicadores socioecológicos y cálculo del índice de susceptibilidad conjunta (OSI)	Python Software Foundation

Fuente: Universidad de Boyacá, 2020.

Partiendo de la propuesta de aplicar la metodología OSSEM para la integración de información ambiental como herramienta de apropiación social del conocimiento, se definió como área de estudio, el municipio de Paipa, que constituye un sistema socioecológico piloto a partir del cual se da la aplicación de la metodología OSSEM, con el fin de desarrollar una herramienta de gestión para el fortalecimiento de la resiliencia del sistema socioecológico asociado al lago Sochagota, al recurso termomineral del municipio de Paipa, y a las dinámicas agrícolas regionales bajo escenarios de variabilidad climática, objetivo general del proyecto BIO-293.

La herramienta de gestión integra información de actores regionales y se apoya en bases de datos globales para conocer las dinámicas socioecológicas (climáticas, hidrológicas, hidráulicas y de calidad del agua del sistema, entre otras), las cuales se integran a través de los descriptores estratégicos (potencial de renovación, potencial de salinización y potencial de déficit hídrico) y el índice OSI.

Este flujo de información se vincula con el sistema de información a través de bases de datos que almacenan información histórica y nueva información proporcionada por los gestores regionales. Esta se analiza haciendo uso de herramientas de modelación hidrológica, hidrodinámica y de gestión con dos propósitos principales:

1- Desarrollar una herramienta, de base hidrodinámica multidimensional, para el planteamiento de estrategias de gestión y operación del sistema bajo

escenarios de variabilidad climática con enfoque regional, que pueda ser empleada por una mesa técnica representativa de los diferentes actores del sistema.

2- Brindar una herramienta con apoyo en estrategias y tecnologías de la información y la comunicación (TIC), que permita a los diferentes actores y observadores regionales evaluar y tomar decisiones frente a la operación del sistema y a las posibles actuaciones futuras de ordenamiento del territorio o de manejo del agua, así como comprender los efectos e implicaciones de tales decisiones a nivel individual, sectorial y regional.

La herramienta de gestión integra entonces información del sistema socioecológico mediante herramientas tecnológicas y de modelación de sistemas ambientales, para ofrecer a los actores regionales un sistema de información y una estructura organizacional, que pueda construir una visión unificada de los efectos y del estado del sistema socioecológico, buscando contribuir con la toma de decisiones de operación, manejo y gestión del agua de una manera técnico-científica y participativa.

La construcción de esta visión unificada del sistema socioecológico exige además una participación comunitaria activa, acuerdos de voluntades y alianzas estratégicas, que se apoyen en TIC (página web, app, medios de comunicación) y en estrategias pedagógicas que permitan democratizar el acceso y la comprensión de la información allí proporcionada. La selección de la información visible para todos, así como la accesibilidad y representación de ella forman parte del proceso de participación ciudadana activa. Finalmente, el proceso y desarrollo de la herramienta de gestión se orienta en particular a compartir y comprender información de utilidad en contextos agropecuarios, turísticos, de servicios públicos (acueductos), institucionales y de la sociedad civil organizada en el área de estudio, asociada con tres efectos priorizados en esta etapa del proyecto BIO-293: déficit hídrico, salinización y eutrofización.

Debido a los diferentes elementos que se integraron en la herramienta TIC que se desarrolló, se plantea y construye una solución tecnológica con tres componentes principales: sistema de información socioecológico, sitio web y aplicación móvil. Con ello se busca brindar una solución que permita a los diferentes actores tener acceso a información relacionada con la gestión del recurso hídrico, de acuerdo con el rol que desempeñan.

Por tal razón, el proyecto se subdividió en los tres componentes mencionados, con el fin de implementar la solución de una manera más eficiente y eficaz, teniendo en cuenta la complejidad de la solución, tiempo para su desarrollo, presupuesto y el número de integrantes del equipo encargado de su desarrollo.

A continuación se presenta una síntesis de cada uno de los componentes.

El sistema de información (SISE, sistema de información socioecológico) es el encargado de permitir el ingreso de los datos proporcionados por las fuentes externas a la base de datos del sistema, dichos datos han sido previamente validados y completados por el equipo ambiental, para luego permitir realizar las demás actividades del proceso requerido para la definición de escenarios, ejecución del proceso de simulación, generación de reportes y toma de decisiones. Este sistema hace posible la gestión de la Mesa Técnica Ambiental y la Mesa Técnica Principal, el planteamiento de escenarios de simulación y la generación de reportes de dichos escenarios, con el fin de facilitarle a la Mesa Técnica Principal la toma de decisiones sobre cómo se va a gestionar el recurso agua en un periodo a un año. Estas decisiones son compartidas a la comunidad por medio del sitio web y de la aplicación móvil.

El sitio web es el mecanismo que ofrece un acceso democrático a la información y adicionalmente presenta la explicación de cómo interpretar los potenciales (salinización, eutrofización y déficit hídrico) y el índice OSI. Presenta el mapa del área de influencia con los siete puntos de referencia en cada uno de los cuales se pueden consultar los potenciales, reglas de operación e índice OSI, con lo cual se ofrece la posibilidad de contar con información que permite una toma de decisiones acorde con la gestión que se va a realizar sobre el recurso del agua.

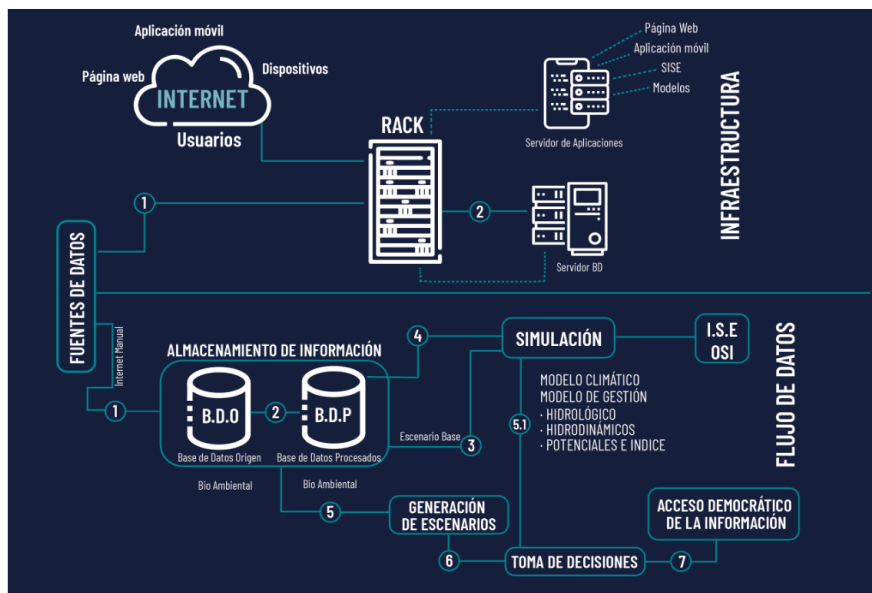
La aplicación móvil ofrece la posibilidad de consultar la gestión que se realizará sobre el recurso del agua, siendo otra forma de contribuir a un acceso democrático a la información.

Este libro está enfocado en detallar el SISE, dado que es el punto de partida para realizar cualquier proceso que se requiera en relación con la gestión del recurso agua en el área de influencia del proyecto.

Para abordar el desarrollo del SISE, se diseñó e implementó una infraestructura tecnológica que permite soportar las aplicaciones y los datos necesarios para

dar solución a la problemática planteada; esto apoyado en la red de datos de la Universidad de Boyacá, donde se configuró la infraestructura IT necesaria para un adecuado funcionamiento de la solución. Es importante resaltar que los componentes de *hardware* fueron adquiridos con los recursos facilitados por la entidad patrocinadora, tal como se observa en la figura 6.

Figura 6. Arquitectura de la infraestructura de tecnologías de información



Fuente: el estudio, elaboración propia de los autores.

La figura 6 está compuesta por dos grandes componentes y un eje central, que son las fuentes de datos, siendo estas últimas el punto de partida del proceso que se realiza tanto para el almacenamiento de los mismos como para su procesamiento; el primero hace referencia al flujo de datos que se sigue para el tratamiento y procesamiento, para luego ser almacenados en la base de datos y, de allí, ser obtenidos por los diferentes procesos de simulación hasta lograr los resultados de los posibles escenarios de gestión del recurso agua y, con base en ellos, tomar las decisiones que serán informadas a la comunidad, para de esta manera garantizar un acceso democrático a la información.

Por otra parte, en la parte superior de la figura 7 se presenta el esquema general de la infraestructura que se diseñó y configuró para soportar la aplicación y los procesos que se requieren para cumplir con el objetivo del sistema. Es por ello

que se cuenta con un *rack* de comunicaciones, en el que se conecta el servidor a un *switch*; esto ubicado en el Centro de Datos de la Universidad de Boyacá, Sede Tunja. El servidor está configurado de manera lógica para soportar por un lado el sistema manejador de bases de datos y, por otro, el servidor de aplicaciones. Dicho servidor tendrá alojados la aplicación SISE, el sitio web y la app.

Con el fin de abordar el proyecto de una manera estructurada, se identificó un *middleware* como el que se presenta en la figura 7, en la cual se pueden observar las tres vistas definidas: la primera hace referencia a la vista del usuario, que está relacionada con la interfaz del SISE, el sitio web y la app; la segunda vista es la de desarrollo, hace referencia a las herramientas de *software* que se utilizaron para la programación de la solución tecnológica, y, finalmente, la vista del servidor, en la cual se encuentra el sistema operativo, el sistema manejador de bases de datos y el servidor de aplicaciones, donde también se alojan los modelos ambientales utilizados.

Figura 7. Middleware de la solución tecnológica



Fuente: el estudio, elaboración propia de los autores.

Como se observa en la figura 7, y con el fin de garantizar la gobernanza del proyecto a largo plazo, se optó por el uso de *software* libre para la implementación de la solución tecnológica, para lo cual se definieron las siguientes herramientas:

Sistema operativo. Se definió como sistema operativo a Linux CentOS 8.0 para el computador (servidor) que soporta la base de datos y servidor de aplicaciones, dado que es un sistema operativo que ofrece un adecuado nivel de seguridad tanto para los datos como para la aplicación, puesto que permite la configuración de *firewall* y de política de seguridad. Así mismo, no requiere muchos recursos de *hardware* para su instalación y funcionamiento.

Sistema manejador de base de datos (SGBD). El sistema manejador de base de datos que se empleó para construir la base de datos, almacenar datos y realizar la respectiva gestión de usuarios es PostgreSQL, debido al volumen de datos que el proyecto requiere manejar; este SGBD ofrece las características necesarias para lograr una eficiente y eficaz gestión de los mismos.

Servidor de aplicaciones. Las aplicaciones (sistema de información, sitio web y app) que se desarrollaron fueron alojadas en el servidor de aplicaciones Apache II, el cual fue instalado en el computador (servidor) del proyecto, donde se alojaron todos los componentes *software* de las aplicaciones mencionadas.

Tanto el sistema manejador de base de datos y el servidor de aplicaciones se encuentran instalados en una misma máquina física, lo cual se integra en la capa del servidor.

La segunda capa del sistema se ha denominado “Desarrollo”, y hace referencia a las herramientas utilizadas para el desarrollo de los diferentes productos tecnológicos.

Herramientas de desarrollo. Las herramientas usadas para los productos tecnológicos son:

SISE. Para el *back end* se utilizó el lenguaje de programación Python y Django como *framework* de desarrollo de código abierto; para el *front end* se desarrolló con el *framework* Angular versión 8, Bootstrap para Css, Html5 y Typescript, y como motor de base de datos, PostgreSQL versión 10.6.

Sitio web. Se implementó el sistema de gestión de contenidos Joomla con lenguaje de programación Php, Html5, Css3, JavaScript y como motor de bases de datos, MySql.

App. Se desarrolló con el *framework* Flutter para sistemas operativos Android.

La capa superior del modelo es la de “Usuario”, la cual permite la interacción del cliente final con las herramientas tecnológicas implementadas.

Interfaz de usuario. Para el proyecto se desarrollaron tres herramientas con las cuales el usuario puede interactuar directamente, y así conocer la información generada; estas son: sistema de información Socioecológico, **SISE**; sitio web **SIE** y aplicación móvil. Para cada una de las cuales se desarrolló el respectivo *front end*, incluyendo características de usabilidad para garantizar la adecuada interacción del usuario con la aplicación.

Teniendo en cuenta el objetivo del libro, el cual es presentar de manera estructurada la forma en que se construyó la solución tecnológica SISE, a partir de este punto se hará referencia únicamente a este producto.

Tomando en consideración lo expuesto, el SISE se estructuró en módulos funcionales, con el fin de poder abordar el desarrollo del producto, dada la magnitud del mismo. Es por ello que se identificaron los siguientes módulos: Administración Básica, Configuración, Datos de Gestión, Mesa Técnica Ambiental y Mesa Técnica Principal. Estos a su vez se abordaron desde dos ópticas: *front end*, el cual está relacionado con la interacción del usuario con el sistema por medio de interfaces que permiten el ingreso y visualización de información, y el otro componente es el *back end*, el cual se encarga de la lógica del negocio y la comunicación con la base de datos. Esta arquitectura presenta como ventaja la flexibilidad frente a la implementación de ajustes o nuevas funcionalidades que se deban incorporar, dado que al ser manejado de manera independiente solo se afecta el proceso que requiere dicho ajuste. Así mismo, cada componente puede ser desarrollado en una herramienta TI diferente gracias al uso de las API-REST, que permite la comunicación entre los diferentes componentes del *software*.

A continuación se presenta el entorno tecnológico del sistema, en el cual se integran los diferentes componentes concebidos para lograr una solución funcional que responde a la problemática identificada en el área de influencia del proyecto.

Capítulo 3

3. Entorno Tecnológico del Sistema de Información SIE



El sistema de información que se desarrolló presenta ante la comunidad la herramienta de gestión propuesta, para lo cual se tienen en cuenta los aspectos que lo soportan, como:

- Recolección, validación e inserción de datos en la base de datos;
- Ejecución del modelo de clima;
- Ejecución de modelos ambientales;
- Definición de escenarios para simulación;
- Toma de decisiones por parte de la mesa técnica;
- Generación potenciales e índices;
- Generación de reportes con información para soportar la toma de decisiones.

3.1 Arquitectura General Conceptual del Modelo Propuesto

Con el fin de tener una visión general de qué papel desempeña cada modelo y cómo están interrelacionados para lograr una sinergia que permita generar los datos que soportarán la toma de decisiones, a continuación se realiza una descripción de la manera como estos son empleados en el proyecto.

El proceso inicia con la recepción y validación de los datos, con el fin de realizar el completado de los mismos, este proceso lo realizan por medio de técnicas establecidas para tal fin, las cuales son implementadas por el equipo BIO-Ambiental. Una vez los datos están listos se implementó un algoritmo que lee los archivos con los datos validados y los almacena en la base de datos.

El punto de partida para el proceso de simulación ambiental es el modelo clima, cuyo objetivo principal es generar tres series de tiempo que serán el insumo inicial para el resto de modelos. Estas series de tiempo se obtienen mediante un algoritmo que fue diseñado por el equipo BIO-Ambiental, el cual se desarrolló en el lenguaje de programación Phyton por el equipo BIO-TI.

La simulación se realiza con la ejecución sucesiva de los tres modelos ambientales, donde las salidas de uno son la entrada del otro, para finalmente lograr obtener los potenciales y el índice OSI, los cuales son los referentes para la toma de decisiones. A continuación se describe este proceso.

El área de estudio del proyecto cuenta con los siguientes grandes subsistemas: quebrada Honda (sistema lótico), área hidrográfica que drena directamente al lago Sochogota (sistema léntico) y, posteriormente, esta descarga sus aguas al río Chicamocha (sistema lótico).

En paralelo se cuenta con un sistema de dos dársenas (sistema léntico, este sistema almacena aguas salinas que son recolectadas del sistema turístico del municipio de Paipa), las cuales también vierten sus aguas al río Chicamocha.

