

□ Evaluación y comparación de un diseño de un sistema de alcantarillado pluvial convencional y un sistema de drenaje mediante tecnología SUDS, para el sector de Mochuelo Bajo, en la localidad de Ciudad Bolívar, en Bogotá, D.C.

□ Análisis de prefactibilidad para un proyecto de microgeneración hidroeléctrica a partir de estructuras existentes para el control de socavación en un río de montaña. Caso del río Cáqueza.

□ Lineamientos para la implementación de un sistema de gestión de activos sostenible, en la infraestructura de transporte carretero departamental. Caso de estudio: Cundinamarca (Colombia).

□ Metodología para la implementación de redes peatonales a nivel de intralocalidad. Caso de estudio: Localidad Engativá, Bogotá, D.C.

□ Diagnóstico de la planta de tratamiento de agua potable San Antonio-Santa Bárbara del municipio de Arbeláez (Cundinamarca).

□ Solución de alternativa de tratamiento de aguas residuales para el municipio de Mesetas, departamento del Meta.



## CONSEJO DIRECTIVO DE LA ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA

**PRESIDENTE** JAVIER BOTERO ÁLVAREZ

**VOCALES** GERMÁN EDUARDO ACERO RIVEROS  
GONZALO JIMÉNEZ ESCOBAR  
ARMANDO PALOMINO INFANTE  
RICARDO QUINTANA SIGHINOLFI  
RICARDO RINCÓN HERNÁNDEZ  
ROBERTO RÍOS MARTÍNEZ  
JAIRO ALBERTO ROMERO ROJAS  
GERMÁN RICARDO SANTOS GRANADOS  
JAVIER ALBERTO CHAPARRO PRECIADO  
(representante de los profesores)  
PEDRO PABLO VERGARA NEIRA  
(representante de los estudiantes)

**RECTOR** HÉCTOR ALFONSO RODRÍGUEZ DÍAZ

**SECRETARIA GENERAL** CLAUDIA JEANNETH RÍOS REYES

## REVISTA DE LA ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA

**DIRECTOR** JAIRO ALBERTO ROMERO ROJAS

**COMITÉ EDITORIAL** GERMÁN ACERO RIVEROS  
CLAUDIA JEANNETH RÍOS REYES  
PAULA XIMENA RÍOS REYES  
GERMÁN RICARDO SANTOS GRANADOS  
EDUARDO SARMIENTO PALACIO

**DIRECCIÓN EDITORIAL** CRISTINA SALAZAR PERDOMO

**EDICIÓN** **DISEÑO Y DIAGRAMACIÓN**  
JORGE CAÑAS SEPÚLVEDA  
**CORRECCIÓN DE ESTILO**  
ELKIN RIVERA GÓMEZ  
**TRADUCCIÓN Y CORRECCIÓN DE ESTILO EN INGLÉS**  
DAVID PEÑA CITA

**DIRECCIÓN COMERCIAL** EDITORIAL ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA

Versión digital disponible en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

AUTOPISTA NORTE AK 45 # 205-59  
TEL.: (57-1) 668 3600, EXT. 533  
[revista@escuelaing.edu.co](mailto:revista@escuelaing.edu.co)  
BOGOTÁ, D.C., COLOMBIA

LA ESCUELA Y LA REVISTA NO SON RESPONSABLES DE LAS IDEAS Y CONCEPTOS EMITIDOS POR LOS AUTORES DE LOS TRABAJOS PUBLICADOS. SE AUTORIZA LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL DE LOS ARTÍCULOS DE LA REVISTA SI SE CITAN LA FUENTE Y EL AUTOR.

## 5 / EDITORIAL

### Transición energética en Colombia

*Hugo Iván Forero Bernal*

## 7-15

### Evaluación y comparación de un diseño de un sistema de alcantarillado pluvial convencional y un sistema de drenaje mediante tecnología SUDS, para el sector de Mochuelo Bajo, en la localidad de Ciudad Bolívar, en Bogotá, D.C.

*Laura Rocío Bucheli Campos - Ana Gabriela Rodríguez Romero - Germán Acero Riveros*

Con el presente estudio, se busca dar solución al problema de manejo de aguas lluvias en el sector de Mochuelo Bajo, el cual actualmente genera inundaciones y represamientos de aguas tanto pluviales como residuales en diferentes sectores de la zona. Para esto se diseñó un sistema de alcantarillado pluvial convencional, así como un sistema donde se implementen SUDS.

## 17-32

### Análisis de prefactibilidad para un proyecto de microgeneración hidroeléctrica a partir de estructuras existentes para el control de socavación en un río de montaña. Caso del río Cáqueza

*Nelson Hernán Leyton - Germán Santos Granados*

En este artículo se presenta un análisis de prefactibilidad para un proyecto de generación hidroeléctrica a partir de estructuras para control de socavación existentes en un río de montaña. Se analiza el caso de un tramo del río Cáqueza, ubicado entre los kilómetros 18 y 25 de la vía Bogotá-Villavicencio, en el cual se han construido 34 diques transversales tipo azud para el control de la socavación general.

## 33-39

### Lineamientos para la implementación de un sistema de gestión de activos sostenible, en la infraestructura de transporte carretero departamental. Caso de estudio: Cundinamarca (Colombia)

*Camilo José Guzmán Guevara - Maritza Cecilia Villamizar Roperó*

En 2019, el modo carretero contó con el 77 % de las asignaciones del sector del transporte en Colombia, inversiones asociadas principalmente a mejorar el estado de la infraestructura vial, que asciende a unos 205.379 kilómetros de vías, con el 78 % a cargo de departamentos y municipios, deterioro que sigue generando pérdida de competitividad frente a la región y el resto del mundo.

## 41-49

### Metodología para la implementación de redes peatonales a nivel de intralocalidad. Caso de estudio: Localidad Engativá, Bogotá, D.C.

*Ana Milena Lemus Arias - Mónica Suárez Pradilla*

El objetivo del presente trabajo es identificar posibles corredores peatonales dentro de la localidad de Engativá, de la ciudad de Bogotá, para lo cual se estructuró una metodología mixta que mezcla métodos de ingeniería de tránsito y un método de análisis multicriterio, y utiliza información demográfica, urbanística, de usos de suelo, conectividad y tránsito para identificar corredores peatonales en el sector suroriental de la localidad de Engativá.

## **51-54**

### **Diagnóstico de la planta de tratamiento de agua potable San Antonio-Santa Bárbara del municipio de Arbeláez (Cundinamarca)**

*Elkin Daniel Huertas Daza – Jairo Alberto Romero Rojas*

En este artículo se presentan el diagnóstico y las propuestas de optimización de la PTAP, teniendo en cuenta los resultados de la evaluación realizada.

## **55-68**

### **Solución de alternativa de tratamiento de aguas residuales para el municipio de Mesetas, departamento del Meta**

*Manuel Salazar Cuevas - Jairo Alberto Romero Rojas*

En este artículo se presenta el análisis de cinco opciones de tratamiento que permitan al municipio cumplir con los requerimientos exigidos en los objetivos de calidad para el río Güejar. Los sistemas de tratamiento analizados son tecnologías que logran eficiencias en remoción de carga de DBO, DQO y SST superiores al 95 %.

## **69 / ALCANCE Y POLÍTICAS**

# Editorial

## Transición energética en Colombia

**HUGO IVÁN FORERO BERNAL**

Decano de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

hugo.forero@escuelaing.edu.co

Mucho se ha hablado en estos días del tema de la transición energética, aunque no todos sepan exactamente de qué se trata. La verdad es que el mundo siempre ha estado en este proceso.

En la actualidad, la transición energética es un proceso de cambio de una forma de producción y uso de la energía a otro que pueda incluir fuentes renovables de energía y no renovables, que tienen que ver con el binomio producción-consumo en los modelos económicos actuales. Esta transición surge a raíz de los cambios climáticos producidos principalmente por la emisión de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), que contamina y genera el efecto invernadero y el aumento de la temperatura global. De acuerdo con Enel Green Power, la Tierra se está sobrecalentando más rápidamente; en tan solo un año, el 2020, la temperatura promedio fue  $1,02\text{ }^\circ\text{C}$  más elevada que en el periodo 1950-1980, es decir, en 30 años.

En razón de lo anterior, se podría continuar con la fusión de los glaciares y la subida del nivel del mar; incluso es posible que se produjeran otros efectos, tales como convertir las tierras en desiertos o llegar a fenómenos extremos del clima, como huracanes, incendios e inundaciones, cuya ocurrencia es cada vez más frecuente. Algunos autores comentan que al incrementarse la cantidad de agua dulce que llega al mar desde los glaciares, muchos de los organismos que viven en el agua salada se irán más a la profundidad y varias de las especies que se alimentan de estos organismos desaparecerían

de los alrededores de la superficie del océano para ir a buscar sus alimentos a mayores profundidades, lo que afectaría la vida marina actual.

En este orden de ideas, vale la pena conocer cuáles son los principales productores de  $\text{CO}_2$  en el mundo a 2019, en millones de toneladas: China (10.490), Estados Unidos (5236), India (2026), Rusia (1679), Japón (1106), Irán (733) y Alemania (711). Después vienen otros países que producen entre 500 y 700 millones de toneladas al año, como Indonesia, Corea del Sur y Arabia Saudita. Algunas naciones latinoamericanas, como Brasil y México, están un poco por debajo de los 500 millones de toneladas, todos ellos asociados a su mayor producción industrial, a la ganadería y al transporte que utiliza combustibles fósiles (<https://elordenmundial.com/EOM>).

De acuerdo con el Ideam, Colombia produce alrededor de 240 millones de toneladas, de los cuales aproximadamente el 44 % es generado por el sector energético y el 43 % por el sector ganadero. Otros mencionan que en la matriz energética en Colombia, el  $\text{CO}_2$  se distribuye en uso del suelo (33 %), sector agropecuario (22 %), minas y energía (13 %), transporte (12 %), manufactura (11 %) y otros en porcentajes menores. A su vez, la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO, por su sigla en inglés) atribuye un gran porcentaje de la producción de  $\text{CO}_2$  a la ganadería, debido principalmente a la tala de bosques para producción de pastos

(Colombia es el número 137 entre los 184 países que emiten dióxido de carbono y que llevan esta medida, teniendo en cuenta que el primero es el que más CO<sub>2</sub> produce).

Colombia se comprometió a reducir en un 51 % las emisiones de dióxido de carbono y a ser un país de carbono neutro para el año 2050, lo cual parece una meta muy ambiciosa y difícil de lograr. La transición energética debe ser gradual, teniendo en cuenta todas las implicaciones que esto trae, tales como cambiar costumbres de consumo de energía y de uso de combustibles, hacer cambios tecnológicos que tienen implicaciones económicas para el binomio producción-consumo de nuestros modelos actuales, etc., aun cuando en el presente las personas sean más conscientes de la necesidad de cambiar en estos aspectos.