El proceso de simulación continúa con la ejecución del modelo hidráulico (HEC-RAS), en el que se configuran todos los parámetros necesarios para generar las salidas que de quebrada Honda deben llegar al lago Sochagota. Posteriormente, se continúa con el modelo hidrológico (HEC-HMS), el cual se plantea a través de un modelo de simulación continua, por medio de la interacción climática, para lograr describir el comportamiento de los caudales de acuerdo al régimen climatológico o régimen precipitación, evaporación o demás variables climáticas. De estas simulaciones se obtuvo un modelo que genera una serie de caudales continuos desde 1975 hasta 2019, teniendo en cuenta la calibración y validación respectiva. Es importante aclarar que algunos modelos (HEC-RAS y HEC-HMS) son ejecutados externamente, por lo cual el proceso de sistematización requiere las entradas provenientes de las bases de datos para ser entregados a estos, que un operador realice la ejecución de los mismos y, finalmente, por medio de algoritmos almacenar las salidas de estos en la base de datos.

Continuando con el proceso de ejecución de las simulaciones de los modelos, ahora se ejecuta el modelo hidráulico, del cual se obtiene la hidrodinámica del cauce principal quebrada Honda, y de esta manera verificar la forma de cuantificar los potenciales en ese punto de gestión, para lo cual se ingresaron los caudales hidrológicos a este modelo, lo que genera como resultados los niveles. Por otro lado, para el cálculo de índices se requieren los datos de la variable salinización, por lo tanto, se realizó un modelo que tiene en cuenta un constituyente conservativo basado, logrando su transporte a través del cauce.

Teniendo en cuenta las salidas del modelo hidráulico y del modelo hidrológico, se ejecuta el modelo de gestión para obtener la salinidad en diferentes puntos de gestión, insumos necesarios para la ejecución del cálculo de los tres indicadores y del índice OSI.

Posteriormente, se ejecuta el modelo de Gestión (que es un modelo simplificado) del lago Sochagota, el cual requiere los caudales y salinidad provenientes de quebrada Honda y otras fuentes hídricas aportantes al sistema. Se obtiene de esta manera la dinámica de los niveles alrededor del ciclo de gestión, el comportamiento de salinidad y la renovación en el sistema, para calcular los tres potenciales.

Así mismo, los resultados (caudales de salida por la compuerta, salinidad de salida de los caudales y características propias de la hidráulica) provienen del modelo de gestión, así como de caudales de la estación la Reforma y caudales provenientes del sistema dársenas, con sus respectivas salinidades; estos datos sirven de entrada para el modelo hidráulico del río Chicamocha (similar el definido para quebrada Honda), y de esta manera lograr obtener los índices en el río.

Para el sistema dársenas que va antes del río, se planteó el modelo de gestión de la misma manera que se diseñó para el lago, teniendo en cuenta las mismas entradas de este, junto con precipitación, evaporación y entradas y salidas antrópicas, para obtener los caudales y salinidades que se descargan en el río Chicamocha.

Como punto de partida para la ejecución del sistema y teniendo en cuenta la interacción entre los diferentes modelos, se hace necesario el establecimiento de un periodo de simulación (un año), a partir del cual se ejecuta el modelo clima, con el fin de obtener las tres series de tiempo que servirán de insumo para iniciar el proceso de simulación de los modelos ambientales.

Con estas tres series de tiempo, y teniendo los datos de un escenario base (el cual tiene preestablecidos valores de las variables caudal, niveles, apertura de compuertas, conductividad y temperatura), se procede a realizar la simulación de este escenario, pasando por los modelos ambientales descritos, con el fin de contar con información de referencia que permita plantear nuevos escenarios buscando el que más se ajuste a una adecuada gestión del recurso hídrico.

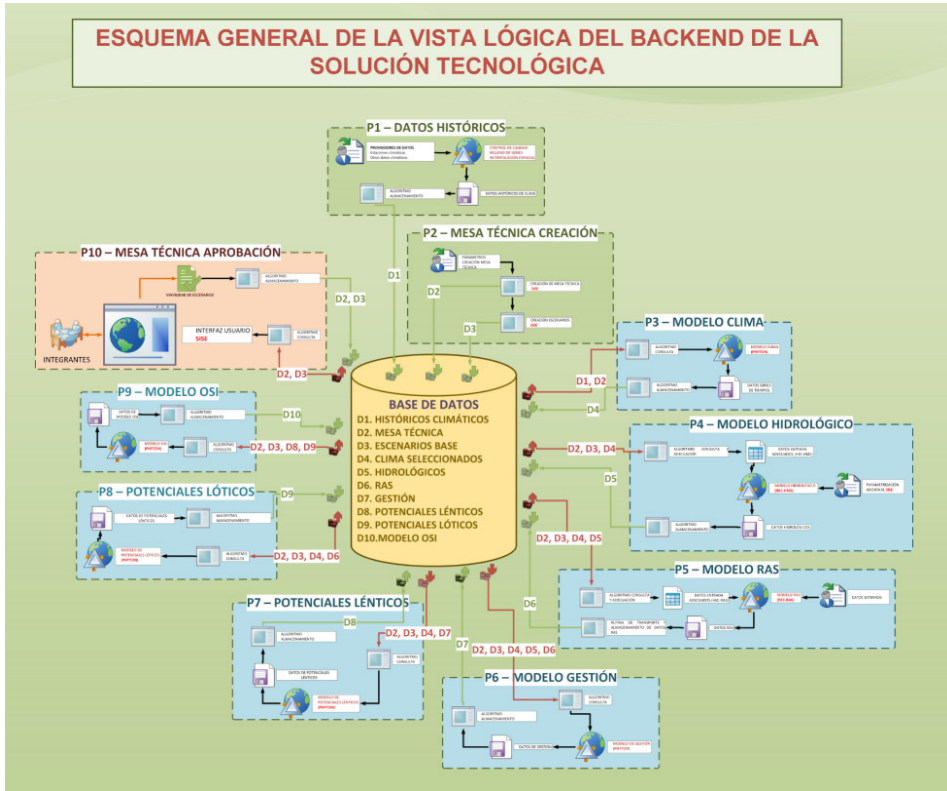
De acuerdo con el procedimiento establecido inicialmente, la ejecución del escenario base y de nuevos escenarios es realizada por la Mesa Técnica BIO-Ambiental (conformada por expertos en el área de la Universidad de Boyacá), esto con el fin de ofrecer a la Mesa Técnica Principal (conformada por representantes de las entidades que gestionan el recurso hídrico del área de influencia del proyecto: Corpoboyacá, Usochicamocha, Ideam, representantes de las alcaldías, Gestión del Riesgo Departamental y representantes de los actores de la comunidad, entre otros), opciones iniciales que le permitan tener un punto de partida para definir nuevos escenarios o para seleccionar uno de los sugeridos por la Mesa Técnica Ambiental, y, de esta manera, obtener el que ofrezca mejores condiciones para la gestión del recurso hídrico y, por consiguiente, informar a la comunidad cómo será la dinámica de la gestión frente al recurso y poder tomar decisiones informadas que permitan un mejor uso de este.

Para lograr desde el punto de vista tecnológico el funcionamiento eficiente y eficaz de este proceso, se plantea un esquema lógico en el cual convergen los diferentes elementos o componentes necesarios para una adecuada integración y funcionamiento de los recursos involucrados en el mismo, tal como se presenta a continuación en la figura 8.

Con el fin de abordar el desarrollo de la solución tecnológica, se definen dos componentes principales del sistema: el primero hace referencia a la inserción de los datos que provienen de las fuentes en la base de datos, que sirven como entrada para cada uno de los modelos ambientales, los cuales son los encargados de realizar el tratamiento de los mismos y, de esta manera, generar el insumo que se tiene en cuenta en la Mesa Técnica, para la toma de decisiones y posterior visualización de resultados a la comunidad de influencia del proyecto (este es el segundo componente, la interacción con la comunidad), para lo cual los elementos mencionados se agruparon de la siguiente manera: *back end* (datos, modelos e interacción con la base de datos) y *front end* (interacción con el usuario final).

La figura 8 presenta el esquema general conceptual del proyecto, donde se observan los insumos (datos), la conexión entre los modelos ambientales (clima, hidrológico, hidráulico, gestión, potenciales e índices) y la base de datos; así mismo, se presenta la relación que existe entre la base de datos y el sistema de acceso democrático a la información (sitio web y la aplicación móvil - app).

Figura 8. Arquitectura general conceptual del modelo



Fuente: el estudio, elaboración propia del equipo de trabajo.

El primer aspecto que se tiene en cuenta es el ingreso de los datos, desde las diferentes fuentes de datos, estos son validados por el equipo del componente ambiental del proyecto. Las fuentes de datos son datos generados por el Ideam (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales); Corpoboyacá (Corporación Autónoma Regional del Boyacá); Usotchicamocha (Asociación de Usuarios del Distrito de Riego y Drenaje del Alto Chicamocha y Firavitoba) y Bases de Datos Ambientales Globales, como NOAA, TRRM y CFSR (P1 – datos históricos de la figura 8).

Los datos son ingresados a la base de datos en diferentes momentos y son consultados para convertirse en datos de entrada para cada modelo ambiental (P3 – Modelo Clima; P4 – Modelo Hidrológico; P5 – Modelo RAS; P6 – Modelo Gestión; P7 – Potenciales Lénticos; P8 – Potenciales Lóticos; P9 – Modelo OSI de la figura 8), según las necesidades de los mismos. Cada uno de los modelos

generan nuevos datos que también se ingresan a la base de datos y se convierten (algunos de ellos) en entradas de los modelos siguientes.

El segundo aspecto, no menos importante, es la creación de la Mesa Técnica, para esto se desarrolló una interfaz dentro del Sistema de Información Socioecológico (SISE) que permite la creación de las mesas técnicas y de los escenarios (P2 – Mesa Técnica Creación de la figura 4). Posteriormente, las salidas de todos los procesos de simulación pueden ser consultadas por las mesas técnicas, para que finalmente la Mesa Técnica Principal defina qué información puede ser visualizada por la comunidad a través de la página web y la app (P10 Mesa Técnica Aprobación de la figura 8).

Los datos históricos y la información de la Mesa Técnica creada previamente dan inicio al modelo clima (P3 - Modelo Clima de la figura 8), lo que genera como salida las series de tiempo, las cuales son ingresadas a la base de datos por medio de un algoritmo de almacenamiento, convirtiéndose en entradas de otros modelos (P4 - Modelo Hidrológico; P5 - Modelo RAS; P6 - Modelo Gestión; P7 - Potenciales Lénticos; P8 - Potenciales Lóticos de la figura 8). Este modelo fue desarrollado en Python y Django.

La información de la Mesa Técnica, de los escenarios y del modelo clima dan inicio al modelo hidrológico (P4 - Modelo Hidrológico (HEC-HMS) de la figura 5), se asignan parámetros adicionales a través de una interfaz en SISE; estos datos son ingresados por integrantes de la Mesa Técnica BIO-Ambiental (funcionarios de la Universidad de Boyacá, expertos en el área ambiental), dando como resultado los datos hidrológicos que se proceden a ingresar a la base de datos por medio de un algoritmo de almacenamiento.

Los datos ingresados a la base de datos son utilizados por el modelo RAS (P5 - Modelo RAS de la figura 8), el cual se ejecuta externamente al sistema por parte de un gestor ambiental y la salida de este es transportada a la base de datos mediante un algoritmo de almacenamiento.

Luego, se ejecuta el modelo de gestión (P6 - Modelo Gestión de la figura 5), desarrollado en Python y Django, el cual genera los niveles, caudales, áreas, carga y salinidad, que son ingresados a la base de datos, para posteriormente ser utilizados como materia prima en el cálculo de los potenciales lénticos.

Luego se da inicio al cálculo de los potenciales lénticos (P7 - Potenciales Lénticos de la figura 5), se ejecuta el algoritmo para el modelo y se almacenan los datos de salida en la base de datos. Se continúa con la ejecución del modelo que realiza el cálculo de los potenciales lóticos (P8 - Potenciales Lóticos de la figura 8), y su salida se almacena en la base de datos. Estos modelos se desarrollaron en Python y Django.

Los modelos mencionados generan los datos necesarios para poder ejecutar el modelo que calcula el índice OSI (P9 - Modelo OSI). Con este cálculo y las salidas del modelo de potenciales se tienen los datos necesarios para determinar cuál será el comportamiento de los mismos bajo las reglas de operación establecidas, con lo cual se podrán tomar decisiones sobre la opción, cuyos valores representen la mejor manera de gestionar el recurso agua. Este modelo fue desarrollado en Python y Django.

Con base en los resultados obtenidos, la Mesa Técnica (P10 - Mesa Técnica Aprobación) se reúne, para analizar la información; este proceso se realiza por medio de SISE, el cual permite visualizar los resultados de cada uno de los escenarios planteados y ejecutados a través de los modelos ambientales, y, de esta manera, permitir que la Mesa Técnica proceda a la toma de decisiones con respecto a la información que se va a socializar a la comunidad.

Con el fin de presentar una vista general de la forma en que interactúa la mesa técnica con el SISE, se presenta la figura 6. La estructura está organizada en tres bloques principales, así:

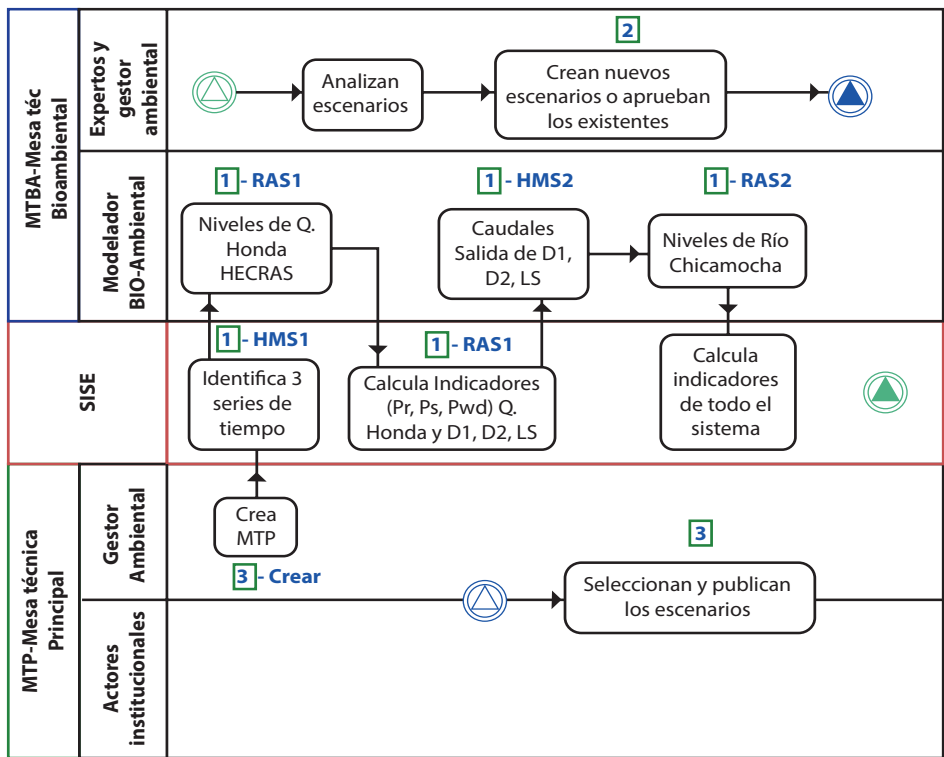
1. La Mesa Técnica BIO-Ambiental (MTBA), en la cual participan el modelador bioambiental (encargado de ejecutar los modelos de manera externa al SISE), los expertos y gestor ambiental, quienes ingresan los datos iniciales (periodo a simular y valores de parámetros iniciales) para empezar el proceso; analizan los resultados de simulación de un escenario previamente establecido y pueden plantear nuevos escenarios de acuerdo con el análisis realizado por estos expertos, se definen los escenarios que podrán ser consultados por la Mesa Técnica Principal, ayudando a agilizar el proceso que debe ser adelantado por este.

2. SISE es el sistema de información en el cual interactúan los diferentes actores relacionados con el modelamiento ambiental. En este nivel se ejecutan los modelos ambientales que fueron diseñados e implementados por el equipo

del proyecto, los cuales interactúan con los modelos que fueron calibrados y configurados por el equipo de modelación ambiental para posteriormente interactuar con el sistema.

3. La Mesa Técnica Principal (MTP) parte de los escenarios propuestos por la MTBA, plantea nuevos escenarios y, con base en los resultados obtenidos de dicho proceso, selecciona el escenario con el cual se gestionan las diferentes reglas de operación, con el fin de que la comunidad pueda tomar decisiones informadas sobre el uso adecuado del agua.

Figura 9. Flujoograma de interacción entre los datos históricos, los modelos ambientales y la base de datos



1 = Mesa técnica ambiental/Gestión Mesa técnica/Editar-Visualizar/Ejecución de escenario/

2 = Mesa técnica ambiental/Gestión Mesa técnica/Escenarios/Crear

3 = Mesa técnica Principal/Gestión Mesa técnica

Fuente: López Candela, C. R. (2020). Anexo PTF_BPMN: Diagrama de procesos de negocio usando BPMN, p. 8.

3.2 Identificación de Actores

Teniendo en cuenta lo descrito, se pueden identificar los siguientes actores, como parte integral del sistema, debido a que este está orientado a brindar a la comunidad información fiable que le permite una adecuada toma de decisiones; los usuarios se clasificaron teniendo en cuenta una categoría o grupo principal al que pertenecen, como se presenta en la tabla 2.

Dentro de la solución tecnológica implementada se han identificado diversos grupos de actores que interactuarán con el sistema, los cuales de una u otra forma aportaron al desarrollo del proyecto y la obtención de los resultados para la toma de decisiones en la gestión del recurso del agua, por lo que dichos grupos se han clasificado de la siguiente forma: Investigadores BIO-Ambiental, Investigadores BIO-TI, Corporativos-Fuentes de Datos, Mesa Técnica, Corporativos-Consumidores, Sistema de Persistencia, Modelos Ambientales y Recursos TI.

Tabla 2. Actores del sistema

Categoría	Participantes
Investigadores BIO-Ambiental	Gestores Modelo Clima
	Gestores Modelo Hidrológico
	Gestores Modelo Hidráulico
	Gestores Modelo de Gestión
	Gestores Modelo Potenciales
	Gestores Modelo de Índices
Profesional relacionado con el área	Gestores Sistema de Información
Corporativos – Fuentes de Datos	Ideam
	Corpoboyacá
	Usochicamocha
	BD Climatológicas globales
Mesa Técnica	Equipo BIO-Ambiental
	Equipo BIO-Principal
Corporativos – Consumidores	Alcaldía de municipios del área de influencia
	Ideam
	Corpoboyacá
	Usochicamocha
	Gestión del riesgo departamental
	Gensa

Categoría	Participantes
Sistema de persistencia	Bases de Datos (BD)
	Archivos de Excel
Modelos ambientales	Clima
	HEC-HMS
	Gestión
	HEC-RAS
	Potenciales (indicadores socioecológicos)
Recursos TI	Índices (OSI)
	Algoritmos de Validación e Inserción de Datos
	HEC-DSSVue

Fuente: Báez Pérez, C. I., Vargas Bermúdez, F. A., Bernal Bolívar, D. F., Ochoa Echeverría, M., Patiño Castaño, J. O., Castillo Rodríguez, B. H., . . . Hoyos Pastrana, E. (2020). *Modelo del sistema para la integración de información ambiental como herramienta de apropiación social del conocimiento*.

Los Investigadores BIO-Ambiental realizan los procesos para validar y completar los datos de las fuentes externas, plantean posibles escenarios de operación del sistema, analizan los resultados de dichos escenarios y proponen cuáles de los mismos serán presentados a la Mesa Técnica Principal. Se encargan de iniciar el proceso de simulación, para lo cual definen el periodo que se va a simular y gestionan las entradas y salidas de los modelos externos al sistema. Así mismo, hacen parte de la Mesa Técnica BIO-Ambiental, los investigadores del área ambiental vinculados al proyecto.

El profesional relacionado con el área se encarga de gestionar el sistema desde el punto de vista de la creación de usuarios, asignación de roles y gestión de la información básica que requiere el sistema, logrando de esta manera soportar la configuración necesaria para la óptima operación del sistema.

Los Corporativos-Fuentes de Datos son todas aquellas entidades públicas y privadas que proveen los datos al proyecto. Se cuenta con variables climatológicas e hidrometeorológicas que son proporcionadas por el Ideam y algunas bases de datos - BD Climatológicas, variables de Calidad de Agua que son proporcionadas por Corpoboyacá y variables ambientales que son proporcionadas por Usochicamocha.

La Mesa Técnica Principal está constituida por representantes de algunos de los actores que hacen parte del grupo Corporativos-Consumidores. Esta se encarga de la toma de decisiones sobre la gestión del recurso del agua o que están directamente afectados por dichas decisiones, como la Alcaldía de Paipa, Corpoboyacá, Usochicamocha, Ideam, Unidad Departamental de Gestión del Riesgo y Gensa, entre otros. Lo anterior con el propósito de realizar algunas validaciones de los datos generados y tratados en el SISE.

El Sistema de Persistencia está integrado por la base de datos (BD) del SISE y los archivos de Excel, los cuales son entregados con la información respectiva, previamente tabulada y esquematizada según sea el destino al que se envíen.

Por último, los Recursos TI están conformados por el sitio web y la app del SIE, que permite observar la información que se generó como resultado de todo el proceso del SISE, también se encuentran los algoritmos de validación e inserción de datos, que son los encargados de la adecuación, validación y transporte de los datos en el SISE y, finalmente, el HEC-DSSVue, sistema intermedio que recibe los datos extraídos de la base de datos, para que los simuladores de la familia HEC puedan utilizarlos como materia prima para realizar el proceso de simulación respectivo; así mismo, los datos de las simulaciones son estructurados por este, para su posterior inserción en la base de datos mediante un algoritmo.

De acuerdo con lo descrito arriba, ya se tiene un panorama de lo que el sistema debe hacer desde el punto de vista de la integración de los modelos, así como de las diferentes funcionalidades que se deben implementar para que el sistema opere normalmente. Es por ello que a continuación se realiza una identificación de los requisitos funcionales y no funcionales.

3.3 Identificación de Requisitos Funcionales

Dada la complejidad del sistema, se define una arquitectura compuesta por dos elementos principales: *back end* y *front end*, con el fin de garantizar la escalabilidad y flexibilidad del sistema, asegurando la mantenibilidad y crecimiento del mismo. Donde el *back end* contiene la lógica del negocio, incluyendo los algoritmos de los diferentes modelos ambientales implementados y toda la

gestión necesaria para la validación, consulta y gestión de los datos, así como, un módulo de seguridad para garantizar el acceso autorizado a los usuarios de acuerdo con el rol que desempeñen dentro del sistema. Y el *front end* es el componente gráfico del sistema que permite la interacción de los actores con el SISE, es decir, la interfaz a través de la cual el usuario ingresa, actualiza, elimina y consulta información.

Dada la amplitud del proyecto, el área de influencia se estructuró en siete puntos de gestión, los cuales son:

- Punto 1: quebrada Honda
- Punto 2: lago Sochagota
- Punto 3: río Chicamocha descarga de piscinas
- Punto 4: río Chicamocha estación La Siberia
- Punto 5: Dársena 1
- Punto 6: Dársena 2
- Punto 7: río Chicamocha estación unidad Holanda

Cada uno tiene características particulares de acuerdo con su ubicación y funcionalidad, convirtiéndose así en las variables que se van a gestionar, por ejemplo, apertura de compuertas, caudales de entrada y caudales de salida, entre otros. Esto debe ser tenido en cuenta tanto en el *back end* como en el *front end*.

- Back End

En la siguiente tabla se presentan los requisitos funcionales y no funcionales del *back end*.

Tabla 3. Identificación y descripción de requerimientos funcionales y no funcionales del back end

RF	RNF
Algoritmo para subir datos históricos (P, T°, Hr, Vv, T°r)* a la BD.	Conectar la BD al SIE.
Algoritmo para entregar al equipo BIO-Ambiental los datos históricos, con el fin de interpolarlos y completarlos.	Enlazar los modelos ambientales con el SIE.
Algoritmo para subir datos climatológicos Validados (P, T°, Hr, Vv, T°r) a la BD.	Definir e identificar los roles que puede tener un usuario.
Algoritmo que lee los datos climatológicos Validados (P, T°, Hr, Vv, T°r) y ejecuta el modelo de Clima	Enlazar cada actor con un tipo de usuario
Algoritmo que recibe las series de tiempo climáticas y las guarda en la base de datos.	
Algoritmo que lee las series de tiempo climáticas de la BD y las entrega a BIO-Ambiental para el modelo HEC-HMS.	
Algoritmo que recibe los datos hidrológicos Q (nivel) naturales y los guarda en la BD.	
Algoritmo que lee los datos hidrológicos Q naturales de la BD y los entrega a BIO-Ambiental para el modelo de Gestión.	
Algoritmo que recibe los datos hidrológicos Q gestionados, Niveles, Salinidad y los almacena en BD.	
Algoritmo que lee los datos hidrológicos Q gestionados, niveles, salinidad de la BD, y los entrega a BIO-Ambiental para el modelo HEC-RAS.	
Algoritmo que recibe los datos hidráulicos con niveles, salinidad, trazador y los almacena en la BD.	
Algoritmo que lee los datos hidráulicos con niveles, salinidad, trazador y los entrega a BIO-Ambiental para el modelo Potenciales.	
Algoritmo que recibe los potenciales (Ps, Pwd, Pr)** y los almacena en la BD.	
Algoritmo que lee los potenciales (Ps, Pwd, Pr) de la BD, y los entrega a BIO-Ambiental para el modelo Índices.	
Algoritmo que recibe Índice OSI y los almacena en la BD.	
Algoritmo que recibe el periodo a simular y los almacena en la BD.	
Algoritmo que recibe las reglas de operación por defecto y las almacena en la BD.	
Algoritmo que recibe las nuevas reglas de operación y las almacena en la BD.	
Algoritmo que guarda los datos de los escenarios aprobados por BIO	

RF	RNF
Algoritmo que guarda los datos del escenario aprobados por MTP	
Validar las operaciones básicas de las tablas que hacen parte del sistemas (adicionar, eliminar, consultar, actualizar)	
Gestión de roles, permisos, usuario y seguridad del sistema	
Validar la gestión de las mesas técnicas, escenarios y reglas de operación.	
Consultas a la base de datos de acuerdo con los criterios establecidos para la generación de los informes.	

* P Presión, T° Temperatura, Hr Humedad relativa, Vv Velocidad del viento, T°r Temperatura relativa.

** Ps Potencial de salinidad, Pwd Potencial de eutrofización, Pr Potencial de renovación.

- Front End

En la siguiente tabla se presentan los requisitos funcionales y no funcionales del *front end*.

Tabla 4. Identificación y descripción de requerimientos funcionales y no funcionales del front end

RF	RNF
Valida usuario y contraseña para la autorización de ingreso al sistema.	Validar que todo usuario tenga contraseña y roles asignados de acuerdo con su responsabilidad dentro del sistema
Mostrar gráficas con las condiciones de la zona de influencia del proyecto.	Configurar las opciones del sistema de acuerdo al rol asignado
Creación de roles y usuarios	Validar los formatos de datos tanto fechas como valores numéricos, verificando los rangos respectivos
Asignar roles a usuarios	Garantizar la interoperabilidad del sistema.
Gestionar (crear, modificar, eliminar, consultar) categoría estaciones, estaciones, entidades, estados, microcuencas, modelos, puntos de gestión, tecnología de estaciones, caudales antrópicos, tipos de usos, tipos variables, unidades de medida, variables, secciones río, tipo secciones, tipo datos, departamento, municipios	Interfaz intuitiva

RF	RNF
Ingresar datos a la base de datos provenientes de las fuentes primarias (Ideam, Corpoboyacá, Usoc Chicamocha, bases de datos ambientales), previamente validados, para lo cual se debe seleccionar el archivo que se creó con los datos.	El sistema podrá ser escalable, con el fin de ir ampliando a medida que se requiera
Configurar variables para ejecutar modelo Clima, para lo cual se toma la estación de referencia y se define la fecha de inicio de la simulación. El sistema toma los datos de los últimos cinco meses anteriores a la fecha de inicio de la simulación y realiza una retrospectiva, buscando los años cuyo comportamiento de las variables sea similar a dichos meses. Posteriormente, tomando los valores de las variables a un año. Este proceso genera tres series de tiempo más parecidas en comportamiento a los últimos cinco meses que se seleccionó para simular.	
Gestionar la Mesa Técnica Ambiental, para lo cual se debe verificar que el modelo Clima ya se haya ejecutado y se encuentren los 3 años similares seleccionados. - Para la creación de una mesa técnica ambiental se debe definir el año y el mes en el que se va a iniciar la gestión del recurso agua. Así mismo, se deberá contar con un campo de descripción, donde se adicionarán detalles sobre la misma. - Se configuran los valores iniciales de las siguientes variables: - Nivel inicial del lago Sochagota - Nivel inicial Dársena 1 - Nivel inicial Dársena 2 - Conductividad inicial del lago - Conductividad inicial Dársena 1 - Conductividad inicial Dársena 2 - Temperatura Inicial del lago - Temperatura inicial Dársena 1 - Temperatura inicial Dársena 2 - Posteriormente, se crea la Mesa Técnica, la cual aparecerá en el listado de las mesas técnicas ambientales disponibles para su configuración. - Se selecciona de un listado la mesa técnica con la cual se van a configurar escenarios, y esto deberá presentar la información de la configuración de la misma. - Definir los valores por cada regla de operación, entre las cuales se encuentran:	

RF	RNF
- Porcentaje apertura de compuertas - Horas de bombeo de caudal - Caudal de transvase de piscinas de enfriamiento - Caudales de La Playa - Caudales de Delfines - Caudales de la PTAR - Temperatura de transvase de piscinas de enfriamiento - Conductividad de transvase de piscinas de enfriamiento, a cada una se le configuran los parámetros respectivos - Una vez configuradas las reglas de operación, se deberán almacenar en la base de datos. Estas reglas pueden ser registradas en un archivo de Excel, para que sean subidas a la base de datos. - Una vez configurados los escenarios, se podrán ejecutar de acuerdo con la secuencia definida para la simulación. - El proceso de ejecución de los modelos ambientales se ejecuta de acuerdo con el modelo planteado en la figura 4. - Una vez se cuenta con los resultados de las simulaciones, los integrantes de la Mesa Técnica Ambiental podrán visualizarlos para seleccionar cuáles de ellos presentar a la Mesa Técnica Principal. Posteriormente, se le informará a la Mesa Técnica Principal que los resultados están disponibles para consulta.	

Gestionar Mesa Técnica Principal

- Los integrantes de la Mesa Técnica Principal podrán conectarse al sistema por medio del usuario y contraseña asignados.
- En la opción de gestionar Mesa Técnica podrán encontrar un listado de las mesas técnicas que han sido creadas. Deberán seleccionar la Mesa Técnica sobre la que van a trabajar y allí podrán visualizar los escenarios que fueron sugeridos por la Mesa Técnica Ambiental para que los analicen y, en caso de no estar de acuerdo con ninguno de los escenarios, podrán sugerir nuevos escenarios para que sean simulados. Este proceso se realizará de la misma manera en que fue diseñado para la Mesa Técnica Ambiental.
- Una vez se escoge el escenario sobre el cual se va a realizar la gestión del recurso agua, esta información podrá ser consultada por los diferentes actores a través del sitio web y de la aplicación móvil.

RF	RNF
Generación de Informes - Opciones para la generación de informes tanto para las mesas técnicas, como para la comunidad en general, de acuerdo al rol con el cual se esté realizando la consulta.	

Fuente: Universidad de Boyacá, 2020.

De acuerdo con las diferentes funcionalidades que deben ser implementadas en el sistema de información, el proyecto se desarrolla en módulos, para poder contar con una organización lógica y estructurada del sistema, así como la optimización de los recursos (talento humano, equipo, *software* y tiempo, entre otros). A continuación se describen los principales módulos definidos, los cuales se tienen en cuenta tanto en el *back end* como en el *front end*:

- **Administración Básica:** hace referencia al módulo de gestión de la información básica necesaria para la ejecución del sistema; contiene las interfaces de usuario que permiten la gestión de usuarios, roles, permisos y seguridad, así como la lógica necesaria para cumplir con los requisitos funcionales del negocio.
- **Configuración:** en este módulo se encuentra la gestión de las tablas básicas del sistema, necesarias para el funcionamiento adecuado del mismo; contiene tanto la lógica del negocio como las interfaces que permiten la manipulación de los datos de dichas tablas (en estas se almacena la información base para el inicio de proceso).
- **Mesa Técnica:** permite la gestión de las mesas técnicas Ambiental y Principal, de los escenarios y de reglas de operación; de acuerdo con los requisitos funcionales descritos anteriormente, es necesario implementar mecanismos que permitan diferenciar la gestión de cada una de las mesas técnicas.