Para finalizar, se enumeran a continuación algunas de las acciones que le recomiendan tomar al país para lograr bajar estos porcentajes en el tiempo. Estas son:

1. Reducir el uso de vehículos propulsados por combustibles fósiles (por ejemplo, conducir 50 km menos cada semana disminuye en 450 kilogramos al año la emisión de CO<sub>2</sub> a la atmósfera).
2. Cambiar el tipo de movilidad por movilidad sostenible (movilidad masiva más ecológica, caminatas, o bicicletas movidas por esfuerzo humano).
3. Aumentar la eficiencia energética de aquellos productos que consuman energía.
4. Disminuir las quemas para limpiar terrenos.
5. Aprovechar los efectos bioclimáticos para las construcciones.
6. Reutilizar elementos de un solo uso (economía circular).
7. Sembrar árboles.
8. Consumir energías renovables (hidráulica, solar, eólica, nuclear, etc.).
9. Seguir una dieta baja en huella de carbono. Para esto, hay que evitar los productos que necesitan más energía o más recursos naturales en su proceso de producción, se deben transportar desde sitios alejados o requieren un sistema de envasado bastante complejo.
10. Consumir alimentos de kilómetro 0, cadena corta o muy cerca del usuario.

# Evaluación y comparación de un diseño de un sistema de alcantarillado pluvial convencional y un sistema de drenaje mediante tecnología SUDS, para el sector de Mochuelo Bajo, en la localidad de Ciudad Bolívar, en Bogotá, D.C.

Assessment and comparison of a conventional stormwater sewer system and an SDUS drainage system for the Mochuelo Bajo sector in the locality of Ciudad Bolívar in Bogotá D.C.

LAURA ROCÍO BUCHELI CAMPOS<sup>1</sup> - ANA GABRIELA RODRÍGUEZ ROMERO<sup>2</sup> - GERMÁN ACERO RIVEROS<sup>3</sup>

1. Maestría en Ingeniería Civil de la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería.
2. Maestría en Ingeniería Civil de la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería.
3. Profesor titular de la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería.

laura.bucheli@mail.escuelaing.edu.co - ana.rodriguez-ro@mail.escuelaing.edu.co - german.acero@escuelaing.edu.co

Recibido: 10/04/2022 Aceptado: 17/05/2022

Disponible en [http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones\\_revista](http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista)  
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

## Resumen

Con el presente estudio, se busca dar solución al problema de manejo de aguas lluvias en el sector de Mochuelo Bajo, el cual actualmente genera inundaciones y represamientos de aguas tanto pluviales como residuales en diferentes sectores de la zona. Para esto se diseñó un sistema de alcantarillado pluvial convencional, así como un sistema donde se implementen SUDS.

Con base en los diseños realizados se hizo una comparación técnica, económica, ambiental y operativa de los sistemas, con el fin de identificar cuál es el más adecuado para la zona de estudio, teniendo en cuenta que ambos diseños dan solución al problema citado.

Los resultados demostraron que las tipologías SUDS son técnica, ambiental y socialmente más efectivas que un alcantarillado netamente convencional; sin embargo, la implementación de estos está limitada a disponibilidad de áreas, urbanismo y recursos económicos, por lo que, para el caso específico de estudio, en el que el desarrollo urbano se ha llevado a cabo de manera informal y no se cuenta con un urbanismo adecuado, esta no es la opción más eficiente.

La implementación de SUDS implica una evaluación de condiciones iniciales específicas para su uso, por lo que, en condiciones de desarrollo urbano ideales, es recomendable evaluar la aplicabilidad de este tipo de sistemas, ya que ofrece beneficios importantes en factores ambientales y sociales.

**Palabras claves:** SUDS, agua, escorrentía, alcantarillado.

## Abstract

The aim of this study is to provide a solution to the problem of stormwater management in the Mochuelo Bajo sector, which currently experiences flooding and water blockages from both rainfall and wastewater in different areas of the zone. The study involves designing a conventional stormwater sewer system and a system incorporating Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS).

Based on the designs conducted, a technical, economic, environmental, and operational comparison of the systems was conducted to identify which one is more suitable for the study area, considering that both designs address the problem.

The results demonstrated that the implementation of SUDS typologies is more technically, environmentally, and socially effective than the implementation of a purely conventional sewer system. However, the implementation of SUDS is limited by the availability of space, urban planning considerations, and financial resources. Therefore, for the specific case of the study area, where urban development has taken place informally and lacks proper urban planning, SUDS may not be the most efficient option.

The implementation of SUDS requires an evaluation of specific initial conditions for its use. Under ideal urban development conditions, it is recommended to assess the applicability of such systems as they offer significant benefits in terms of environmental and social factors.

**Keywords:** SUDS, water, runoff, sewer.

## INTRODUCCIÓN

Debido al crecimiento exponencial de las ciudades y el aumento de zonas duras no permeables y los volúmenes de escorrentía, acompañados del cambio climático, es importante implementar sistemas que mitiguen los problemas asociados al deficiente funcionamiento de los alcantarillados pluviales convencionales cuando se presentan eventos extremos.

Esto condujo a implementar sistemas alternativos no convencionales que, mediante soluciones basadas en la naturaleza, mitiguen y retrasen los picos de las tormentas, evitando así el colapso de las redes de alcantarillado. De igual manera, se ha comprobado que la aplicación de los sistemas de drenaje urbano sostenibles (SUDS) no solo genera un beneficio técnico, sino que, debido a que en su mayoría están acompañados de la implementación de zonas verdes y renovación urbana, hay una mejora en la conductividad de las especies de fauna y en la calidad de vida de la población beneficiada, así como un aumento de las coberturas vegetales.

Se tiene como caso de estudio el sector de Mochuelo Bajo, en la localidad bogotana de Ciudad Bolívar, tomando como base el contrato de consultoría Uaesp-752-2020, cuyo objeto es “Elaboración de los estudios y diseños detallados para completar al 100 % las redes de alcantarillado sanitario y pluvial de Mochuelo Alto y Mochuelo Bajo y la optimización de la planta de aguas residuales de ambos sectores, en la localidad de Ciudad Bolívar”.

Para el desarrollo de los estudios se siguieron diferentes normas dadas por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), así como la normativa nacional. La implementación de las tipologías SUDS se hizo con base en la guía técnica

desarrollada por la Universidad de los Andes, la cual pertenece al anexo técnico de la NS-166 de la EAAB, la cual centra los estudios en la ciudad de Bogotá. De igual manera, la guía acompaña la selección de los trenes de tratamiento más adecuados, de acuerdo con los objetivos buscados.

## RESULTADOS

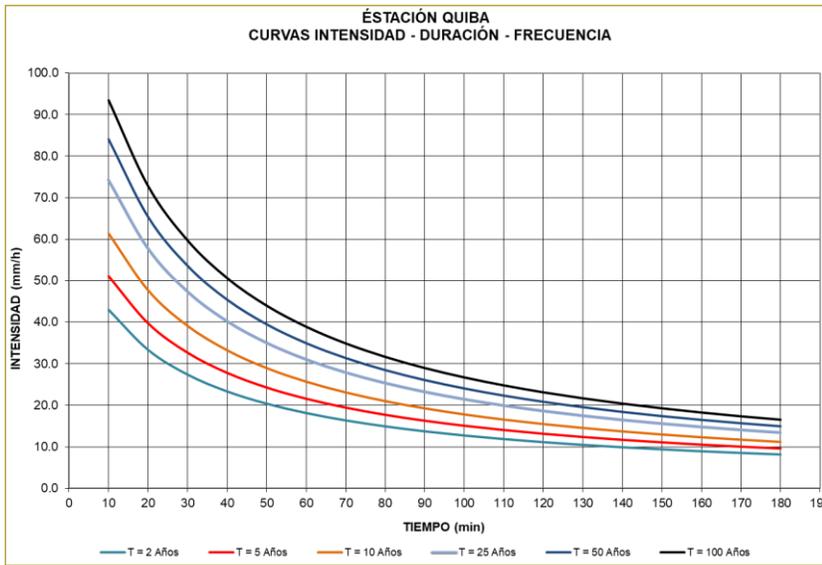
Para hacer la caracterización hidrológica de las cuencas hidrográficas y áreas aferentes en la zona de estudio, se realizó una búsqueda de estaciones hidroclimáticas y se seleccionaron aquellas cuya distribución geográfica es representativa para la localización del área de estudio, lo que dio como resultado un conjunto de diez estaciones; luego de validar el periodo de registro y hacer un análisis de homogeneidad, se descartaron seis estaciones.

Por último, mediante los polígonos de Thiessen se halló que la estación Quiba, perteneciente a la red hidrometeorológica del Ideam, es aquella que tiene influencia en la zona de estudio; así se obtuvieron las curvas intensidad-duración-frecuencia aferentes a la estación para diferentes intensidades y periodos de retorno (figura 1).

Actualmente, el sistema de alcantarillado del sector de Mochuelo Bajo, en la localidad de Ciudad Bolívar, cuenta con un total de 189 pozos de inspección, de los cuales 54 se encuentran sellados o bajo concreto o cobertura vegetal, mientras que los 135 pozos restantes sí se pudieron inspeccionar. Durante las actividades de catastro se identificaron cinco sumideros en los sectores de Paticos y Lagunitas. A continuación, se muestra gráficamente su localización. El sistema de alcantarillado sanitario está compuesto por 242 tramos que constan de tuberías de varios tamaños, cuyos diámetros están entre 6”, 8”, 10”, 12” y 14”.

Para hacer la evaluación hidráulica de la infraestructura existente y las alternativas 1 y 2, se determinan los caudales por medio de un análisis de lluvia - escorrentía. La metodología de cálculo de caudales máximos instantáneos corresponde a un método indirecto denominado el método racional; esto se realiza para hoyas menores de 2,50 km<sup>2</sup>.