- Mesa Técnica BIO-Ambiental (MTBA), son interfaces de usuario que permiten al equipo BIO-Ambiental la configuración de mesas técnicas, escenarios y reglas de operación, con el objeto de proporcionar a la Mesa Técnica Principal un insumo inicial para la toma de decisiones.

- Mesa Técnica Principal (MTP), a través de estas interfaces los actores que toman decisiones visualizan los escenarios simulados por la Mesa Técnica BIO-Ambiental, y verifican si alguno de estos es el adecuado para la gestión

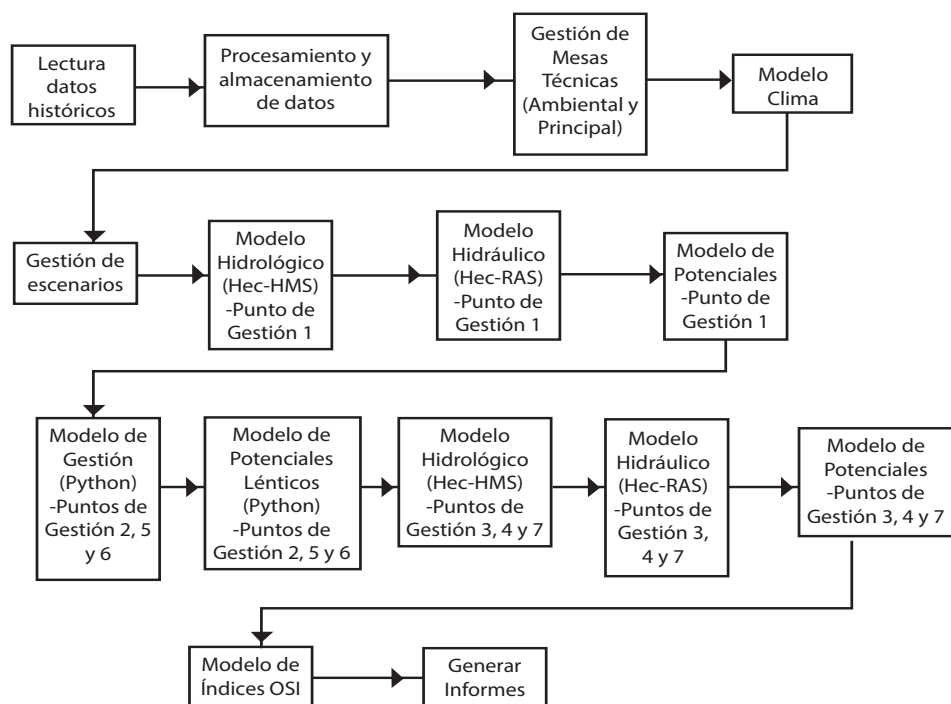
del recurso agua, de lo contrario procederán a configurar otros escenarios para ser simulados y posteriormente evaluados, partiendo de esta evaluación se selecciona el escenario con el cual se realizará la gestión del recurso agua, de esta manera los actores interesados tendrán acceso a la información necesaria para el uso adecuado de este.

- Informes: contiene la estructura para la visualización de los resultados de las simulaciones.

3.4 Modelo de Procesos de Negocio

A continuación, en la figura 10, se ilustra el modelo de proceso del negocio, el cual cuenta con once componentes principales, algunos de los cuales se repiten en diferentes momentos de la ejecución del sistema.

Figura 10. Modelo de procesos del negocio



Fuente: el estudio, elaboración propia de los autores.

Inicialmente un encargado del grupo BIO es delegado para recolectar los datos históricos de cada una de las fuentes respectivas, para realizar su validación y completado de información, los cuales son procesados y almacenados en el sistema.

Para la ejecución de los modelos, primero inicia con la gestión de la Mesa Técnica Ambiental, donde se definen el periodo que se va a simular y los valores iniciales para realizar el proceso de simulación. Luego, se ejecuta el modelo Clima, cuyo objetivo es buscar en los datos históricos tres series de tiempo que permitan predecir el comportamiento de las variables ambientales (temperatura y humedad), con el fin de generar una predicción del comportamiento del clima del periodo simulado.

Teniendo como base las tres series climáticas y configurados los diferentes escenarios con sus respectivas reglas de operación, se ejecutan los modelos de acuerdo con el siguiente orden:

- Para el punto de gestión 1, se ejecutan los modelos: Hidrológico (HEC-HMS), Modelo Hidráulico (HEC-Ras) y Modelo de Potenciales.
- Para los puntos de gestión 2, 5 y 6 se ejecuta el modelo de Gestión (Python) y el modelo de Potenciales Lénticos.
- Por último, se repite el proceso de ejecución como en el punto de gestión 1, pero para los puntos 3, 4 y 7.

Una vez finalizado el proceso anterior y calculados los potenciales de cada punto de gestión, se ejecuta el modelo OSI, con esta información se generan los respectivos informes y la Mesa Técnica determina cuál es el escenario que va a socializar ante la comunidad por medio del sitio web y de la app. Al final, los usuarios tienen la posibilidad de consultar la información que está disponible para que les sirva de insumo para una adecuada toma de decisiones.

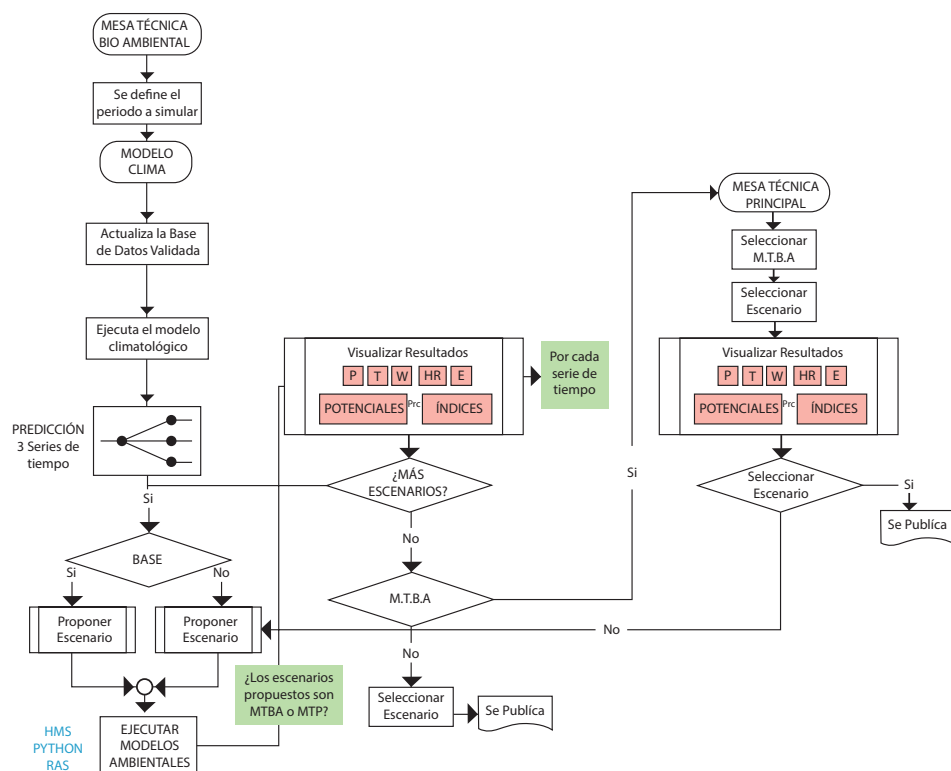
3.5 Principales Flujogramas del Sistema

3.5.1 Flujograma General

El presente diagrama ofrece una vista general del proceso que se debe realizar para lograr desarrollar las respectivas simulaciones y, de esta manera, obtener el escenario que se gestionará durante un determinado periodo (365 días).

Para una interpretación más clara se ha decidido dividir el diagrama en secciones, para realizar una descripción de cada una de ellas:

Figura 11. Diagrama general

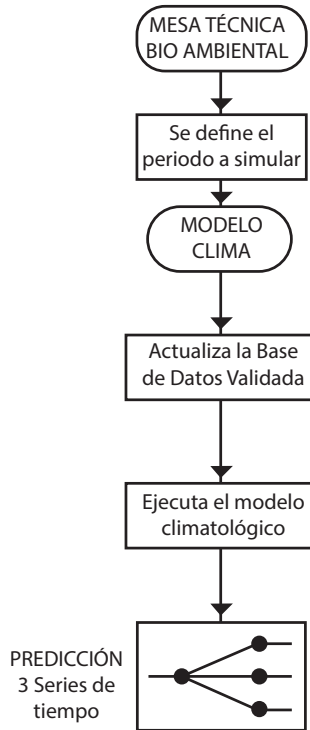


Fuente: elaboración propia.

La ejecución del proyecto inicia con la Mesa Técnica BIO-Ambiental, la cual previa consulta con los responsables de la Mesa Técnica Principal, define el periodo que se va a simular. Una vez identificado el periodo, se envía un mensaje al responsable de la ejecución del modelo de Clima.

Para ejecutar el modelo de Clima, el responsable debe garantizar que los datos históricos climáticos están interpolados y completos hasta la fecha previa a la simulación, e inicia la ejecución del modelo.

Figura 12. Diagrama flujo datos históricos y modelo de clima

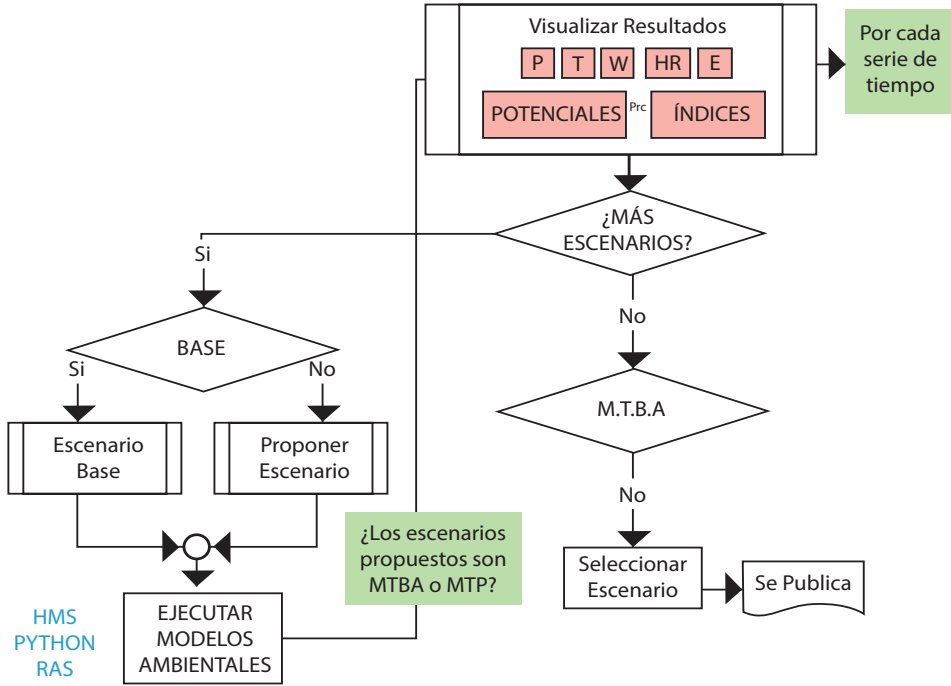


Fuente: elaboración propia.

En caso de no estar completos los datos, inician el proceso de lectura de datos históricos, los cuales son almacenados en la base de datos, una vez son interpolados y completados.

Después de ejecutar el modelo de Clima, la salida de dicho modelo genera tres series de tiempo, las cuales servirán de insumo para el siguiente modelo, que es el HEC-HMS.

Figura 13. Diagrama flujo Mesa Técnica BIO-Ambiental

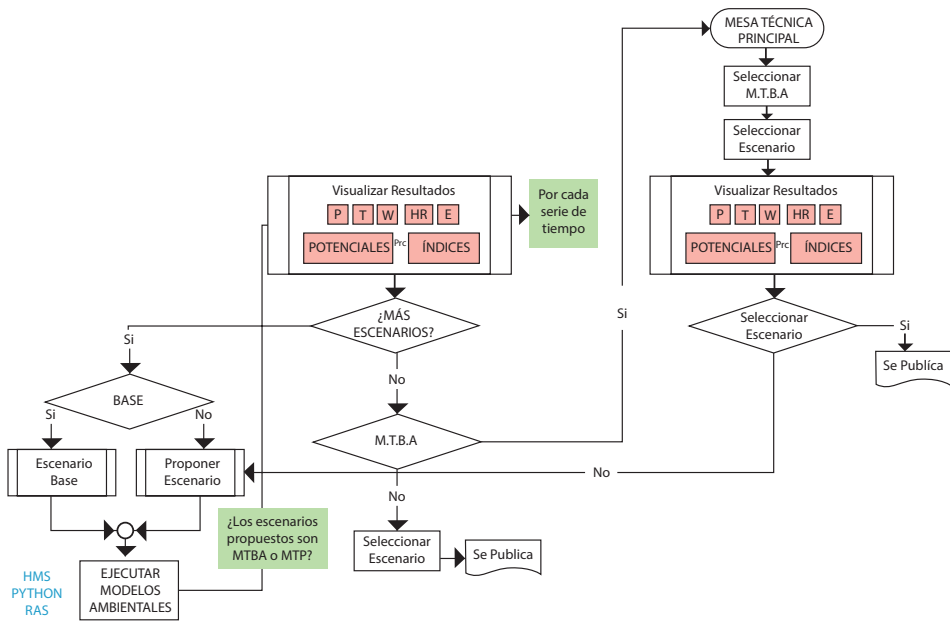


Fuente: elaboración propia

Luego se procede a evaluar si es la primera vez que se realiza la simulación, de ser así se toman las reglas de operación por defecto para realizar la ejecución del modelo HMS con cada una de las series de tiempo, cuyos resultados serán el insumo para la ejecución de cada uno de los modelos ambientales: gestión, RAS, potenciales e índices, logrando así resultados, como precipitación, temperatura, velocidad del viento, humedad relativa, evapotranspiración, potencial salinidad, potencial eutrofización, potencial renovación e índices, que serán evaluados por la Mesa Técnica BIO-Ambiental, para definir cuáles de estos serán visualizados a la Mesa Técnica Principal; si ninguno de los escenarios se considera apto para ser visualizado por la Mesa Técnica Principal o si se requieren otros escenarios adicionales, entonces se definirá por parte de la Mesa Técnica BIO-Ambiental nuevas reglas de operación (escenarios) para ejecutar otras simulaciones partiendo de estas nuevas reglas. Este proceso se repetirá cuantas veces considere necesario la Mesa Técnica BIO-Ambiental,

una vez dicha Mesa considere que se cuenta con los escenarios pertinentes, estos serán seleccionados para dar paso a su evaluación por parte de la Mesa Técnica Principal.

Figura 14. Diagrama flujo Mesa Técnica Principal



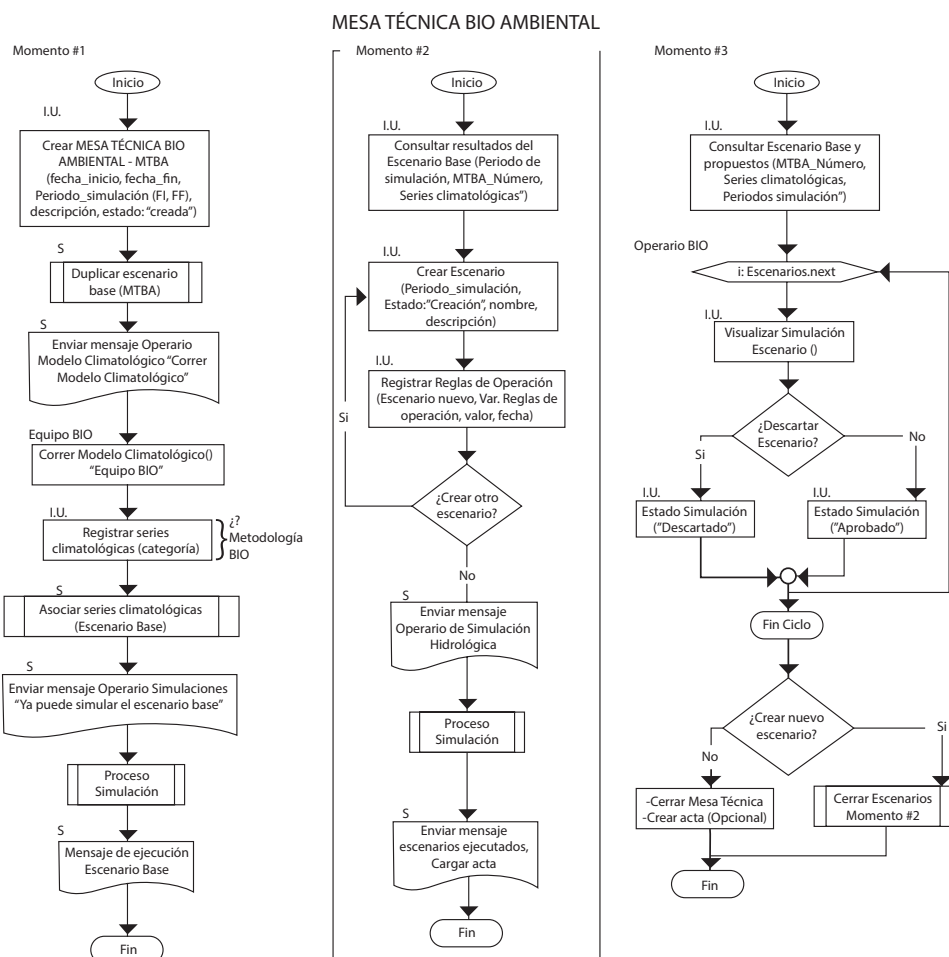
Fuente: elaboración propia

Después de definidos por parte de la Mesa Técnica BIO-Ambiental los escenarios que la Mesa Técnica Principal podrá consultar, esta se reunirá para evaluar el resultado (precipitación, temperatura, velocidad del viento, humedad relativa, evapotranspiración, potencial salinidad, potencial eutrofización, potencial renovación e índices) de cada uno de estos; si alguno de ellos es adecuado para lo requerido por dicha Mesa, se toma la decisión de publicarlo; de lo contrario, la Mesa Técnica Principal tendrá la opción de definir nuevas reglas de operación (escenarios) para ejecutar otras simulaciones partiendo de estas nuevas reglas; este proceso se repetirá cuantas veces considere necesario la Mesa Técnica Principal. Una vez dicha Mesa considere que se cuenta con los escenarios pertinentes, se seleccionará el más adecuado, el cual será visualizado por los interesados.

3.5.2 Flujoograma Mesa Técnica BIO-Ambiental

Con el fin de iniciar el proceso de simulación, el equipo BIO-Ambiental, previa consulta con los integrantes de la Mesa Técnica Principal (MTP), define el periodo que se va a simular, el cual es un periodo de 365 días. La Mesa Técnica Bio-Ambiental (MTBA) solicita el proceso de simulación con el periodo a simular y el escenario Base, y una vez recibe los resultados de dicha simulación, los analiza y, en caso de ser necesario, propone nuevos escenarios de simulación.

Figura 15. Diagrama flujo momentos Mesa Técnica BIO-Ambiental



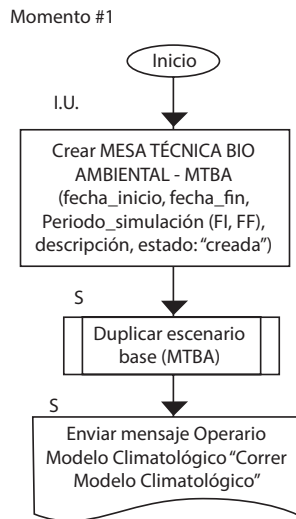
Fuente: elaboración propia.

Con los nuevos resultados de los escenarios de simulación, la MTBA analiza el comportamiento de los potenciales y el índice OSI de cada nuevo escenario y, en caso de ser necesario, propone otros escenarios.

La MTBA seleccionará los escenarios simulados, los cuales podrán ser consultados por la MTP e informados a la MTP, para que puedan reunirse y consultar los resultados de dichos escenarios. La descripción del proceso se puede visualizar en la figura 15, y en las figuras siguientes se presenta el detalle del proceso.

Para iniciar el proceso dentro del sistema, se inicia con el Momento #1 del flujograma, el cual se detalla en la figura 16.

Figura 16. Creación Mesa Técnica BIO-Ambiental



Fuente: elaboración propia.

Dentro del sistema, cuando se va a definir un nuevo periodo de simulación, se debe crear una nueva MTBA, la cual debe tener como parámetros:

- Fecha de inicio de la MTBA, la fecha en que se crea la MTBA
- Fecha de fin de la MTBA, esta fecha se llena cuando se dé por finalizada la MTBA

- Periodo de simulación, este periodo se define por una fecha inicial + 365 días como fecha final. La fecha inicial debe ser hacia el futuro, dado que el sistema se ha diseñado como un sistema de predicción.
- Descripción, breve descripción de la MTBA.
- Estado, el estado en el que se encuentra la MTBA, si está creada y puede ser consultada, adicionar nuevos escenarios o seleccionar escenarios simulados para presentarlos a la MTP, o si el estado es “Cerrada”, caso en el cual se podrán solo consultar los resultados de las simulaciones propuestas por la MTBA.

El objetivo principal de la MTBA es proponer diferentes escenarios de operación, es decir nuevas reglas de operación, que permitan simular cómo sería el comportamiento de las diferentes variables dentro del sistema y, de esta forma, calcular los potenciales, que en últimas son los que indican la calidad del recurso hídrico.

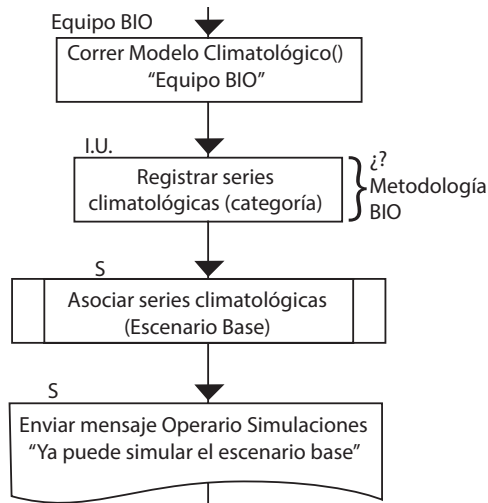
Al contar con este sistema, se podrá planear la gestión de los diferentes componentes que hacen parte del sistema y, de esta forma, tratar de garantizar en algún grado la calidad del recurso.

Cuando se ha creado la MTBA, el sistema duplica el escenario base, el cual consiste de unas reglas de operación por defecto. Este escenario se actualizará cada 4 o 5 años. Con este escenario base se realizará un primer proceso de simulación, con el fin de presentar un panorama general sobre cómo se operaría el sistema en el periodo de tiempo que se va a simular y cómo sería el comportamiento de los potenciales bajo esas reglas de operación.

Una vez se ha duplicado el escenario base, se le envía un mensaje al operario del modelo Clima, quien, mediante una interfaz del sistema, recibe el periodo que se va a simular y las reglas de operación del escenario base. El detalle se encuentra en la figura 17.

El operario del modelo de Clima ejecuta el modelo y este genera como salida tres series de tiempo, las cuales servirán como entrada para la ejecución del modelo hidrológico. Una vez se tienen las salidas del modelo, el operario ejecutará el algoritmo que permite subir las series de tiempo a la BD, y se le envía un mensaje al operario de los modelos ambientales (el detalle de ejecución de dicho modelo se realiza más adelante) para que los ejecute.

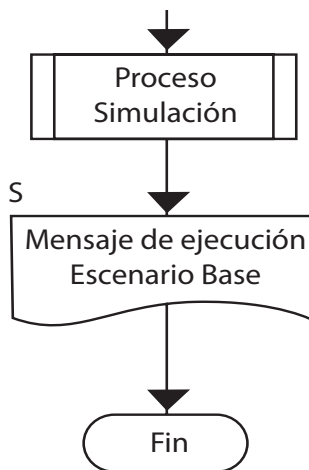
Figura 17. Ejecución modelo de clima



Fuente: elaboración propia.

El operario recibe el mensaje y realiza las simulaciones necesarias con las series de tiempo entregadas y las reglas de operación del escenario base; luego, sube los resultados de la simulación al sistema. Esta parte de la operación del sistema se puede ver en la figura 18.

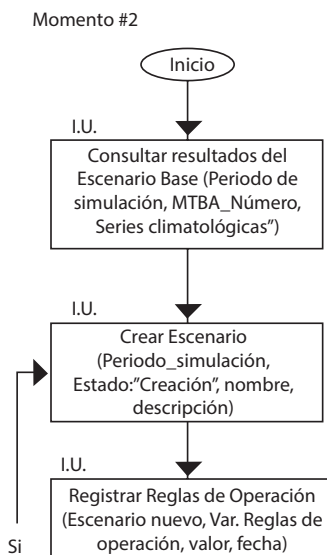
Figura 18. Ejecución proceso de simulación



Fuente: elaboración propia.

Una vez están los resultados del proceso de simulación y se han obtenido los potenciales e índices, del escenario base para las reglas de operación por defecto, teniendo como base las tres series de tiempo, la MTBA puede consultar los resultados de dicho escenario, como se puede ver en la figura 19.

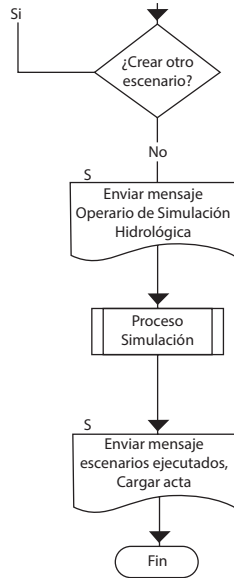
Figura 19. Consulta resultados escenario base y creación de nuevos escenarios



Fuente: elaboración propia.

Dentro de la secuencia de ejecución del proceso, una vez se pueden visualizar los resultados de simulación del escenario base, los integrantes de la MTBA analizan los resultados y pueden proponer otros escenarios de simulación (con nuevas reglas de operación).

Figura 20. Creación de nuevos escenarios por la MTBA

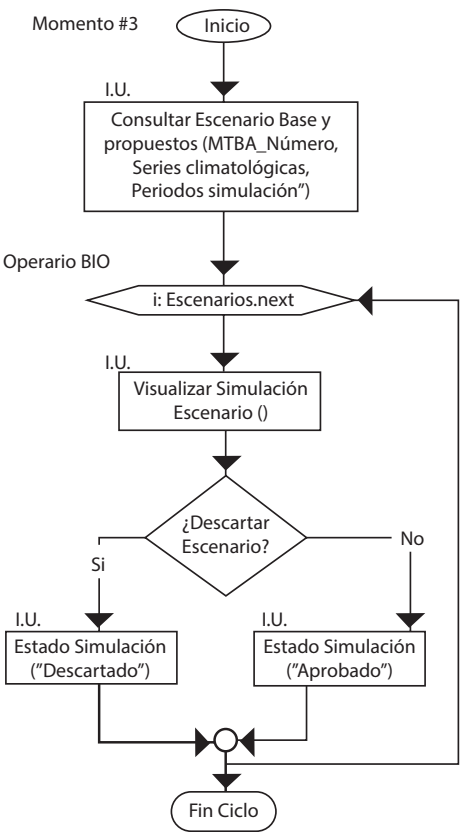


Fuente: elaboración propia.

El sistema verifica si los integrantes de la MTBA necesitan crear otro escenario, y en caso afirmativo repite el proceso anterior; en caso de ser negativo, envía un mensaje al operario de los sistemas de simulación, con el fin de que realice el proceso de simulación para cada uno de los nuevos escenarios. Después de ejecutar cada modelo de simulación, el operario deberá ejecutar los algoritmos correspondientes para subir los datos a la BD. Cuando los datos ya están en la BD, el sistema enviará un mensaje de correo electrónico a los integrantes de la MTBA.

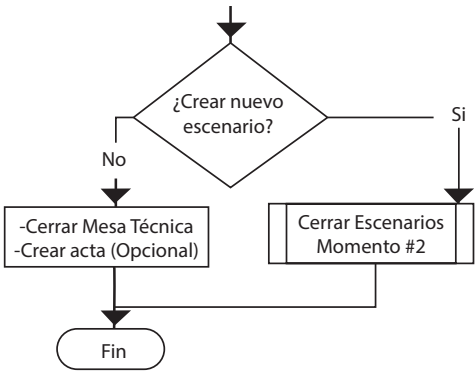
Con los nuevos escenarios simulados, la MTBA analizará los resultados de dichos escenarios, así como el del escenario base, y tendrá la responsabilidad de analizar cada uno de los resultados de las simulaciones, con el fin de determinar cuáles de los escenarios podrán ser visualizados por la MTBA. Como se puede observar en la figura 21, la MTBA analiza cada uno de los resultados de las simulaciones y determina cuáles escenarios podrán ser visualizados por la MTBA y cuáles son descartados.

Figura 21. Visualización de escenarios



Fuente: elaboración propia.

Figura 22. Cierre MTBA



Fuente: elaboración propia.

Los integrantes de la MTBA tendrán la opción de proponer nuevos escenarios y, en ese caso, se repetirá el proceso o tomar la decisión de cerrar la MTBA, con lo cual, a partir de ese momento, la información aprobada por la MTBA quedará para consulta, pero no se podrán proponer nuevos escenarios. Cuando se toma la decisión de cerrar la MTBA, se tiene la opción de crear un acta, donde se consignen las principales conclusiones de dicha Mesa. El flujograma de esta parte del proceso se puede observar en la figura 22.

Es importante aclarar que para el seguimiento y trazabilidad del sistema, este tomará el periodo de simulación como parámetro para el mismo, es decir, se consultará por periodo de simulación creado para saber qué mesas técnicas BIO-Ambiental se crearon y, por consiguiente, pueden ser consultadas por la Mesa Técnica Principal.

3.5.3 Flujograma Mesa Técnica Principal

La figura 23, describe el proceso que realizará la Mesa Técnica Principal, lo cual se divide en tres momentos de la siguiente manera:

Momento n.º 1. En esta parte se crea en el sistema la Mesa Técnica Principal (MTP), se visualizan los datos de la propuesta de escenarios y los resultados de sus simulaciones, para que la MTP los analice y decida si se debe publicar los resultados de un escenario en el portal o por el contrario si se desea proponer nuevos escenarios, de darse esto último, se describe en momento n.º 2.

1. Se inicia con una interfaz de usuario, la cual le permite al operario del sistema suministrar los parámetros del periodo de simulación.
2. De acuerdo a los parámetros anteriores, se consulta en la base de datos la información de la Mesa Técnica BIO-Ambiental, con los escenarios asociados a dicho periodo de simulación.
3. El operario va a poder seleccionar un escenario y visualiza los resultados de la simulación de este, con el fin de que los miembros de la MTP analicen el comportamiento de los potenciales e índice OSI en cada punto de gestión, y tome la decisión de seleccionar dicho escenario para que se habilite en el portal web la consulta de información; de no ser el escenario escogido, se considera como descartado para su publicación en el portal.

4. Si analizados los resultados de todos los escenarios planteados por la Mesa Técnica BIO-Ambiental, ninguno es seleccionado para su publicación, el sistema le permitirá a la MTP proponer nuevos escenarios para simular, los pasos para ello se describen en el diagrama del momento n.º 2.