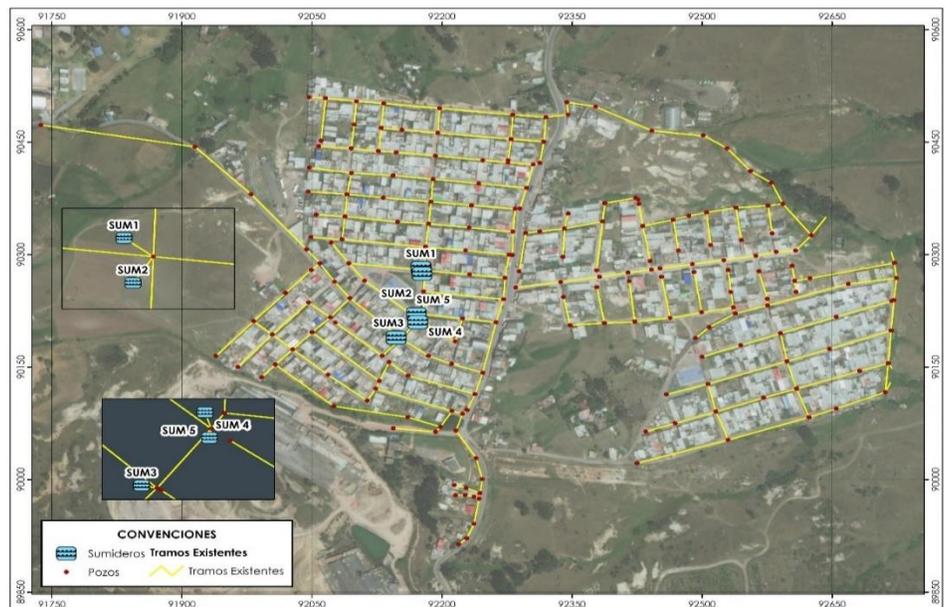
Para los diseños de las tipologías SUDS contempladas, es necesario determinar los parámetros hidro-



**Imagen 1.** Curvas IDF de la estación Quiba.

lógicos de la zona, incluyendo la profundidad de la lluvia ( $h_p$ ) y la profundidad de la lámina de agua, para establecer el volumen de tratamiento ( $hWQCV$ ), el caudal de diseño ( $Q_d$ ) y el caudal pico para el periodo de retorno de diez años ( $Q_{10}$ ). Así, para el predimensionamiento de las tipologías SUDS factibles para el proyecto, se utilizan las hojas de cálculo del Anexo C de la norma NS-166 de la EAAB, en las cuales se realiza el cálculo del volumen de calidad con base en la altura de precipitación definida para la ciudad de Bogotá, dadas las coordenadas de ubicación de la tipología que se va a implementar.

Para la evaluación hidráulica de la infraestructura existente (figura 2) se encontró que en 21 de los tramos de la red de alcantarillado no se logró calcular su capacidad, debido a que estos tramos presentan pendientes negativas. Al incluir aportes pluviales al sistema, se evidencia que tanto para el periodo de retorno de cinco años como para el de diez años, se presentan tramos subdimensionados; por otro lado, se evidencian velocidades máximas y superiores al rango establecido en la normativa vigente. Se observan valores superiores de fuerza tractiva al rango, lo cual implica una contribución a procesos erosivos del material de la tubería



**Figura 2.** Alcantarillado existente.

**Tabla 1**  
Características de la alternativa 1

Estructura	Cantidad	Unidad	Descripción
Cabezal de descarga	5	un	Concreto
Sumideros nuevos laterales	7	un	Sumidero de rejilla - caja sencilla en la vía
Sumideros nuevos transversales	73	un	ST- 1 L=6 m
Sumideros por renovar transversales	5	un	ST- 1 L=6 m
Pozos nuevos	79	un	Concreto 36"
Canal abierto rectangular	319,9	m	Concreto

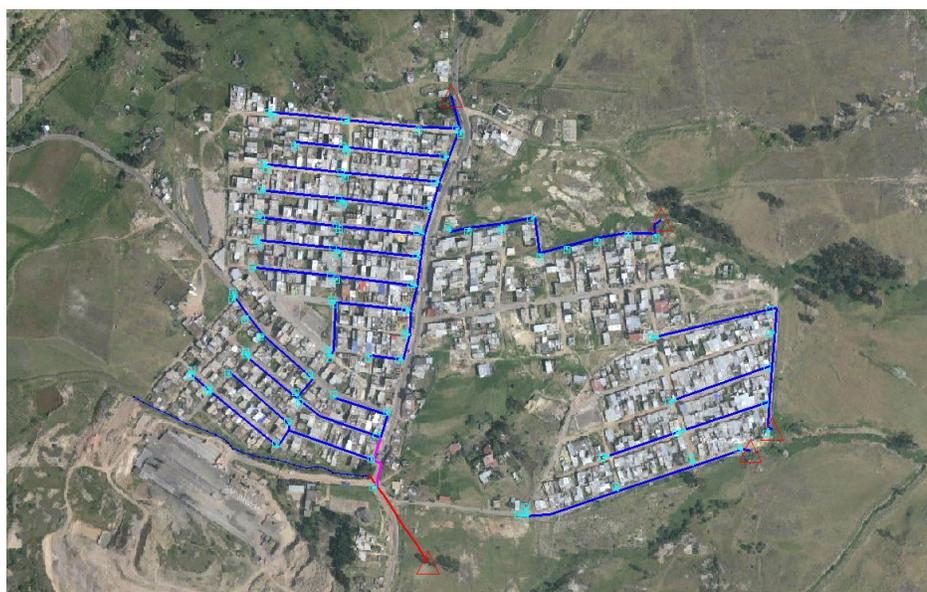
en estos tramos. Con respecto a los valores mínimos identificados, se puede deducir una baja capacidad de arrastre, lo cual implica una acumulación de sedimentos en el sistema.

Para la alternativa 1 (tabla 1 y figura 3) se proyecta el trazado de 3479,1 metros de tubería en material de PVC, en diámetros de 8 y 12 pulgadas, en conjunto con un canal en concreto en el lado suroeste del sector Lagunitas, siguiendo la vía hasta la carrera 18F, llegando a su punto de descarga en una quebrada del parque de Innovación Doña Juana. La longitud total del canal es de 311,7 metros, el cual será el encargado de transportar los aportes de aguas lluvias provenientes de este sector o de otros sectores que entreguen por efecto de escorrentía. El canal se propone debido a que la comunidad ha manifestado tener problemas de inundaciones en este punto en épocas de invierno.

Se obtiene que solo tres de los tramos de la red de alcantarillado proyectada para la alternativa 1 presentan

capacidades máximas, y apenas uno de los tramos de la red de alcantarillado proyectada presenta un valor de velocidad máximo; sin embargo, esto no afecta el correcto funcionamiento hidráulico del sistema, ya que no se superan los rangos establecidos en la normativa vigente. En algunos se registran alto y bajo arrastre, pero estos valores se presentan en tramos iniciales, donde el caudal es bajo; de igual manera, en el sector hay pendientes altas, que son propicias para generar altas velocidades y, por consiguiente, altos valores de capacidad de arrastre. Por último, todos los regímenes de flujo se encuentran en valores subcríticos y supercríticos, no se registran valores críticos, lo cual indica que no se presenta inestabilidad en la lámina de agua generada en las redes del sistema proyectado.

La alternativa 2 se diferencia de la alternativa 1 por tener estructuras complementarias tipo SUDS; para seleccionar las tipologías factibles se debe considerar que en el sector Mochuelo Bajo se cuenta con espacio



**Figura 3.**  
Alternativa 1.

disponible, como parques, andenes, vías con flujo vehicular bajo, corredores verdes y jardines domiciliarios, donde se pueden implementar tanques de almacenamiento, zonas de biorretención, alcorques inundables, cunetas verdes, zanjas de infiltración, cuencas secas de drenaje extendido y pavimentos porosos. No obstante, se descartan los pavimentos porosos debido a que no se contemplan el mejoramiento de la malla vial ni cuencas secas de drenaje extendido, porque requieren una mayor área que las otras tipologías.

De igual manera, se evalúan variables de diseño como pendiente del terreno, tasa de infiltración, distancia a nivel freático y distancia a cimientos. Se hizo un mapa de pendientes con base en la topografía de la zona. La pendiente promedio del terreno en estos tramos oscila entre 0,13 % y 51 %; específicamente, algunos subtramos presentan valores muy bajos, limitando así la implementación de tipologías con restricciones de pendiente mínima, como la cuenca seca de drenaje extendido, cuneta verde o zanja de infiltración.

La distancia promedio a nivel freático está en el rango entre 0,8 m y 2,0 m, de acuerdo con la información del Anexo B de la norma técnica NS-166. Se consultó el portal del Acueducto llamado Sigeo (<https://www.acueducto.com.co/wastestmod/sisgeo/>), con el objetivo de obtener resultados más precisos. Según los sondeos del sector de Mochuelo Bajo, no se encuentra registro de nivel freático en aquellos sondeos mayores de 3 m, con excepción de un registro de nivel freático a una profundidad de 1,8 m en la esquina de la calle 93B Sur con carrera 18B, por lo que no se dispondrán cuenca seca de drenaje extendido, pavimentos porosos y zonas de biorretención en ese sector.

La tasa de infiltración promedio está en el rango entre 0,0263 y 20,0 mm/h, de acuerdo con la información del Anexo B de la norma técnica NS-166; por otro lado, en el sector de Mochuelo Bajo la mayoría de las edificaciones son de carácter residencial, por lo que los cimientos se consideran de carácter superficial.

Se selecciona el tren de tratamiento priorizando aquellos tipos de SUDS que generan mayores beneficios sobre las áreas factibles para implementar las tipologías, y se da la siguiente jerarquía para la selección de las tipologías SUDS que se van a poner en práctica:

1. Zonas de biorretención.
2. Cunetas verdes.
3. Alcorques inundables.
4. Tanques de almacenamiento.

Así, se obtienen 19 alcorques inundables para implementar, distribuidos en 4 tipos, 3 cunetas verdes, 2 tanques de almacenamiento y 10 zonas de biorretención (figura 4).

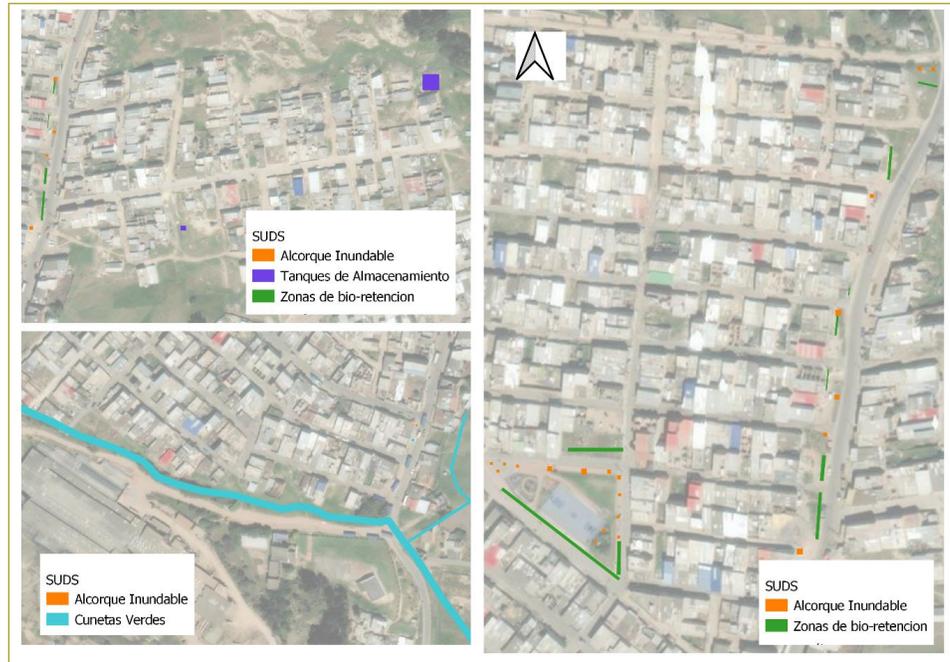
Se encuentra que al implementar los SUDS mejoran las condiciones de la red proyectada, y se obtiene que apenas uno de los tramos de la red de alcantarillado tiene capacidades máximas y solo tres de los tramos de la red de alcantarillado proyectada presenta un valor de velocidad máximo; sin embargo, esto no afecta el correcto funcionamiento hidráulico del sistema, ya que no se superan los rangos establecidos en la normativa vigente.