Momento n.º 2. Propuesta de escenarios por parte de la Mesa Técnica Principal:

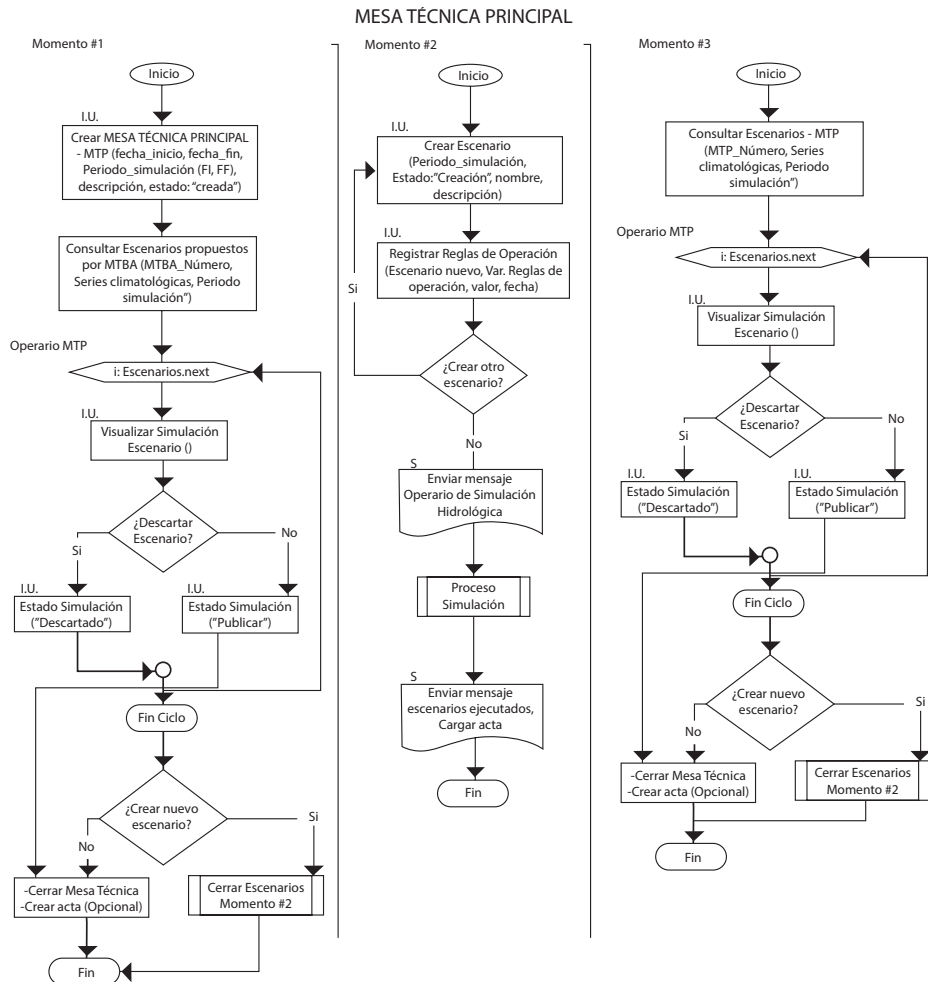
1. Se habilita una interfaz de usuario donde se debe suministrar la información del nuevo escenario.
2. Se habilita una interfaz de usuario donde se deben suministrar las reglas de operación del nuevo escenario.
3. Se debe permitir al operador del sistema (representante de la MTP) crear los escenarios y suministrar sus reglas de operación, tanto como lo requiera (para lo cual se ejecuta de nuevo el paso 1 y 2).
4. Una vez el operador de la MTP indique que no desea crear más escenarios, el sistema envía un mensaje al operador de las simulaciones ambientales, indicando que existen escenarios que deben ser simulados.
5. El operador de las simulaciones ambientales, por cada escenario propuesto por la MTP, debe ejecutar las herramientas de *software* de simulación ambiental de acuerdo a las reglas de operación planteada por la MTP.
6. Una vez se tienen todos los escenarios simulados, el operador de las simulaciones ambientales informa mediante un mensaje, enviado a través del sistema, que ya se encuentran disponibles los resultados de la simulación de los escenarios. El proceso se continúa con los pasos que se indican en el momento n.º 3.

Momento n.º 3. En esta parte se describen los pasos para la visualización de los resultados de las simulaciones a los escenarios propuestos por la Mesa Técnica Principal y permite la selección de cuál se debe habilitar para publicar en el portal web.

1. Mediante una interfaz de usuario se permite a la MTP (al operario designado) poder consultar los escenarios propuestos por la MTP.

2. Por cada escenario se visualizan los resultados de la simulación.
3. Se decide cuál escenario debe publicarse. De no seleccionar ninguno se habilita la creación de nuevos escenarios para lo cual se deben seguir los pasos descritos en el momento n.º 2.
4. Si se seleccionó un escenario que debe publicarse, el portal debe cerrar la Mesa Técnica y habilitar un interfaz para crear el acta de la reunión (opcional).

Figura 23. Flujograma Mesa Técnica Principal



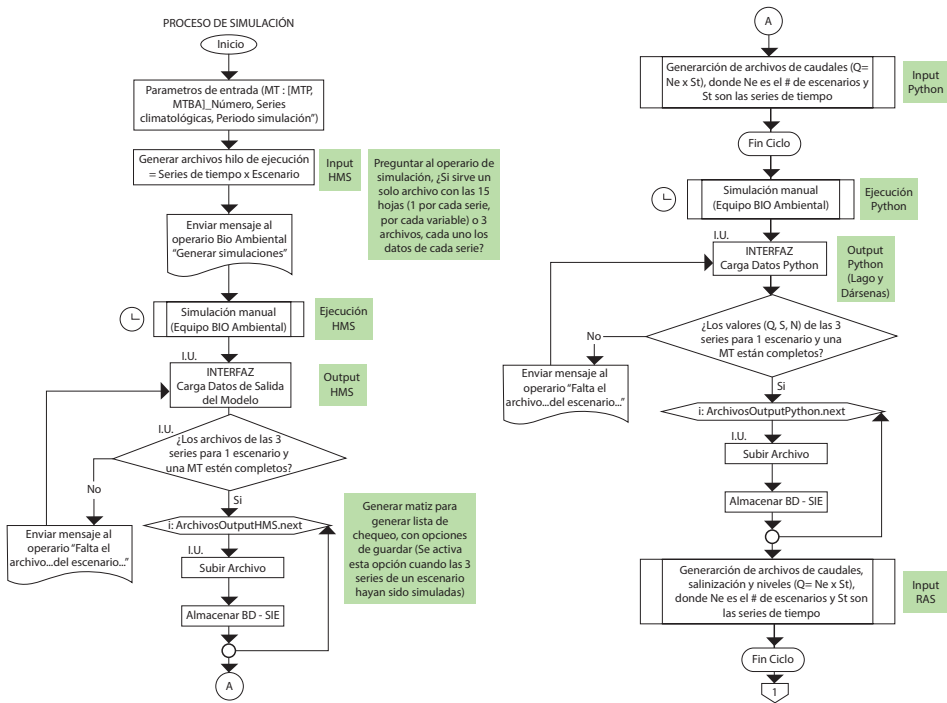
Fuente: elaboración propia.

3.5.4 Flujograma Proceso de Simulación

El proceso de simulación corresponde a la ejecución de las herramientas de *software* que ejecutan los modelos ambientales que hacen parte del proyecto. La figura 24 describe el flujo de información entre los diferentes procesos que conforman el sistema en la parte de la simulación, el intercambio de datos entre las herramientas de *software*:

1. En una interfaz de usuario se selecciona la Mesa Técnica (identificada por un número) y las series climatológica (pronóstico) del periodo simulación.
2. Se establecen las series de tiempo por escenario que son la entrada para el *software* HEC-HMS y se envía un mensaje al operador de la ejecución de las herramientas de *software* de simulación (OEHSS), con el fin de que inicie el proceso de ejecución de simulaciones.
3. El OEHSS debe ejecutar el *software* HEC-HMS y una interfaz, el operador debe cargar los datos de salida del modelo a la base de datos para las tres series de tiempos.
4. Se deben generar los archivos con la información de caudales, los cuales son la entrada para el modelo gestión que se desarrolló en Python. Por cada escenario y serie de tiempo se genera un archivo de todos los escenarios de la MT seleccionada.
5. El OEHSS ejecutar el *software* desarrollado en Python corresponde al modelo de gestión de lago y dársenas.
6. En una interfaz el operador debe cargar los datos de salida del *software* desarrollado en Python, uno por cada serie de tiempo y hasta completar todos los escenarios que conforman la MT.
7. Se debe generar los archivos de caudales, salinización y niveles, uno por cada serie de cada escenario, los cuales serán el *input* del *software* de simulación HEC-RAS.

Figura 24. Flujograma Proceso de Simulación HMS y gestión

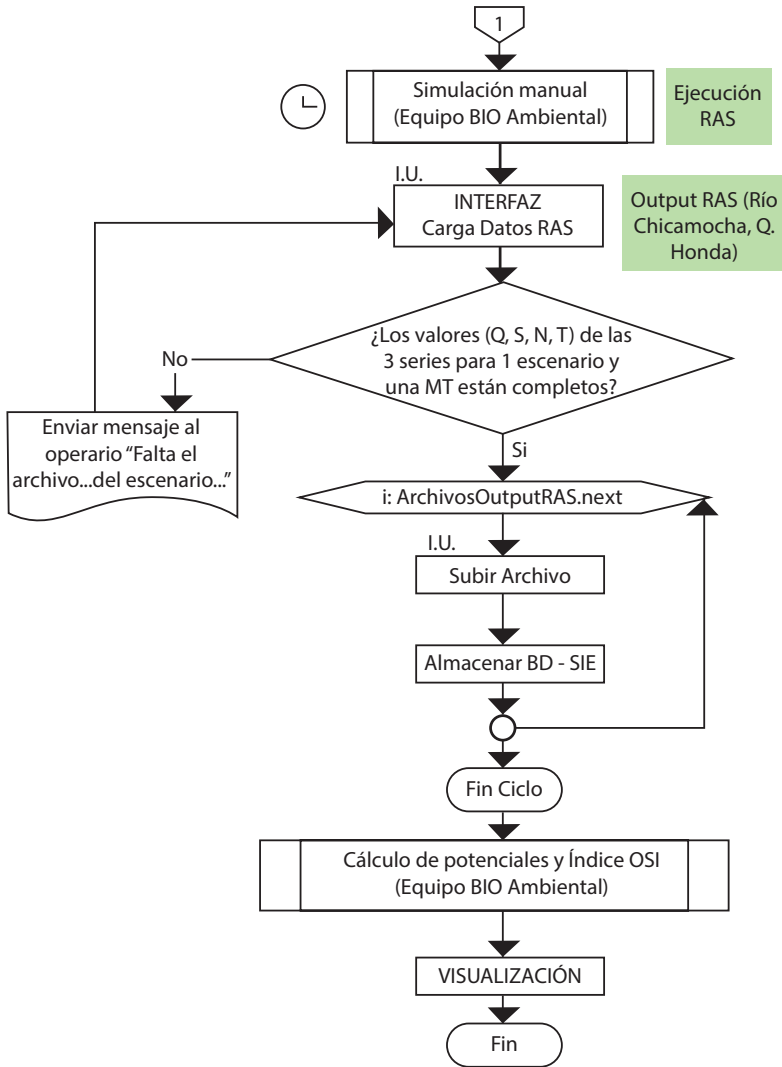


Fuente: elaboración propia.

El proceso de simulación se continúa en la figura 25.

1. El OEHS debe ejecutar el *software* HEC-RAS.
2. En una interfaz el operador debe cargar a la base datos SIE los datos de salida del *software* HEC-RAS, uno por cada serie de tiempo y hasta completar todos los escenarios que conforman la MT. Si falta algún archivo por cargar, el sistema debe informar al operario.
3. Se debe ejecutar el procedimiento que calcula los potenciales y el índice OSI.
4. Finalmente, el sistema debe permitir visualizar los resultados de los potenciales e índice OSI.

Figura 25. Flujograma proceso de simulación RAS



Fuente: elaboración propia.

4. Sistema de Información Socioecológico - SISE



En este capítulo se presenta la descripción conceptual de la estructura del sistema de información, incluyendo sus límites a nivel de *front end* y *back end*.

4.1 Límite del Sistema – General (Caso de Uso)

Una vez identificado el modelo general del proceso de negocio, se empieza con el detalle del sistema y se desarrollan los modelos de caso de uso, que permiten un entendimiento más detallado del mismo.

El primer modelo es el límite del sistema, el cual se presenta en la figura 26. Allí se describe la forma como el SISE (Sistema de información de la gestión para el fortalecimiento de la resiliencia del sistema sociológico asociado al lago Sochagota, el recurso termomineral del municipio de Paipa y a las dinámicas agrícolas regionales bajo escenarios de variabilidad climática –Sistema de Información Socio-Ecológico–) interactúa con los diferentes actores.

Como primer aspecto, los investigadores del proyecto validan los datos y son ingresados al sistema de persistencia, luego pasan por una serie de procesos en los cuales intervienen los modelos ambientales, los datos tratados son almacenados en el sistema de persistencia.

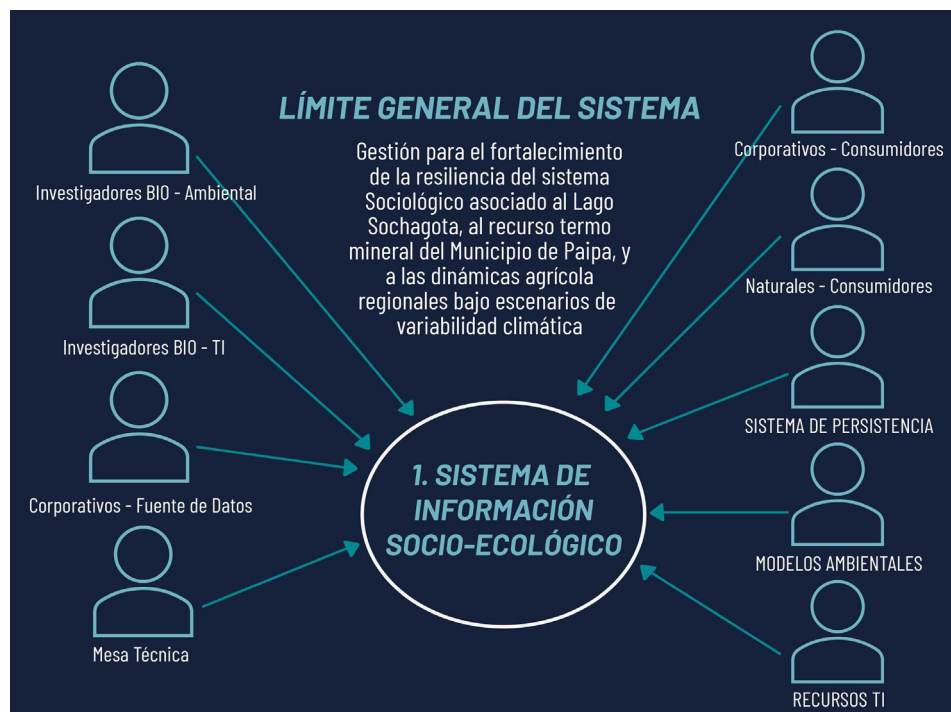
Posteriormente, la Mesa Técnica Principal analiza los datos generados, toma decisiones sobre la información que se socializará en el sistema web y, por último, los diferentes tipos de usuarios pueden consultar la información de diferentes formas.

En la figura 26 se pueden observar todos los actores que están involucrados en esta solución tecnológica, en donde cada uno de ellos cumple sus tareas respectivas que son fundamentales e importantes para poder lograr que el sistema sea óptimo y robusto. A continuación se describen las dos principales partes que conforman esta solución tecnológica: *back end* y *el front end*.

4.2 Back End

Este componente del sistema permite el tratamiento de los datos, que incluye cálculos, transporte, almacenamiento y transformación, entre otros. Así mismo, en este se realizan los enlaces con las herramientas tecnológicas necesarias para

Figura 26. Límite general del sistema

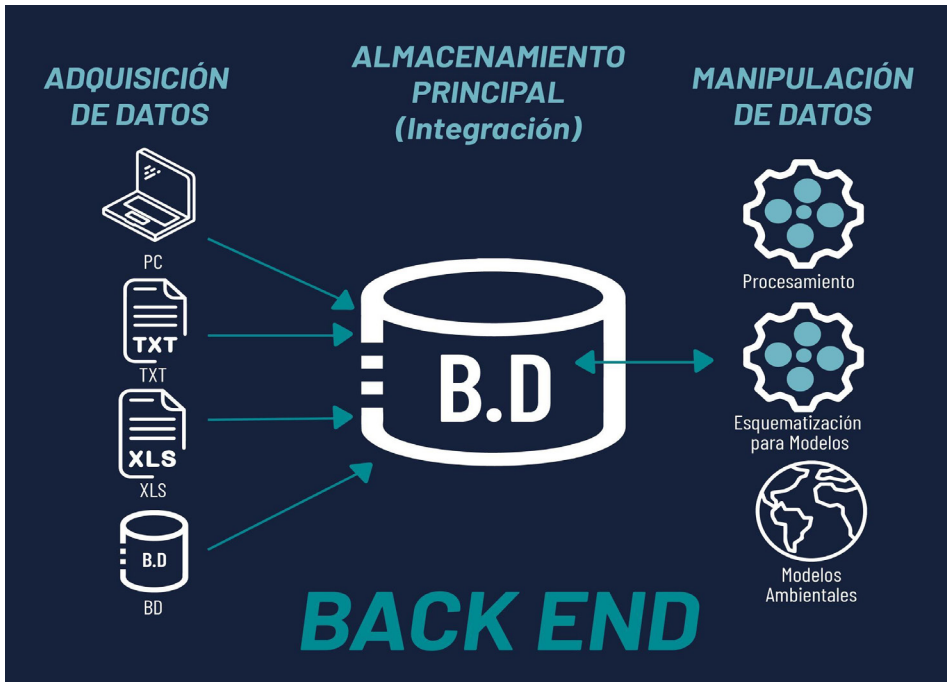


Fuente: el estudio, elaboración propia de los autores.

la ejecución eficiente y eficaz del proceso y, con ello, la obtención de resultados que se visualizarán a través del *front end* y a partir de los cuales los actores encargados tomarán decisiones.