Se evalúan las alternativas planteadas, con base en un análisis de costo mínimo y costo beneficio, desde los ámbitos económico, ambiental, técnico, operativo

**Tabla 2**  
Selección del tren de tratamiento

Tipología	Alcorques inundables	Cunetas verdes	Tanques de almacenamiento	Zonas de biorretención
Mejoramiento de calidad del agua	2,1	1,6	0,0	2,3
Control de volúmenes	1,0	1,0	2,0	1,5
Amenidad y conflictos de uso	2,5	1,5	1,5	2,3
Mantenimiento	2,0	3,0	3,0	1,0
Costos	2,0	3,0	2,0	2,0
Promedios (máximo cinco puntos)	1,8	1,8	1,5	1,9

**Figura 4.**  
Localización de SUDS.



y de mantenimiento. Los criterios de evaluación, así como cada uno de los pesos porcentuales que estos tendrán sobre la decisión final para la escogencia de la mejor alternativa, son de 25 % para cada criterio. De este modo, se obtienen los resultados para la evaluación técnica, pero cabe destacar que ambas tienen un funcionamiento hidráulico correcto

Esta evaluación se hace contabilizando la cantidad de tubería con mejor comportamiento hidráulico, considerando los valores admisibles asignados; se observa que la alternativa que incluye SUDS como estructuras complementarias en el sistema de alcantarillado pluvial tiene un funcionamiento más óptimo.

Para la evaluación ambiental, se analizan los cambios que se producen en las condiciones hidrológicas

e hidráulicas de las cuencas de los cuerpos receptores de agua, y se obtiene que la alternativa 2 muestra un menor cambio en las crecientes frente a la condición natural. Se considera importante evaluar este aspecto, debido a las condiciones de asimilación de los cuerpos de agua receptores de las descargas y sus características físicas actuales.

La alternativa 1 no posee estructuras que mejoren la calidad de agua, mientras que la alternativa 2, con base en las eficiencias dadas en el Anexo técnico de la NS-166 del EAAB, mejora la calidad del agua de 2,49 m<sup>3</sup>/s de los 6,84 m<sup>3</sup>/s que transitan por el sistema.

Con el objetivo de identificar los impactos ambientales positivos y negativos para cada alternativa en su etapa de operación, y así definir cuál es ambientalmente más

**Tabla 3**  
Resultados de la evaluación técnica

Parámetro	Valor admisible	Longitud total dentro del rango		Alternativa (%)	
		A1	A2	1	2
Capacidad	0,9	4630,30	4702,30	0,969	0,984
Velocidad	5	3210,40	3534,70	0,672	0,740
Fuerza tractiva (mínimo)	2	4747,10	4729,90	0,993	0,990
Régimen de flujo	No crítico	4659,80	4653,50	0,975	0,974
TOTAL				0,90	0,92
ANÁLISIS HIDRÁULICO				98	100

viable para el Mochuelo Bajo, se procede a realizar la evaluación de los impactos ambientales. Esta evaluación se hace considerando lo establecido en la metodología propuesta por Conesa Fernández-Vítora (2011), con el fin de estimar un valor de importancia ambiental (metodología de evaluación ambiental), que integra las actividades y los posibles cambios que estas generan.

Como resultado de esto, se obtiene que la implementación de los SUDS genera beneficios notorios en el medio ambiente y la población que reside en el área de influencia mejorando, el manejo de los volúmenes de escorrentía, la calidad del recurso hídrico, la calidad de los ecosistemas, al igual que la calidad de vida de la población y su percepción hacia el sector.

**Tabla 4**  
Calificación ambiental y social

Evaluación	Alternativa 1	Alternativa 2
Cambio en las crecientes vs. la condición natural	96,78	100,00
Eficiencia en la remoción de contaminantes	0,00	46,37
Matriz de evaluación ambiental	7,72	100,00
Promedio	34,83	82,12

Para la evaluación económica se calculan las cantidades de obra y se toman como base los valores unitarios de los ítems del Sistema de Avalúo de Infraestructura (SAI) de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, ESP (EAAB), en su versión vigente, los cuales toman en cuenta el valor total de la actividad, mediante

un análisis de precios unitario. Al tener como opción más económica la alternativa 1, esta se puntuará con un valor de 100; la puntuación de la alternativa 2 es proporcional al aumento porcentual de costos de esta alternativa, obteniendo lo siguiente:

**Tabla 5**  
Calificación económica de Mochuelo Bajo

Alternativa	Total	Calificación
Alternativa 1	\$5.491.059.921,60	100
Alternativa 2	\$6.272.936.497,22	87,54

La evaluación de operación y mantenimiento valora en forma integral la complejidad operativa en torno a los mecanismos empleados para el manejo de cada alternativa y de los recursos físicos y humanos necesarios para el mantenimiento y la operación del sistema. La

opción más viable desde la perspectiva de operación y mantenimiento hacia el horizonte del proyecto corresponde a la alternativa 1, ya que no implica operación y mantenimiento adicionales a las redes convencionales de alcantarillado.

**Tabla 6**  
Evaluación operativa y mantenimiento

ALTERNATIVA	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2
OPERATIVA	\$1.254.334.447,46	\$1.651.034.252,98
MANTENIMIENTO REDES	\$16.016.189,47	\$16.016.189,47
MANTENIMIENTO SUDS		\$11.590.657,92
VALOR	\$1.270.350.636,93	\$1.667.050.442,46
PUNTAJE	100,00	76,20

Considerando lo desarrollado y los porcentajes asignados a cada criterio que se va a evaluar, se obtiene la siguiente matriz de calificación de las dos alternativas en el Mochuelo Bajo.

**Tabla 7**  
Calificación de alternativas en Mochuelo Bajo

Valor	Aspecto	Calificación		Ponderado	
		Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 1	Alternativa 2
25 %	Evaluación técnica	97,88	100,00	24,47	25,00
25 %	Evaluación ambiental	34,83	82,12	8,71	20,53
25 %	Evaluación económica	100,00	87,54	25,00	21,88
25 %	Evaluación operativa y mantenimiento	100,00	76,20	25,00	19,05
100 %	Calificación total			83,18	86,46

Esto da como resultado que, aunque en términos económicos es más costosa la implementación de SUDS en un proyecto, los beneficios que trae tanto técnicos como hidráulicos, ambientales y sociales son mayores, por lo que la alternativa más favorable es la 2.

## CONCLUSIONES

- Las alternativas propuestas están enfocadas en resolver el problema actual, relacionado con el manejo de los portes pluviales, identificado en el sector del Mochuelo Bajo.
- La climatología y los datos de precipitación se tomaron de la estación Quiba, administrada por la EAAB, la cual presenta una precipitación promedio total de 61,04 mm.
- Actualmente varios pozos tienen una profundidad mayor de 2,5 m, con materiales en concreto y mampostería.
- En el sector de Mochuelo Bajo actualmente hay únicamente 5 sumideros, para 242 tramos.
- La alternativa 1 consiste en un sistema de alcantarillado pluvial, compuesto por 165 tramos de alcantarillado nuevo en material PVC, 85 sumideros y 79 pozos de inspección. Incluye un canal en concreto de 320 m.
- Para la alternativa 2, como complemento al alcantarillado convencional y considerando las restricciones, se obtienen como tipologías por implementar los alcorques inundables, cunetas verdes, tanques de almacenamiento y zonas de biorretención.
- Se obtienen 22 alcorques inundables, distribuidos en 4 tipologías, 3 tipos de cunetas verdes, 2 tipos de tanques de almacenamiento y 10 tipos de zonas de biorretención.
- Con respecto al funcionamiento hidráulico de las dos alternativas planteadas, se identifica que en la alternativa 2 los SUDS, al ser estructuras complementarias, contribuyen a la mejora de las variables hidráulicas propias del funcionamiento del sistema convencional, mostrando mejorías en capacidad, velocidad, fuerza tractiva y régimen de flujo, en comparación con el sistema propuesto en la alternativa 1, el cual es netamente convencional.
- La implementación de las alternativas 1 y 2 registra un cambio en las crecientes de las corrientes donde se proyectan las descargas, cabe destacar que la alternativa 2 presenta menor variabilidad frente a una condición natural.
- La alternativa 1 no contempla mejorar la calidad del recurso hídrico, mientras que por la implementación de los SUDS, la alternativa 2 mejora la calidad de 2,49 m<sup>3</sup>/s, lo que equivale a un 46,37 % del caudal recolectado por la red de alcantarillado pluvial.
- La alternativa 2 presenta mayores beneficios respecto al manejo de escorrentía, calidad del recurso hídrico, un valor agregado en el urbanismo, confort de los habitantes y población beneficiada, y la renaturalización de los cuerpos de agua, busca además volver a condiciones naturales mediante tipologías basadas en la naturaleza.
- La alternativa 2 es un 12 % más costosa que la alternativa 1.

- La operación de la alternativa 2 implica mayores costos asociados al personal requerido para su mantenimiento y, a su vez, implica costos adicionales de mantenimiento específicos en relación con los SUDS, por lo que esta alternativa, en cuanto al criterio de operación y mantenimiento, tiene menores beneficios en comparación con la alternativa 1.
- Después de evaluar las consideraciones y aspectos, se obtiene como resultado que la alternativa 2 trae mayores beneficios en su implementación que la alternativa 1 en el sector de Mochuelo Bajo. Sin embargo, estos beneficios no llegan a ser considerables. Es importante mencionar que para el caso del sector de Mochuelo Bajo las alternativas propuestas están enfocadas en dar una solución a un problema existente, por lo que la implementación de los SUDS no resulta ser lo más eficiente, ya que se tienen limitaciones en el espacio y no está acompañado de un urbanismo que permita maximizar los resultados.

## REFERENCIAS

- Castiblanco, C. (28 de 10 de 2020). <https://bogota.gov.co/>. Obtenido de <https://bogota.gov.co/>: <https://bogota.gov.co/mi-ciudad/ambiente/restauracion-ecologica-del-sector-mochuelo-bajo-en-ciudad-bolivar>.
- Chow, V. T. (1984). *Handbook of Applied Hydrology*.
- Chow, V. T. (2004). *Hidráulica de Canales Abiertos*. McGraw - Hill.
- Conesa, V. (2011). *Guía metodológica para la evaluación del impacto ambiental*. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa.
- Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR) y Grupo de Investigación en Derechos Humanos de la Facultad de Jurisprudencia de la Universidad del Rosario (22 de 03 de 2022). [car.gov.co](http://oai.car.gov.co/). Obtenido de [car.gov.co](http://oai.car.gov.co/): <http://oai.car.gov.co/vercaso2.php?id=46>.
- EAAB (2018). *NS-166. Criterios para diseño y construcción de sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS)*. Bogotá.
- EAAB (2020). *NS-085. Criterios de diseño de sistemas de alcantarillado*. Elaboración propia.
- ingenierocivilinfo. (2010). Obtenido de ingenierocivilinfo: <http://www.ingenierocivilinfo.com/2010/07/empate-por-linea-de-energia-para-flujo.html>.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2021). *Listado de impactos ambientales específicos*.
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (2016). *Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS. Título D*.
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (2017). *Resolución 0330 de 08 de junio de 2017*.
- Monsalve Sáenz, G. (1995). *Hidrología en la ingeniería*.
- Ponce, V. M. (1989). *Hidrología general*.
- Remeneiras, G. (1974). *Tratado de hidrología aplicada*.
- Secretaría de Planeación de Bogotá (2020). *Plan de Ordenamiento Territorial. Informe de diagnóstico*.
- Universidad de los Andes, Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental (2016). *Investigación de las tipologías y/o tecnologías de sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS) que más se adapten a las condiciones de la ciudad de Bogotá, D.C. Bogotá, D.C.*



# Análisis de prefactibilidad para un proyecto de microgeneración hidroeléctrica a partir de estructuras existentes para el control de socavación en un río de montaña. Caso del río Cáqueza

Pre-feasibility analysis for a hydroelectric microgeneration project from existing structures to control scour in a mountain river. Cáqueza river case

NELSON HERNÁN LEYTON<sup>1</sup> - GERMÁN SANTOS GRANADOS<sup>2</sup>

1. Maestría en Ingeniería Civil de la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
2. Director de posgrados de la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

nelson.leyton@mail.escuelaing.edu.co - german.santos@escuelaing.edu.co

Recibido: 14/04/2022 Aceptado: 17/05/2022

Disponible en [http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones\\_revista](http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista)  
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

## Resumen

En este artículo se presenta un análisis de prefactibilidad para un proyecto de generación hidroeléctrica a partir de estructuras para control de socavación existentes en un río de montaña. Se analiza el caso de un tramo del río Cáqueza, ubicado entre los kilómetros 18 y 25 de la vía Bogotá-Villavicencio, en el cual se han construido 34 diques transversales tipo azud para el control de la socavación general. Como parte del estudio de prefactibilidad se recopiló y analizó información secundaria, se revisó el estado del arte en los ámbitos nacional e internacional, y se verificaron la normativa existente y las políticas públicas. Además, se determinó el caudal de diseño, se estudiaron alternativas topográficas e hidráulicas para la conducción y se definió un diseño conceptual. El análisis de los escenarios de consumo indica que con la potencia efectiva desarrollada por la PCH (449 kW) se podría realizar la recarga de hasta 16 vehículos eléctricos en una hora o se podría dar suministro de energía eléctrica a un poco más de 1000 hogares de los municipios de Cáqueza y Chipaque.

**Palabras claves:** microgeneración, PCH, río, socavación.

## Abstract

This document presents a pre-feasibility analysis for a hydroelectric generation project from existing scour control structures in a mountain river. The case of a section of the Cáqueza river, located between kilometers 18 and 25 of the Bogotá-Villavicencio highway, is analyzed, in which thirty-four transversal dams have been built to control general scour. As part of the pre-feasibility study, the collection and analysis of secondary information was conducted, as well as a review of the state of the art at a national and international level and a verification of regulations and public policies. The design flow was determined, topographic and hydraulic alternatives for conduction were studied, and a conceptual design was defined. The analysis of the consumption scenarios indicates that with the effective power developed by the SHP (449 kW) up to sixteen electric vehicles could be recharged in one hour or electricity could be supplied to a little more than 1,000 homes in the municipalities of Cáqueza and Chipaque.

**Keywords:** microgeneration, SHP, river, scour.

## INTRODUCCIÓN

Colombia dispone de abundantes recursos minero-energéticos, tales como gas, carbón, petróleo, ríos y zonas con potencial de desarrollo de proyectos eólicos y solares, los cuales le han permitido ser autosuficiente en las décadas recientes; sin embargo, según varios autores, la disponibilidad para satisfacer la creciente demanda a corto y mediano plazo es limitada, además de susceptible de ser insuficiente ante la incertidumbre sobre el éxito de proyectos como Hidroituango.

Frente a la necesidad de diversificar la matriz de generación de energía eléctrica en procura de satisfacer la demanda creciente en el país, y con el fin de brindar alternativas de recarga para vehículos eléctricos que circulen por el corredor Bogotá-Villavicencio, o disponer de un sistema de respaldo para las comunidades rurales o urbanas de los municipios de Cáqueza y Chipaque, se plantea la idea de materializar un proyecto de microgeneración hidroeléctrica en el río Cáqueza.

Las pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH) son una herramienta importante para suplir las necesidades energéticas de comunidades aisladas. Están reguladas, aprobadas e impulsadas por la normativa nacional, las políticas gubernamentales y los planes de expansión de las entidades reguladoras del sector energético.

## CASO DE ESTUDIO

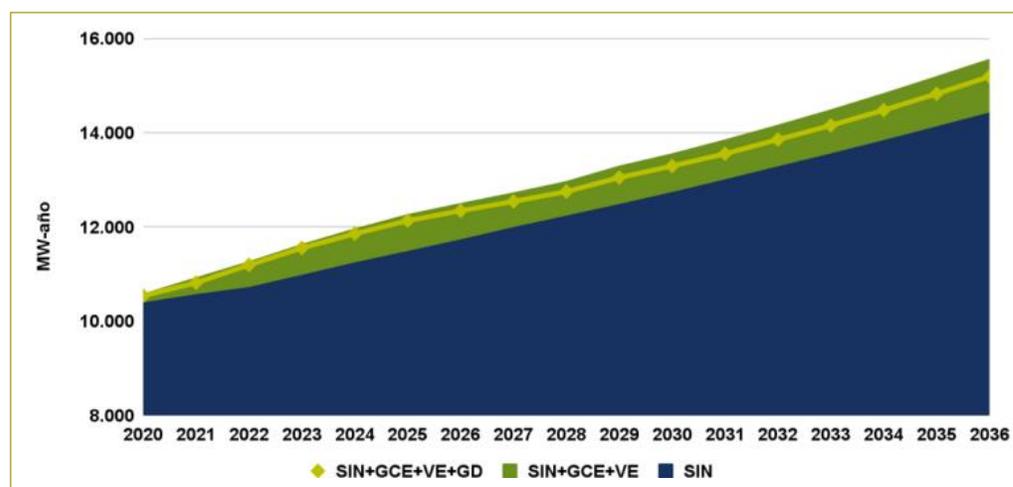
La demanda de la energía eléctrica en Colombia es creciente (figura 1), en tanto que la disponibilidad es limitada. Se prevé que, para el año 2025, el país podría tener déficit de energía eléctrica; la dificultad se explica

en factores como la incertidumbre sobre la entrada en operación de Hidroituango, la proyección de una demanda cada vez más alta y el retraso en la ejecución de proyectos eólicos y solares de respaldo (López, *Portafolio*, 2022).

Alejandro Castañeda, director ejecutivo de la Asociación Nacional de Empresas Generadoras (Andeg), manifestó en una entrevista para la revista *Semana* que se espera que en el 2025 Colombia tenga un déficit de energía del 1 %, mientras que para 2026-2027 se podría tener un déficit del 4 %, el cual aumentaría para los años siguientes (*Semana*, 2022).

En Colombia, el sector de la energía está regulado por el Ministerio de Minas y Energía, y a su vez, por una subdivisión de este, denominada la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). En la figura siguiente se observa la proyección anual de la demanda de energía eléctrica, desde el año 2020 hasta el año 2036. La franja azul corresponde a la demanda del Sistema Interconectado Nacional (SIN); la franja verde indica la demanda del SIN, sumado a grandes consumidores especiales y a la demanda generada por los vehículos eléctricos. La línea punteada en color verde indica que, si a esas demandas se les resta la generación distribuida, que es la aportada, entre otras por las PCH existentes, el crecimiento de la demanda se reduce hasta en un 0,25 % (figura 1).

La entrada de vehículos eléctricos a Colombia se ha visto limitada, entre otros aspectos, por la poca disponibilidad de estaciones de recarga para los vehículos (Baraya, *Portafolio*, 2018). Las pocas que existen solo están disponibles en las principales capitales, como Bogotá y Medellín.



**Figura 1.** Proyección anual de demanda energía eléctrica (MW-año) – Esc. Medio.

Fuente: UPME, Proyección demanda energía eléctrica gas natural y combustibles líquidos 2022-2036, p. 56, 2022.



**Figura 2.** Izquierda: Procesos de socavación y erosión en el río Cáqueza. Derecha: Diques en concreto ciclópeo tipo azud de cuatro metros de altura a nivel de vertedero, con los cuales se ha logrado el control local de dichos procesos (Hidroconsulta, 2018).

De acuerdo con el portal Electromaps: (<https://www.electromaps.com/puntos-de-recarga/colombia>), a la fecha del 24-08-2022, en Colombia se cuenta con 497 conectores, distribuidos en 214 estaciones. En la vía que une las ciudades Bogotá y Villavicencio no existe ninguna estación de recarga, ni tampoco en Villavicencio.

En la vía Bogotá-Villavicencio, entre los kilómetros 18 y 25, el río Cáqueza discurre paralelo a la vía. Se trata de un río de montaña con pendientes que alcanzan hasta un 30 %. Por los problemas de socavación que se generan en el río y que afectan el talud inferior de la vía, se han construido alrededor de 34 diques en concreto ciclópeo para retención de sedimentos (figura 2) (Hidroconsulta, 2007 y 2012).

La existencia de los diques (llamados azudes) y la diferencia topográfica entre estos y los altos caudales disponibles permiten plantear la posibilidad de diseñar un sistema de microgeneración hidroeléctrica.

El problema descrito es relevante para ser abordado como trabajo de profundización para la maestría en Ingeniería Civil con Énfasis en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente, por cuanto es posible proponer una solución local de generación hidroeléctrica utilizando como punto de captación a alguna de las obras hidráulicas existentes en el río Cáqueza, entre los kilómetros 18 y 25 de la vía Bogotá-Villavicencio, la cual puede ser aprovechada para construir una estación de recarga para vehículos eléctricos o, incluso, un sistema de respaldo de suministro eléctrico para el municipio de Cáqueza.

Con este estudio se propone hacer un análisis de prefactibilidad técnica y económica para un proyecto de microgeneración hidráulica en el río Cáqueza, municipio de Cáqueza (Cundinamarca).

### Localización

El sitio de estudio se localiza en el sector comprendido entre el K18 y el K25 de la vía Bogotá-Villavicencio, en el cual el río Cáqueza discurre paralelo a la vía en régimen torrencial (figura 3).