El *back end* está compuesto por recursos lógicos (sistema de persistencia, algoritmos de lectura, almacenamiento y procesamiento de los datos y servicios web, entre otros) que soportan el tratamiento de los datos ingresados a través del *front end*, con el objeto de realizar las operaciones que permiten adquirir la información que posteriormente será utilizada por los diferentes actores del sistema. La gestión de modelos requiere una infraestructura tecnológica sobre la cual se instala la base de datos, se almacenan los algoritmos necesarios para la inserción, almacenamiento, procesamiento y consulta de los datos, los cuales han sido previamente validados por el equipo ambiental.

Figura 27. Descripción general del back end



Fuente: el estudio, elaboración propia de los autores.

De acuerdo con la figura 27, el *back end* se estructura en tres grandes componentes:

- **Adquisición de datos:** este componente tiene en cuenta los formatos que desde el equipo ambiental se estructuraron para la validación, esquematización, transporte e ingreso de los datos de las fuentes originales a la base de datos.
- **Manipulación de datos:** en este componente se encuentran los algoritmos que generan los archivos de datos de acuerdo con la estructura definida por el equipo Ambiental, los cuales son el insumo para la ejecución de los modelos ambientales (cada modelo requiere una estructura de archivo y unos datos diferentes). Así mismo, se cuenta con algoritmos para almacenar los resultados de las diferentes simulaciones en el sistema de persistencia.
- **Almacenamiento principal (integración):** el almacenamiento principal es una base de datos relacional, en la cual se estructuran todas las tablas y

las relaciones que son necesarias para la adecuada inserción, actualización, eliminación y consulta de los datos.

4.2.1 Límite del Sistema – Detallado (Back End)

El sistema se enfoca en la recepción de datos, almacenamiento de los mismos, procesamiento de estos a través de unos modelos ambientales, permitiendo de esta manera la gestión de escenarios para determinar cuál es el más adecuado de acuerdo con las condiciones ambientales involucradas en el proyecto.

Figura 28. Límite detallado del sistema (back end)

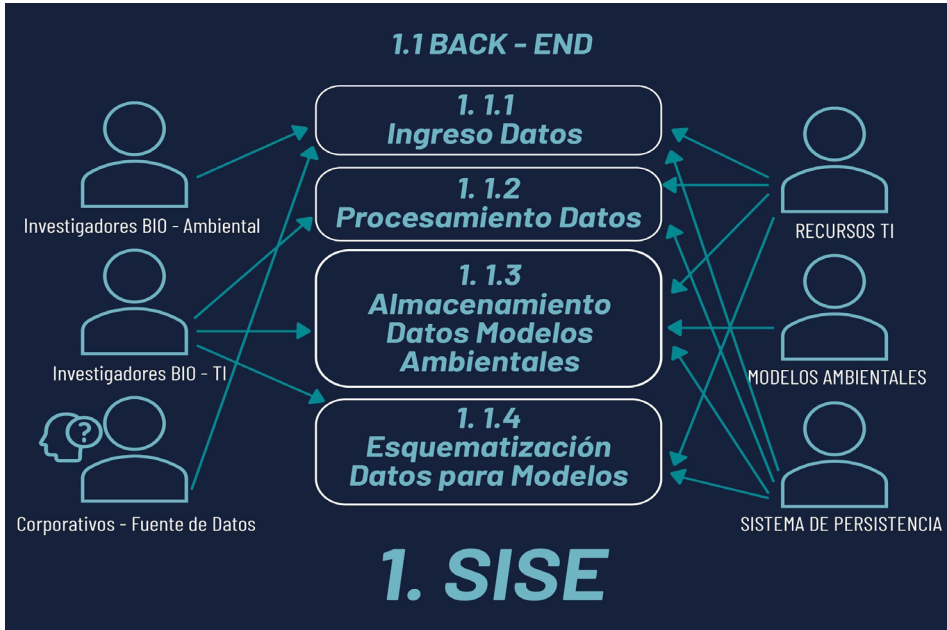


Fuente: el estudio, elaboración propia de los autores.

La figura 28 presenta el límite detallado del sistema en el *back end*. Los actores que interactúan en esta parte son los de los grupos: Investigadores BIO (tanto Ambiental como TI), los corporativos que son de las fuentes de datos, los recursos TI, el sistema de persistencia y los modelos ambientales, dentro de los cuales todos los actores tienen el mismo grado de importancia, pero uno de los grupos fundamentales es el Corporativo-Fuente de Datos, puesto que basados en los datos que estos brindan al sistema, los modelos generan la información que se almacena en el Sistema de Persistencia, siendo validados por los investigadores BIO-Ambiental y procesados por los investigadores BIO-TI.

4.2.2 Diagrama de Caso de Uso

Figura 29. Diagrama de caso de uso (back end)



Fuente: el estudio, elaboración propia de los autores.

En la figura 29 se puede visualizar el caso de uso del *back end*, en el cual se encuentran los actores (investigadores BIO-Ambiental, investigadores BIO-TI, corporativos-fuentes de datos, recursos TI, modelos ambientales y sistema de persistencia), siendo uno de los más importantes el corporativo, debido a que es el punto de partida del proceso, ya que facilita la materia prima (datos) para su desarrollo. Fundamentados en estos datos los demás actores interactúan con el sistema realizando las actividades propias de su rol.

Dado lo anterior y teniendo en cuenta el alcance del proyecto, se estableció una estructura modular con el fin de diseñar una solución que permite un desarrollo eficiente y eficaz del mismo. De acuerdo con las funcionalidades se identificaron 5 módulos principales, los cuales se mencionan a continuación:

- **Módulo de Administración.** En este módulo se encuentran los elementos que permiten al administrador del sistema crear usuarios y asignarles las diferentes opciones a las cuales tienen permiso teniendo en cuenta su rol.

- **Módulo de Configuración Básica.** A través de este módulo se realiza la gestión de las entidades que almacenan los datos base para el óptimo funcionamiento de los procesos.
- **Módulo de Algoritmos (Modelos).** Ofrece las funcionalidades ambientales implementadas (cálculo modelo clima, modelo de gestión, modelo hidrológico e hidráulico y el cálculo de índices y potenciales), de tal manera que se generan los datos que permitirán la toma de decisiones.
- **Módulo de Mesa Técnica.** A través de este módulo los actores responsables definen y simulan los diferentes escenarios para contar con información que permitirá evaluar y seleccionar la opción más adecuada para la gestión del recurso hídrico en la zona de influencia del proyecto.
- **Módulo de Informes SISE.** Por medio de este módulo los diferentes actores contarán con opciones que les permiten visualizar la información requerida para apoyar la toma de decisiones.

4.3 Front End

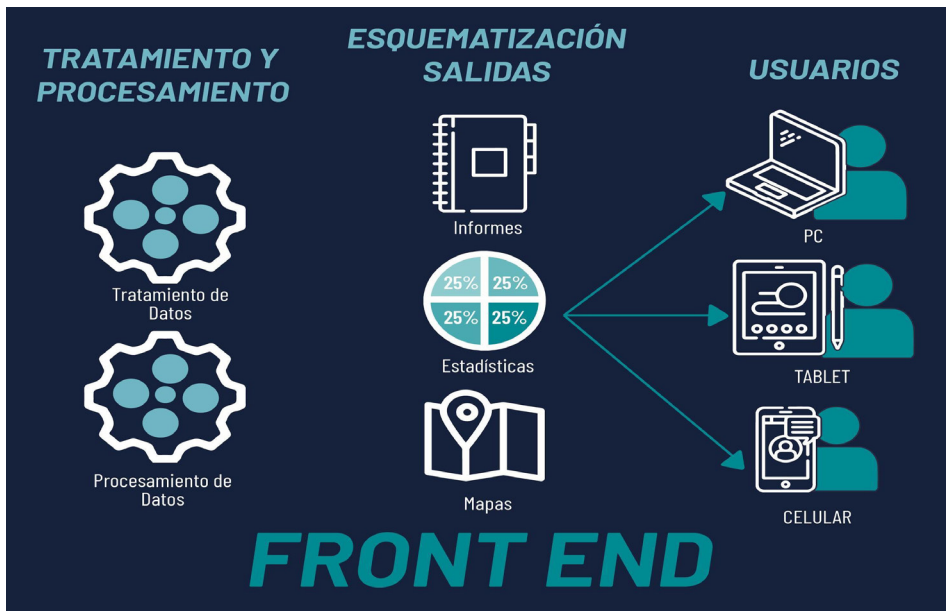
El *front end* consta de las interfaces que permiten el ingreso y visualización de datos en cada uno de los subprocesos que conforman el sistema; de esta manera, cada uno de los actores interactúa con el sistema realizando las actividades propias de su rol. Estas interfaces pueden ser accedidas a través de los tres grandes componentes tecnológicos del proyecto como se observa en la figura 30.

Como se puede observar en la figura 30, el *front end* consta de dos funcionalidades principales, las cuales se describen sucintamente a continuación:

- **Tratamiento y Procesamiento:** por medio de estas funcionalidades se preparan y se obtienen los datos necesarios para la toma de decisiones.
- **Esquematización de Salidas:** consiste en estructurar los datos de acuerdo a las necesidades de información de cada uno de los actores.

Otro de los elementos intervinientes en el uso del *front end* son los diferentes usuarios que pueden acceder al sistema desde diferentes dispositivos (celular, tablet, pc) de acuerdo a sus posibilidades de acceso a las tecnologías de información y necesidades de información.

Figura 30. Descripción general del front end



Fuente: el estudio, elaboración propia de los autores.

4.3.1 Límite del Sistema – Detallado

Figura 31. Límite del sistema – detallado (front end)



Fuente: el estudio, elaboración propia de los autores.

En la figura 31 se observan los actores que interactúan con el sistema de información para realizar actividades propias de sus funciones asignadas para el desarrollo del proceso de gestión del recurso hídrico, entre ellos se encuentran: investigadores, miembros de la Mesa Técnica (sobre ella cae la responsabilidad de validar la información que resultó de todo el proceso realizado en el *back end* del sistema) y los consumidores (corporativos, agricultores y ganaderos, entre otros) de la información generada por el sistema. Así mismo, se involucran dos actores desde el punto de vista tecnológico, el sistema de persistencia y recursos TI.

Los actores que hacen parte de la Mesa Técnica y los investigadores BIO-Ambiental cuentan con el conocimiento necesario para plantear escenarios de simulación base que sirvan de punto de partida para el análisis por parte de los participantes en la Mesa Técnica Principal, que tomarán la decisión final relacionada con el escenario que gestionará el recurso hídrico.

4.3.2 Diagrama de Caso de Uso

Figura 32. Diagrama de caso de uso (front end)



Fuente: el estudio, elaboración propia de los autores.

En la figura 32 se presentan los elementos y funcionalidades que permiten la interacción con el sistema a través de las interfaces y los reportes, incluyendo aspectos tecnológicos (sistema de persistencia y recursos TI (algoritmos, hojas de cálculo y formatos de intercambio de datos entre diferentes tecnologías); de esta manera se logra el ingreso, validación, procesamiento y visualización de datos para la adecuada toma de decisiones.

Dado lo anterior, con el fin de dar un mejor manejo, este se estructuró de la siguiente forma:

- **Módulo de Administración.** Este módulo contiene las interfaces de usuario que permiten las operaciones de consultar, crear, modificar y eliminar la información de usuarios, permisos, roles y la seguridad de parte del front end.
- **Módulo de Información Básica.** Este módulo contiene las interfaces de usuarios que permiten administrar la información de las tablas básicas que contienen los datos necesarios para el inicio del proceso.
- **Módulo de Mesa Técnica Ambiental.** Este módulo contiene las interfaces de usuario que permiten gestionar la Mesa Técnica Ambiental, gestionar los escenarios y consultar los resultados de las simulaciones a través de informes, así como seleccionar los escenarios que propondrán a la Mesa Técnica principal.
- **Módulo de Mesa Técnica Principal.** Este módulo contiene las interfaces de usuario que permiten gestionar la mesa técnica Principal, gestionar los escenarios, consultar los resultados de las simulaciones a través de informes y seleccionar el informe que será visualizado a través de la página web por los demás usuarios del sistema.



5. Acceso Democrático a la Información





Teniendo en cuenta que el proyecto busca brindar información oportuna a la comunidad del área de influencia, se determinó que es importante incluir mecanismos que permitan un acceso democrático a la información, es por ello que se implementó un sitio web (figura 33) y una aplicación móvil (figura 34), a través de las cuales los diferentes actores (agricultores, ganaderos y sector turístico, entre otros) pueden consultar la información que les permitirá tomar decisiones para el desarrollo de sus respectivas actividades.

Figura 33. Página principal sitio web



Fuente: el estudio, elaboración propia de los autores.

Figura 34. Página principal app



Fuente: el estudio, elaboración propia de los autores.

El sitio web está estructurado de tal manera que brinda facilidades para comprender y entregar la información que se está gestionando, con el fin de que los diferentes actores tengan acceso en cualquier lugar y momento a la misma y, de esta manera, poder tomar decisiones informadas sobre cómo pueden hacer uso del recurso hídrico desde la actividad que desarrollan.

Desde el punto de vista del usuario final, el sitio web fue implementado teniendo en cuenta las recomendaciones realizadas en los encuentros de participación ciudadana, con representantes de los diferentes actores que harán uso del sitio web, lo cual permitió incorporar características de usabilidad, logrando así un manejo intuitivo del aplicativo.

Para un mejor desarrollo y uso por parte del usuario, el sitio web se estructuró en un conjunto de micrositos, como son (figura 35):

- SIE
- ¿Cómo Interpretar?
- ¿Quiénes Somos?
- Noticias
- Preguntas Frecuentes
- Informe
- SISE

El sitio web cuenta con una opción para la gestión de los contenidos, la cual debe ser realizada por el administrador del sitio (acceso privado, figura 36); esta opción permite la configuración de la información (administrador editor) que se va a presentar al público en general (acceso público, figura 36).

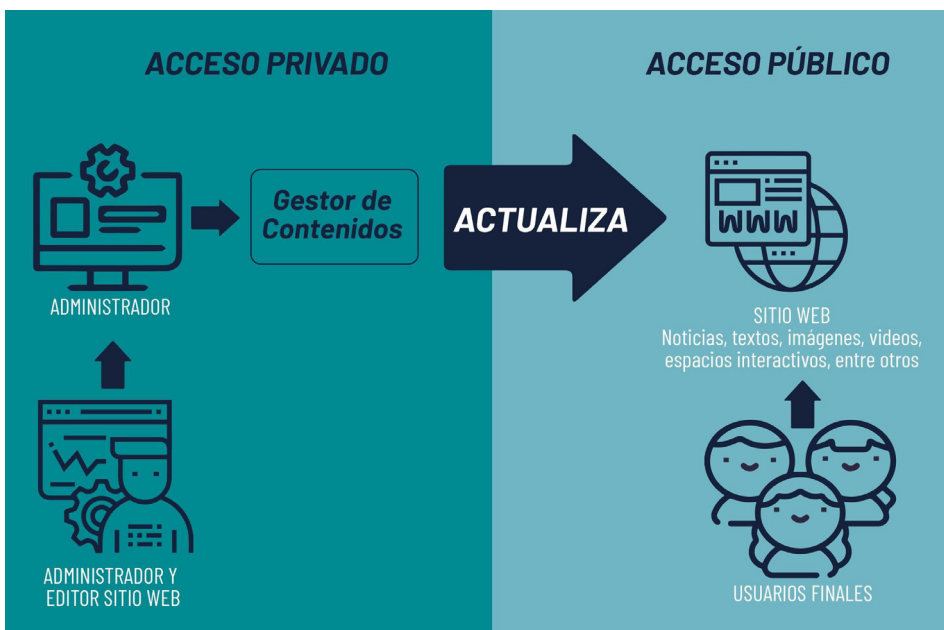
En el sitio web se encuentran los menús y las opciones que permiten consultar la información deseada de acuerdo con sus intereses.