### METODOLOGÍA

Para el desarrollo del trabajo de grado se recopiló la información secundaria relacionada con la microgeneración hidráulica, tanto en Colombia como en otros países latinoamericanos de similar nivel de desarrollo. Por otra parte, se investigó sobre el estado del suministro energético en el país y, en particular, sobre la disponibilidad de estaciones de recarga para vehículos eléctricos.

### Estudios disponibles

En Colombia se han elaborado algunos artículos relacionados con la microgeneración hidroeléctrica, por parte de grupos de investigación de la Universidad Libre (Torres, 2012) y la Universidad Nacional (Sierra, Sierra y Guerrero, 2011). En ellos se describen la uti-



**Figura 3.** Localización general de la zona de estudio. Tomado de Google Earth 2016.

lización de la microgeneración en el país, el potencial desarrollo, la legislación existente y clases de turbinas más utilizadas.

A su vez, la UPME y la Universidad Javeriana elaboraron en 2015 el *Atlas de potencial hidroenergético*, documento de referencia que presenta la distribución espacial del potencial hidroenergético de Colombia, el cual se calcula para generación hidroeléctrica a filo de agua; este, a su vez, se determinó a partir de la estimación de caudales medios y de modelos de elevación digital de terreno.

A continuación se muestra el potencial hidroenergético total estimado para cada una de las regiones de la geografía nacional. Como resultado, se observa el gran potencial para picocentrales, microcentrales, minicen-

trales y pequeñas centrales hidroeléctricas, las cuales están contempladas como parte del plan de desarrollo energético nacional.

En cuanto a tesis de grado, se encontraron las siguientes:

- Una elaborada por una estudiante de pregrado de la Universidad Católica de Colombia (Trujillo, 2017), en la cual se realizó el diseño de una picocentral hidroeléctrica en la localidad de Usme (Bogotá).
- *Guía para estudios de prefactibilidad de pequeñas centrales hidroeléctricas como parte de sistemas híbridos*, elaborada por estudiantes de la Universidad Javeriana (Mora y Hurtado, 2004).

**Tabla 1**  
Potencial hidroenergético acumulado por tipo de central y por sitio identificado para aprovechamiento (kW)

Área hidrográfica	Tipo de Central					
	Pico	Micro	Mini	Pequeñas	Grandes	
					20 - 40 MW	> 40 MW
Amazonas	285	2.799	26.948	903.311	1.518.300	9.522.541
Caribe	210	1.935	16.843	436.476	749.309	2.922.066
Magdalena Cauca	514	5.229	47.567	1.646.204	2.808.652	17.713.622
Orinoco	360	3.599	35.789	1.230.958	2.205.013	10.227.236
Pacífico	165	1.647	15.984	568.657	831.949	2.743.598
Total por tipo de central	1.533	15.209	143.132	4.785.606	8.113.222	43.129.063

Fuente. *Atlas de potencial hidroenergético*. UPME y Universidad Javeriana, 2015.

- *Diseño de una minicentral de energía hidroeléctrica en la planta de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de Cuenca*, elaborada por estudiantes de la Universidad Politécnica Salesiana de Ecuador.
- *Diseño de una PCH para la generación de energía eléctrica aprovechando el sistema de abastecimiento de agua a Riobacha, distrito turístico y cultural*, elaborada por un estudiante de la Universidad Antonio Nariño.
- Por último, algunos grupos de investigación de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas elaboraron un documento enfocado en la determinación del potencial energético del país (Universidad Distrital, 2020).

### Normativa actual

En el marco legislativo general para la generación hidroeléctrica en el país se encuentran las siguientes normas.

- *Ley 143 del 11 de julio de 1994*. Establece que el Ministerio de Minas y Energía definirá los criterios para el aprovechamiento económico de las fuentes convencionales y no convencionales de energía, dentro de un manejo integral, eficiente, y sostenible de los recursos energéticos del país, y promoverá el desarrollo de tales fuentes y el uso eficiente y racional de la energía por parte de los usuarios.
- *Decreto 1258 del 17 de junio de 2013*. Por el cual se modifica la estructura de la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME).
- *Ley 1715 del 13 de mayo de 2014*. Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional.
- *Decreto 0570 del 23 de marzo de 2018*. Por el cual se adiciona el decreto único reglamentario del sector administrativo de minas y energía 1073 de 2015, en lo relacionado con los lineamientos de política pública para la contratación a largo plazo de proyectos de generación de energía eléctrica y se dictan otras disposiciones.

### Documentos técnicos elaborados por la UPME

Todas estas normas han sido elaboradas por el Ministerio de Minas y Energía. Esta entidad, a su vez,

dispone de la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), que es una unidad administrativa especial del orden nacional, de carácter técnico, regida por la Ley 143 de 1994 y por el Decreto 1258 del 17 de junio de 2013.

Dicha entidad ha elaborado varios documentos técnicos para la planificación del sector energético en Colombia, pero los que están vigentes son los siguientes.

- *UPME, 2015*. Plan de expansión de referencia generación-transmisión 2015-2029. Este plan está enfocado en satisfacer la demanda de energía eléctrica a largo plazo, por lo cual, con fundamento en la infraestructura eléctrica actual, los proyectos en construcción y las proyecciones nacionales y regionales de demanda de energía y potencia definen unos lineamientos y metas para la expansión de los recursos de generación y redes de transmisión. En este plan se contempla la implementación de PCH para desarrollar el potencial hidroeléctrico del país.
- *UPME, 2015*. Plan energético nacional 2050. En él se señalan pautas y líneas de acción recomendables, enfocadas en un ideario energético para el año 2050. Tiene como objetivo servir de base para la elaboración e implementación de políticas energéticas. Indica, además, que en Colombia se producían para el año 2015 463 MW, por medio de PCH, del total de 761 MW instalados como parte de las fuentes no convencionales de energía (FNCE).
- *UPME, 2018* (en discusión). Plan Nacional de Electrificación Rural (PNER) 2018-2031. Como parte del proceso de paz se propuso en la mesa de negociación una reforma rural integral, y se desarrolló un plan de infraestructura eléctrica enfocado en las áreas de posconflicto y las zonas no interconectadas.
- De acuerdo con los datos presentados, para el año 2015 existían 430.000 viviendas sin interconexión a las redes nacionales, lo cual equivale al 3 % del total de viviendas del país, aproximadamente.

### Estado del arte a nivel nacional e internacional

Las PCH se empezaron a utilizar a principios del siglo XX; desde el inicio, se han caracterizado por su bajo costo de operación y mantenimiento, tecnología simple, y el ser de fácil construcción e instalación (Ortiz, 2001). Así mismo, son favorables por su reducido impacto am-

biental y su utilidad para brindar suministro energético a zonas no interconectadas.

A escala internacional, China se destaca como el país de mayor producción por medio de PCH, con un 11 % (13,25 GW) del total nacional, seguido de lejos por Estados Unidos con un 4 % (3,4 GW).

En Suramérica, se destaca Brasil con un 0,2 % (0,48 GW); en Centroamérica sobresale Costa Rica con 4,2 % (21,3 MW). Entre las proyecciones encontradas, Brasil tiene un crecimiento planeado en pequeñas centrales de 40 MW, Costa Rica 24 MW y Perú 10 MW (Sierra et al., 2011).

Según Torres (2012), en Europa están utilizando este sistema con buenos resultados. En Euskadi (País Vasco), debido a que los ríos son de curso corto y no conducen caudales importantes, existen bastantes minicentrales hidráulicas. “En el resto de España hay problemas de escasez de agua y se han construido presas para riego; posteriormente, han sido aprovechadas para generar energía, y actualmente disponen una fracción importante de energía hidroeléctrica instalada”.

En Colombia, el 64 % de la energía eléctrica (13,4 GW) proviene de centrales hidroeléctricas, de los cuales para el año 2005, el 7 % correspondía a producción por pequeña generación de PCH (UPME, citado por Sierra et al., 2009).

Torres (2012) describe así el inicio de la utilización de PCH en Colombia: “En nuestro país, las primeras pequeñas centrales hidroeléctricas datan de 1889, con plantas en Bogotá, Bucaramanga y Cúcuta y algunas implementaciones para abastecimiento de energía en fincas. Para 1930 se tenían plantas a filo de agua que suministraban 45 MW, desarrollo que continuó hasta 1960. Solo hasta después de la crisis energética de la década de los setenta, se retomaron los estudios e investigaciones, y las implementaciones de hidroeléctricas a pequeña escala”. El mismo autor relaciona en su artículo el número de PCH instaladas en cada departamento para el año 2011 (tabla 2).

Para los mismos proyectos relacionados anteriormente, se determinó que las turbinas más utilizadas en las PCH en Colombia son las Francis y las Pelton (tabla 3).

**Tabla 2**

Capacidad instalada de PCH en Colombia en 2011

Departamento	PCH	Capacidad Instalada KW
Antioquia	38	17.191
Boyacá	8	5.005
Caldas	23	17.192
Caquetá	1	45
Cauca	12	11.140
Chocó	1	2.000
Cundinamarca	13	14.765
Huila	9	9.865
Meta	3	628
Nariño	98	9.836
Putumayo	3	714
Quindío	7	11.915
Risaralda	3	6.570
Santander	24	30.852
Tolima	8	11.211
Valle	17	16.810
<b>Total</b>	<b>193</b>	<b>168.517</b>

Fuente: Instituto de Ciencias Nucleares y Energías Alternativas, citado por Sierra et al. 2011

**Tabla 3**

Tipo de turbinas instaladas en las PCH en Colombia en 2011

Tipo de turbina	PCH	Potencia Instalada KW
Francis	61	69.008
Pelton	54	58.435
Combinados (P y F)	9	13.506
Michell Banki	7	245
Otros	3	1.383
Sin información	59	25.940
<b>Total</b>	<b>193</b>	<b>16.8517</b>

Fuente: Instituto de Ciencias Nucleares y Energías Alternativas, citado por Sierra et al. 2011.

### Artículos de prensa

Además de registrar las dificultades de la oferta de energía eléctrica ante la creciente demanda y la fragilidad de algunos proyectos, caso Hidroituango (Clavijo, *La República*, 2018) y, de describir la dificultad del uso de vehículos eléctricos al país, por la falta de infraestructura y de estaciones de recarga (Baraya, *Portafolio*, 2018), la prensa escrita ha hecho énfasis en los últimos años en la importancia de las PCH (*Las2Orillas*, 2018) y en el aumento de la venta de vehículos eléctricos desde 2019, a pesar de las dificultades descritas anteriormente.

En particular, el 17 de noviembre de 2019, en el portal web elcarrocolombiano.com se publicó una nota en la cual se indicaba que mediante el Decreto 2051 del 13 de noviembre de 2019 se definía en cero el arancel para todos los vehículos eléctricos comercializados en el país. Esto se hizo con el fin de “reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> y material particulado, según lo establecido en los Acuerdos de París, que proyectan reducir en un 20 % las emisiones de gases contaminantes”.