Figura 35. Opciones principales sitio web



Fuente: el estudio, elaboración propia de los autores.

Figura 36. Sitio web – gestión de contenido

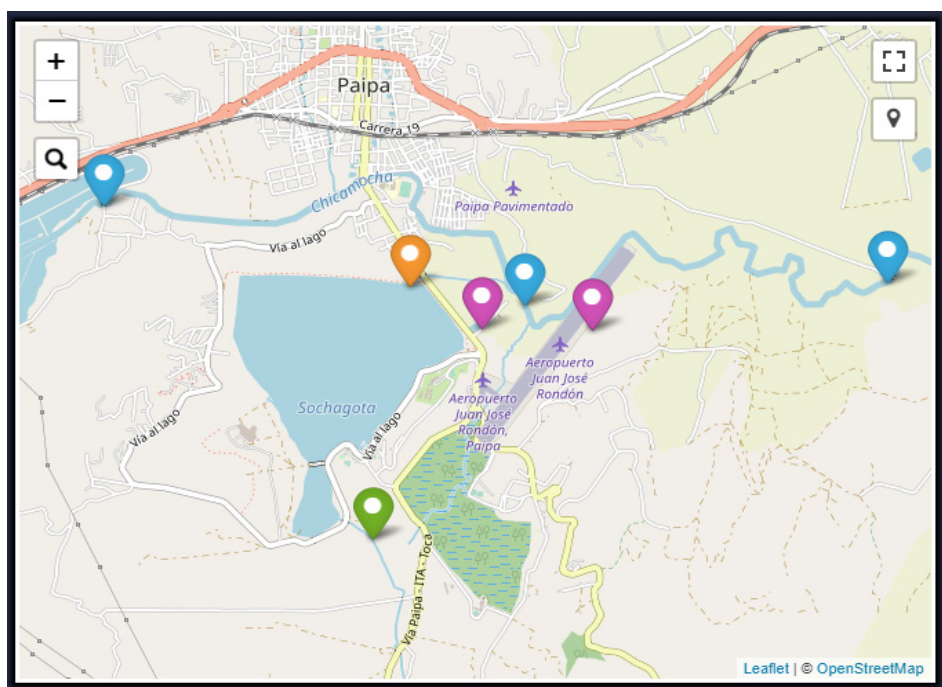


Fuente: el estudio, elaboración propia de los autores.

Una de las principales opciones de consulta es por medio de un mapa de la zona de estudio, donde se pueden consultar los datos de gestión en cada uno de los siete puntos ubicados en la zona de influencia del proyecto (figura 37), como son:

1. El río Chicamocha, a la altura de las piscinas de enfriamiento de Gensa.
2. El río Chicamocha, a la altura de la estación La Siberia.
3. El río Chicamocha, a la altura de la Unidad Holanda de Usochicamocha.
4. Quebrada Honda, a la altura del punto de entrada del agua al lago Sochagota.
5. Dársena 1, que se encuentra ubicada al lado de la estación de policía de Paipa.
6. Dársena 2, que se encuentra ubicada en el sector Salpa.
7. Las compuertas del lago Sochagota.

Figura 37. Puntos de gestión

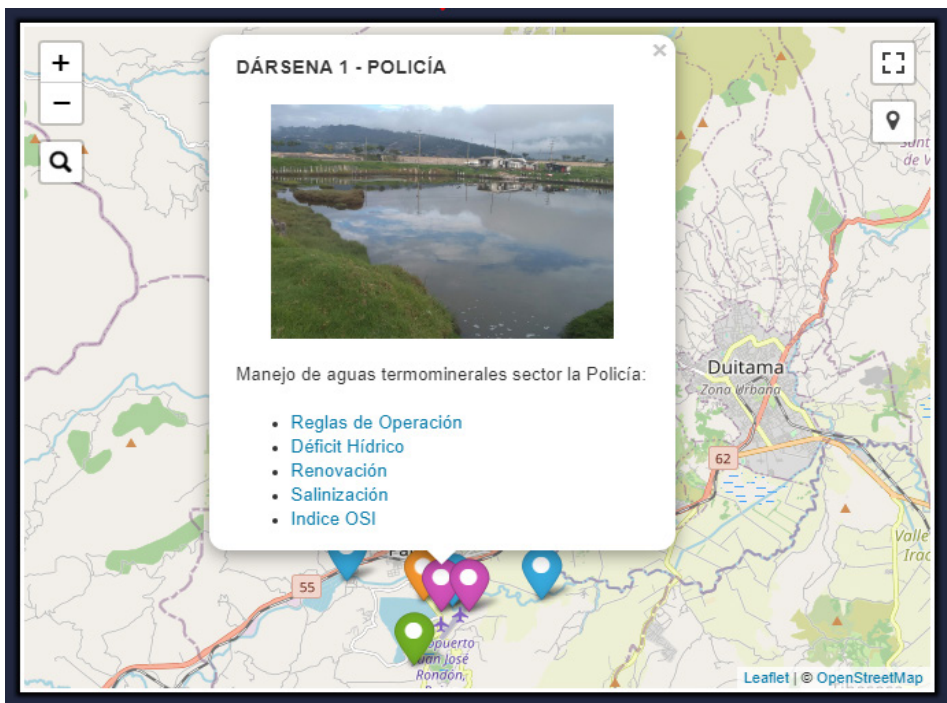


Fuente: el estudio, elaboración propia de los autores.

Cada punto de gestión permite visualizar por medio de informes los datos (figura 38) tales como:

- Potencial de Déficit Hídrico
- Potencial de Renovación
- Potencial de Salinización
- Índices OSI
- Reglas de Operación

Figura 38. Información detallada punto de gestión



Fuente: el estudio, elaboración propia de los autores.

Así mismo, como ayuda para poder analizar la información que se presenta en cada informe, se cuenta con un video que permite orientar al usuario sobre cómo interpretar el mismo y así poder tomar las decisiones más pertinentes frente al uso del recurso hídrico.

La segunda herramienta que permite acceso a la información del proyecto es la aplicación móvil, esta ofrece al usuario la facilidad de conectarse desde cualquier lugar en cualquier momento para consultar los datos que de acuerdo con sus necesidades requiere para la acertada toma de decisiones. En la figura 39 se presentan las imágenes de algunas de las interfaces de la aplicación móvil. El acceso para descargar la aplicación se encuentra en el sitio web, en la opción “Descargar App”.

Figura 39. Interfaces de la aplicación móvil



Fuente: el estudio, elaboración propia de los autores.

La aplicación móvil ofrece las principales opciones de consulta de información incluidas también en el sitio web, pero con la facilidad de acceder a estas desde un dispositivo móvil.

Conclusiones

Las tecnologías de información ofrecen beneficios que permiten la toma de decisiones por parte de los diferentes actores que convergen en el área de influencia del proyecto mediante el uso de herramientas, facilitando de esta manera el desarrollo de un conjunto de actividades propias de la región (ganadería, agricultura y turismo, entre otros).

Las integraciones de herramientas de tecnologías de información de diferentes proveedores con las desarrolladas por el equipo del proyecto logran una sinergia que ofrece una solución a la problemática abordada por el proyecto.

La arquitectura planteada para la solución tecnológica permitió la integración de los diferentes elementos necesarios para el desarrollo de los procesos inherentes al contexto de desarrollo del proyecto.

Con el planteamiento de la configuración de las mesas técnicas se logra agilizar el proceso de manera que los actores externos al proyecto y quienes son los que toman las decisiones sobre la gestión de recurso hídrico cuenten con un punto de partida a la hora de realizar los análisis necesarios que permitan la ejecución de un escenario de gestión, propendiendo por el uso democrático del recurso hídrico del área de influencia del proyecto.

Teniendo en cuenta que el sistema se diseñó de manera modular, permitirá una fácil escalabilidad de acuerdo con nuevos requerimientos que surjan de parte de los usuarios.

La seguridad del sistema se aborda desde cuatro diferentes niveles, uno de ellos, configurando las políticas de seguridad en el manejador de base de datos utilizado; a nivel de sistema operativo; un tercero por medio de las políticas implementadas en el *firewall* de la universidad, y un cuarto nivel que se implementó en el sistema de información creando usuarios que se autentican ante el sistema mediante una contraseña y asignando roles de acuerdo con el perfil del usuario, lo cual restringe el acceso a las diferentes opciones.

Referencias

- Amador, J. A., y Alfaro, E. J. (2008). Métodos de reducción de escala: aplicaciones al tiempo, clima, variabilidad climática y cambio climático. *Revista Iberoamericana de Economía Ecológica*, 11, 39-52. <https://onx.la/19224>
- Ávila Bernal, A. G., Ramos Franco, A., López Córdoba, A. F., Plazas Pérez, A. F., Muñoz García, A., Otálvaro A., A. M., Burbano Valdivieso, A. S., Acero Nito-la, A. M., Higuera Blanco, A. M., Sandoval Figueredo, A. V., Espinosa Blanco, A. S., Lesmes Fabián, C., Parra Vargas, C. A., Villate, C. A., Cardona Alzate, C. A., Báez Pérez, C. I., Ruiz Barajas, C. A., Ramos Montaña, C., Patiño Castillo, C. G., ... Sánchez Quitián, Z. A. (2022). *Acciones para la conservación y la sostenibilidad*. Ediciones Universidad Santo Tomás.
- Báez Pérez, C. I., Vargas Bermúdez, F. A., Bernal Bolívar, D. F., Ochoa Echeverría, M., Patiño Castaño, J. O., Castillo Rodríguez, B. H., . . . Hoyos Pastrana, E. (2020). *Modelo del sistema para la integración de información ambiental como herramienta de apropiación social del conocimiento*.
- Bentley Systems, Dyhouse, G., Hatchett, J., y Benn, J. (2003). *Floodplain Modeling Using HEC-RAS*. Bentley Institute Press.
- Bladé, E., Sánchez, M., Sánchez, H., y Niñerola, M. (2009). *Modelación numérica en ríos en régimen permanente y variable*. Edicions UPC.
- Chow, V. Te, Maidment, D. R., y Mays, L. W. (1988). *Applied hydrology*. McGraw-Hill. http://ponce.sdsu.edu/Applied_Hydrology_Chow_1988.pdf
- Equipo Proyecto BIO-293. (2020). *Informe final Contrato No. FP44842-293 de 2018*.
- Feldman A. (2000) Hydrologic Modeling System HEC-HMS: Technical Reference Manual. 157.
- Honaker, J., King, G., y Blackwell, M. (2018). AMELIA II: a Program for Missing Data. Versión 1.7.5. 54. *Journal of Statistical software*, 45(7).
- Horton, N. J., y Kleinman, K. P. (2007). Much ado about nothing: a comparison of missing data methods and software to fit incomplete data

regression models. *American Statistician*, 61(1), 79-90. <https://doi.org/10.1198/000313007X172556>

Li, N., Kinzelbach, W., Li, W. P., y Dong, X. G. (2015). Box model and 1D longitudinal model of flow and transport in Bosten lake, China. *Journal of Hydrology*, 524, 62–71. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.02.032>

López Candela, C. R. (2020). *Anexo PTF_BPMN: Diagrama de procesos de negocio usando BPMN*.

Medina, F., y Galván, M. (2007). Imputación de datos: teoría y práctica. In Estudios estadísticos y prospectivos (Vol. 4). <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/02dd479f-fae2-43c4-b5ec-5419fa7f6190/content>

Sierra-Cárdenas, E., Usaquén-Perilla, O., Fonseca-Molano, M., Ochoa-Echeverría, M., Díaz-Gómez, J., y del Jesús, M. (2022). SIE-Climate: A methodological and technological tool for predicting local climate variability in managing socio-ecological systems. *International Journal of Climatology*, 42(2), 868–888. <https://doi.org/10.1002/JOC.7277>

Universidad de Boyacá, Equipo Proyecto B-293. (2020). *Resiliencia y gestión de sistemas socioecológicos estratégicos para la actividad agrícola, en escenarios de variabilidad climática. Caso de estudio: lago Sochagota (Boyacá, Colombia)*.

US Army Corps of Engineers. (2000). *Hydrologic Modeling System Technical Reference Manual*. Army Corps of Engineers.

Usaquén Perilla, O. L., García Gómez, A., García Gómez, A., Álvarez Díaz, C., y Revilla Cortezón, J. A. (2012). Methodology to assess sustainable management of water resources in coastal lagoons with agricultural uses: An application to the Albufera lagoon of Valencia (Eastern Spain). *Ecological Indicators*, 13(1), 129-143. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.05.019>

Usaquén-Perilla, O. L. (2017). *Desarrollo de una metodología para la gestión ambiental de humedales costeros y continentales sometidos a presiones agrícolas*. [Tesis Universidad de Cantabria]. Repositorio UCrea. <http://hdl.handle.net/10902/11538>

Glosario

Eutrofización: proceso que ocurre en sistemas acuáticos y terrestres de forma natural o por presiones antropogénicas, en respuesta al excesivo aporte de nutrientes. Se manifiesta en cambios de la calidad del agua, la composición y diversidad de plantas acuáticas, algas y biomasa, aumento en la turbiedad y disminución de oxígeno disuelto, entre otras consecuencias socioecológicas.

Evapotranspiración: transferencia de agua hacia la atmósfera debido a la transpiración y a la evaporación desde el suelo, las plantas y la superficie del agua.

Gestión: proceso dinámico de planificación, manejo y evaluación, con el cual se busca la maximización del bienestar y los beneficios socioeconómicos y biogeofísicos de un sistema.

Índice macroclimático: valor numérico que puede ser usado para describir el estado y los cambios en el sistema climático a escala macro regional.

Índice OSI: valor numérico que refleja la frecuencia y ocurrencia de uno o más efectos asociados a la renovación, la salinización y el déficit hídrico, con el fin de evaluar la gestión en un punto de interés o sistema.

Limnimétrica: estación en donde una persona mide y registra el nivel de una corriente o sistema hídrico mediante un aparato (mira dividida en centímetros).

Potencial de renovación: variable de base hidrodinámica que representa la susceptibilidad de un dominio o sistema que puede presentar problemas de eutrofización asociados con la renovación del agua.

Potencial de salinización: variable de base hidrodinámica que representa la susceptibilidad de un dominio o sistema que puede presentar problemas asociados a la acumulación o dilución de sales en el agua.

Potencial de déficit hídrico: variable de base hidrodinámica que representa la susceptibilidad de un dominio o sistema que puede presentar problemas asociados a la disponibilidad de agua para los usos o servicios existentes o propuestos.

Presiones antropogénicas: factores o condiciones derivados de la actividad humana o dependientes de sus decisiones y que ejercen un efecto en un sistema.

Resiliencia: capacidad de un sistema socioecológico de anticipar, absorber, adaptarse, realimentarse, transformarse y autoorganizarse ante los efectos de una perturbación o cambio, para conservar en esencia su misma función, estructura e identidad.

Sistema léntico: cuerpos de agua que comprenden las aguas interiores, tales como los lagos, lagunas, esteros y pantanos, entre otros. Presentan flujos de entrada o salida no continua, regulados o de baja velocidad.

Sistema lótico: cuerpos de agua en los cuales el movimiento es predominantemente en una dirección (ríos, manantiales, arroyos). Su dinámica es afectada, entre otros, por factores físicos, como: pendiente, caudal, profundidad, sinuosidad.

Sistema socioecológico. Unidad biogeofísica interrelacionada con uno o más actores o sistemas sociales implicados o interesados en su gestión.

Variabilidad climática: dinámica del clima que se presenta en diferentes escalas, intraestacional (cambios diarios o mensuales), interanual e interdecadal (en ciclos más largos que pueden estar asociados o no a cambios climáticos).

Este libro se terminó de imprimir
en el mes de enero de 2025 en
Búhos Editores Ltda.