El diario *Portafolio* publicó el 4 de julio de 2019 un artículo según el cual “con 390 vehículos eléctricos vendidos, Colombia se consolidó en el 2018 como el principal mercado de estos autos [eléctricos] en la región, superando a México (201), Chile (129) y Ecuador (130), segundo y tercero, respectivamente [sic]”.

De acuerdo con la revista *Motor*, en publicación del 6 de septiembre de 2022, con cierre al primer semestre de dicho año rodaban por Colombia 8100 vehículos eléctricos, más 1000 buses eléctricos. Adicionalmente, indica que la tendencia en números es creciente, en razón de los beneficios tributarios, de menos restricciones de movilidad por pico y placa y por la conciencia cada vez mayor de los usuarios de la necesidad de reducir la producción de gases de efecto invernadero.

En artículo publicado el 30 de junio de 2021, el diario *Portafolio* indica que el país alista la entrada en operación de 70 PCH: “Una tabla de salvación para el Gobierno Nacional con el fin de garantizar la confiabilidad en el suministro de energía eléctrica a nivel local y regional, son las 70 pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH) que tiene programadas para su montaje. Esta fórmula se convirtió en otra de las estrategias con las que la nación buscaría fortalecer su política de transición energética,

pero con fuentes renovables convencionales en la matriz de generación del sistema interconectado, y de paso darle una mano a la reactivación económica. Según el Registro de Proyectos Vigentes (RPV) de la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), hay 70 proyectos vigentes para desarrollar PCH, de los cuales 39 se encuentran en el rango menor de 10 megavatios (MW) de capacidad instalada, y 15 iniciativas en el rango de 10 MW a 20 MW”.

Lo anterior confirma que es una necesidad plantear alternativas que ayuden a mejorar la infraestructura eléctrica del país, también a pequeña escala, y que esta a su vez permita mejorar las condiciones de operación de los vehículos eléctricos. También se ha comprobado que el desarrollo y puesta en marcha de PCH está amparado y motivado por la reglamentación nacional y las políticas gubernamentales energéticas de las últimas décadas.

## EL RÍO CÁQUEZA

El río Cáqueza discurre paralelo a la vía Bogotá-Villavicencio entre el kilómetro 18 del abscisado de la vía, donde cambia de nombre de río Une a río Cáqueza, y el kilómetro 34, donde desemboca en el río Negro. La cercanía del río con el corredor vial, así como la geología y la geomorfología de la zona, hacen que la interacción entre uno y otro sea problemática, especialmente para la operación y estabilidad del corredor vial.

### Naturaleza de la corriente

Según Rodríguez, Leyton y Duarte (2017), el río es un cauce aluvial de naturaleza torrencial e intenso acarreo sólido de materiales en todos los tamaños de cantos,



**Figura 4.** Forma del lecho y su composición en diferentes tramos del sector en estudio (Hidroconsulta SAS, 2012).

gravas, arenas, limos y arcillas. Ríos como el Cáqueza presentan alta variabilidad en sus caudales, curvas de duración de alta pendiente y cauces sujetos a avenidas súbitas; así mismo, tienen la particularidad de fluir a baja profundidad, en este caso, entre 1,5 m y 4,5 m.

El valle del río es estrecho, razón por la cual el cauce tiene pocas posibilidades de divagar o cambiar de curso; al haber poco espacio entre el lecho y las laderas que definen su valle, existen pocas posibilidades para la formación de una llanura aluvial. Como el río se encuentra en un estado inicial o de juventud, predominan la erosión y el transporte de material sobre la sedimentación.

La presencia de una falla geológica y la morfología del valle explican por qué el curso del río Cáqueza ha sido relativamente constante, a pesar de que se desarrolla sobre material coluvial; los meandros se han conservado y únicamente se aprecian cambios locales de curso asociados con la acumulación de deslizamientos y flujos sobre el lecho del cauce. El cauce cuenta con un mínimo de control geológico local, proporcionado por los afloramientos de las formaciones rocosas de la zona.

Por lo anterior, en este sector el río Cáqueza tiene la facilidad para labrar su propio cauce sobre el coluvión, con gran capacidad de transporte de material, dada su alta energía por su naturaleza torrencial. Comoquiera que el lecho del río adquiere un relativo acorazamiento con granulares gruesos, grandes cantos y bloques rocosos del coluvión, los taludes que lo conforman tienen una alta amenaza de erosión por los caudales de creciente del río, que, aunque no son de gran magnitud, sí lo son de alta energía.

### Régimen de caudales

De acuerdo con Hidroconsulta (2022), los caudales máximos con periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 200 años son los que se muestran a continuación (tabla 4).

**Tabla 4**  
Caudales en el río Cáqueza para diferentes periodos de recurrencia

TR	2	5	10	25	50	100	200
Q (m <sup>3</sup> /s)	42.4	54.4	62.3	72.3	79.7	87.0	94.4

Fuente: Hidroconsulta SAS, 2022.

### Caudales extremos

Para la determinación de los caudales (máximos, medios y mínimos) se analizó la serie de caudales mensuales de la estación limnimétrica Caraza, la cual está ubicada sobre el río Cáqueza, a dos kilómetros aguas arriba del sitio de captación del proyecto propuesto.

### Caudal ambiental

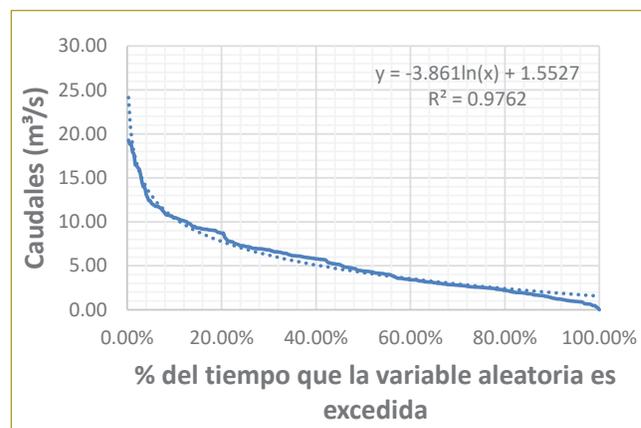
El caudal ambiental se debe tomar en cuenta al hacer una captación de agua para el proyecto que no ponga en riesgo la estabilidad del medio biótico del cauce.

Existen diversas metodologías para estimar el caudal ambiental. Para este estudio de prefactibilidad, el caudal ambiental se determinó siguiendo las directrices de la Resolución 865 del 2004 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. En esta norma se presentan dos metodologías, las cuales se explican a continuación.

### Mínimo histórico

El caudal ecológico o ambiental es el caudal promedio multianual que permanece el 97,5 % del tiempo y cuyo periodo de recurrencia es de 2,33 años.

Para determinar el caudal ambiental por este método se realizó la curva de duración de caudales mensuales para el río Cáqueza y se determinó el Q97,5. Seguidamente, se presentan la curva y el resultado para el caudal ambiental (figura 5 y tabla 5).



**Figura 5.** Curva de duración de caudales mensuales del río Cáqueza.

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 5**  
Caudal ambiental, método mínimo histórico

Río	Q97,5 (m <sup>3</sup> /s)
Cáqueza	0,67

Fuente: Elaboración propia.

### Porcentaje de descuento

De acuerdo con esta metodología, el caudal mínimo ecológico o ambiental tiene un valor aproximado al 25 % del caudal medio mensual multianual más bajo de la corriente de estudio. A continuación, se presentan los resultados (tabla 6).

**Tabla 6**  
Caudal ambiental, método del porcentaje de descuento

Río	Caudal medio mensual más bajo (m <sup>3</sup> /s)	Caudal ambiental (m <sup>3</sup> /s)
Cáqueza	0,21	0,053

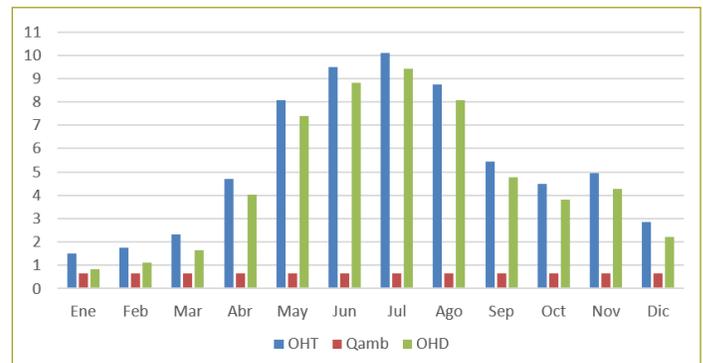
Fuente: Elaboración propia.

### Oferta hídrica disponible

A continuación, se analiza la oferta hídrica mensual, que se determinó a partir de los caudales medios mensuales del río Cáqueza, los cuales corresponden a la oferta hídrica total (OHT).

La oferta hídrica disponible (OHD) es la oferta hídrica total (OHT) menos el caudal ambiental (Qmamb). Para su determinación se utilizó como caudal ambiental el máximo valor encontrado por las metodologías descritas anteriormente.

A renglón seguido se presenta la oferta hídrica disponible para el río Cáqueza en el punto de estudio (tabla 7 y figura 6).



**Figura 6.** Oferta hídrica disponible del río Cáqueza.

Fuente: Elaboración propia.

### Caudal de diseño

De acuerdo con los análisis anteriores la OHT se presenta en el mes de enero, con un caudal medio de 0,84 m<sup>3</sup>/s, un máximo en el mes de julio con un valor de 9,43 m<sup>3</sup>/s y un promedio anual de 4,7 m<sup>3</sup>/s.

Según lo indicado en el libro *Pequeñas centrales hidroeléctricas* (Ortiz, 2011), una de las opciones para definir el caudal de diseño es tomar el caudal correspondiente al 90 % de la curva de duración de caudales, el cual en este caso corresponde a 1,35 m<sup>3</sup>/s, evaluando también el caudal del 50 % con un posible almacenamiento. Otra opción podría ser adoptar el promedio de la OHT, que sería de 4,7 m<sup>3</sup>/s para este estudio, y de manera conservadora se adoptará un valor de 1,35 m<sup>3</sup>/s.

Se estudia otros aspectos, como la topografía, la geología y la geomorfología, los cuales se encuentran consignados en el documento principal del trabajo de grado.

**Tabla 7**  
Oferta hídrica mensual del río Cáqueza

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
OHT	1,51	1,77	2,32	4,69	8,06	9,49	10,10	8,75	5,45	4,48	4,94	2,87
Qamb	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67
OHD	0,84	1,10	1,65	4,02	7,39	8,82	9,43	8,08	4,78	3,81	4,27	2,2

Fuente: Elaboración propia.

## PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO

La potencia hidroeléctrica ( $P$ ) o potencia hidráulica depende del caudal y de la altura desde la cual cae el fluido. Se calcula como:

$$P = \rho * g * h * Q * e$$

Donde  $\rho$  es la densidad y depende del fluido utilizado,  $g$  es la aceleración debido a la fuerza de gravedad ( $9,81 \text{ m/s}^2$ ),  $h$  la altura desde la que se toma el agua y la boca de la turbina,  $Q$  es el caudal o la relación de flujo volumétrico del fluido por unidad de tiempo y  $e$  es la eficiencia de la turbina.

## ALTERNATIVAS Y ESCENARIOS

A partir de la información disponible, se han evaluado diferentes alternativas topográficas e hidráulicas con el fin de encontrar la mejor solución al problema planteado.

**Tabla 8**  
Datos alternativa 1

Alternativa 1	
Cota de inicio conducción (msnm)	1729,11
Cota final (msnm)	1690
Distancia (m)	973
Pendiente media (%)	4,02
Cota casa de máquinas (msnm)	1637,45
Ht	52,55
Adecuaciones (5 m)	5
Ht efectiva	47,55
Caudal turbinable ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	1,35
Peso unitario agua ( $\text{kN}/\text{m}^3$ )	9,81
Eficiencia turbina (%)	75
Eficiencia generador (%)	95
Potencia hidráulica efectiva (kW)	449

Fuente: Elaboración propia.

## Alternativas topográficas

Con fundamento en la topografía del tramo de estudio se ubicaron cuatro alternativas de ubicación de captación, trazado de conducción y ubicación de tanque de carga y cuarto de máquinas.

En todos los casos se descontaron 5 m a la altura total disponible, con el propósito de tener en cuenta las adecuaciones del terreno para las construcciones. Por otra parte, en todos los casos se ubicaron los cuartos de máquinas en zonas planas y lo suficientemente amplias.

### Alternativa topográfica 1

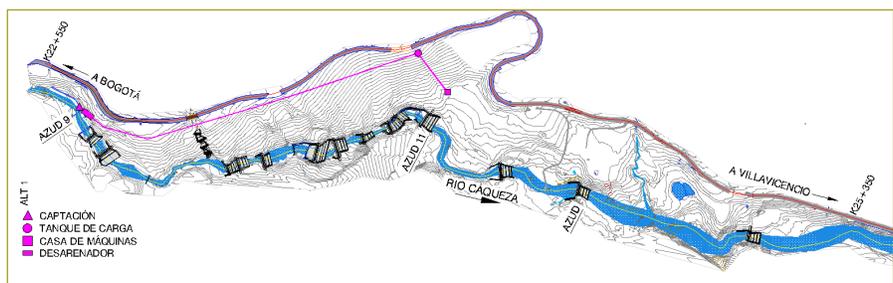
Esta alternativa realiza la captación en el dique azul 9, alrededor de la cota 1729,1 msnm; la conducción tiene una longitud de 973 m y termina en una cota de 1690 msnm; en ese mismo punto se ubica el tanque de carga. La casa de máquinas se ubicaría en la cota 1637,45 msnm, con lo cual se obtiene una cabeza total efectiva de 47,55 m. Con este valor, las eficiencias típicas de turbinas y generador y un caudal de  $1,35 \text{ m}^3/\text{s}$ , se obtendría una potencia efectiva de 449 kW.

### Alternativa topográfica 2

La alternativa 2 hace la captación en el mismo dique azul 9, alrededor de la cota 1729,1 msnm; la conducción tiene una longitud de 1296 m y termina en una cota de 1644,6 msnm; en ese mismo punto se localiza el tanque de carga. La casa de máquinas se ubicaría en la cota 1625,5 msnm, con lo cual se obtiene una cabeza total efectiva de 14,1 m. Con este valor y las eficiencias típicas de turbinas y generador, y un caudal de  $1,35 \text{ m}^3/\text{s}$ , se obtendría una potencia efectiva de 133 kW.

**Figura 7.** Alternativa 1.

Fuente: Elaboración propia.



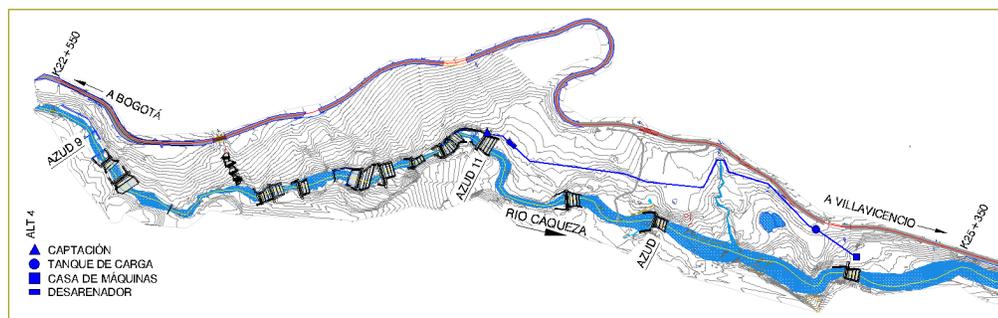


### Alternativa topográfica 4

La alternativa 4 hace captación en el dique azud 12A, alrededor de la cota 1627,4 msnm; la conducción tiene una longitud de 935 m y termina en una cota de 1607,2 msnm; en ese mismo punto se localiza el tanque de carga. La casa de máquinas se ubicaría en la cota 1573,5 msnm, con lo cual se obtiene una cabeza total efectiva de 28,7 m. Con este valor y las eficiencias típicas de turbinas y generador, y un caudal de 1,35 m<sup>3</sup>/s, se obtendría una potencia efectiva de 271 kW.

**Figura 10.** Alternativa 4.

Fuente: Elaboración propia.



Teniendo en cuenta que en todas las alternativas se adoptaron los mismos criterios técnicos para su trazado, es decir, todas son técnicamente viables en cuanto a cotas, disponibilidad y estabilidad del terreno, se escoge la alternativa 1 por ser la que mayor potencia eléctrica genera.

Se analizaron alternativas de sección hidráulica para la conducción, de lo cual se obtuvo como resultado que es más favorable una sección rectangular de 0,7 m x 0,7 m respecto a una sección circular, en razón de aspectos económicos y constructivos, principalmente.

### Escenarios de consumo

Con las tecnologías actuales disponibles en el país, las baterías de los vehículos eléctricos tienen una capacidad de 24 kW/h, pero podrían llegar a ser a corto plazo de 70 kW/h. Con estas capacidades de carga se podrían

**Tabla 11**  
Datos alternativa 4

Alternativa 4	
Cota de inicio conducción (msnm)	1627,4
Cota final (msnm)	1607,2
Distancia (m)	935
Pendiente media (%)	2,16
Cota casa de máquinas (msnm)	1573,5
Ht	33,7
Adecuaciones (5 m)	5
Ht efectiva	28,7
Caudal turbinable (m <sup>3</sup> /s)	1,35
Peso unitario agua (kN/m <sup>3</sup> )	9,81
Eficiencia turbina (%)	75
Eficiencia generador (%)	95
Potencia hidráulica efectiva (kW)	271

Fuente: Elaboración propia.

atender entre 6 y 19 vehículos por hora, con base en los 449 kW producidos por la PCH.

Si la energía se utiliza para uso residencial, adoptando un consumo por hogar de 226 kilovatios mensuales, según el artículo “Así se gasta la energía en casa”, del periódico *El Tiempo*, del 22 de octubre de 2001, la PCH podría cubrir las necesidades de 1012 hogares.

Para determinar la capacidad de atención del consumo se adoptó que la PCH trabaja en promedio 20 horas al día.

### DISEÑO CONCEPTUAL

Como parte del estudio de prefactibilidad se presenta a continuación una descripción conceptual de las obras principales que componen el proyecto.

## Descripción de las obras

El diseño conceptual, de acuerdo con la alternativa escogida, contempla la captación en el dique existente denominado azud 9, el cual se ubica frente a la abscisa K22+700 de la vía Bogotá-Villavicencio. A partir de allí se ubican la aducción, el desarenador, la conducción, el tanque de carga, las tuberías de carga, la casa de máquinas y el canal de retorno; adicionalmente, a partir de la casa de máquinas se desarrolla la red de media tensión hasta el transformador y las estaciones de recarga para vehículos eléctricos, las cuales se deben ubicar en una estación de servicio al borde de la vía.

En la figura siguiente (figura 11) se muestra el dique azud 9 existente. La foto está tomada desde la margen izquierda, por lo que en primer plano se observa la margen derecha. El costado izquierdo también dispone de un pequeño sobreebanco o valle de baja pendiente, en el cual se pueden ubicar las obras de captación y el desarenador, tal como se indicó en la topografía.

Se anota que la estructura propuesta quedaría ubicada dos kilómetros aguas abajo de la captación del acueducto del municipio de Cáqueza, la cual se localiza frente al kilómetro 20, sobre la margen derecha. Dicha captación es la única concesión de agua autorizada en el tramo de estudio, por lo que el proyecto no generaría interferencias con otros usuarios del caudal del río Cáqueza en dicho tramo.

Así mismo, se muestra un esquema de lo que serían las obras por implementar (figura 12). La captación se realizaría de manera lateral, aguas arriba del dique, teniendo en cuenta que los niveles están regulados por la cota de cresta del vertedero. La captación debe contar,



**Figura 11.** Azud 9.

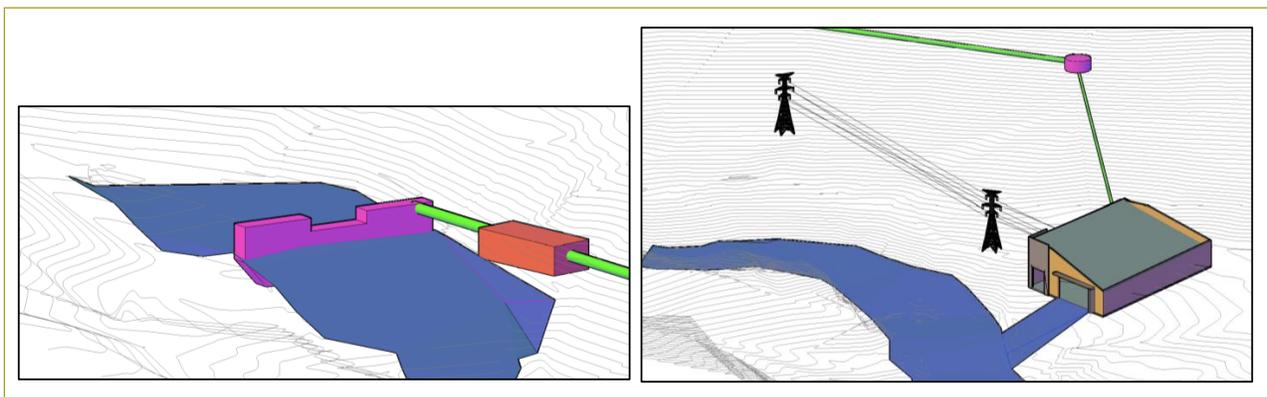
Fuente: Hidroconsulta, 2019.

a su vez, con una caja de recolección y un vertedero de excesos. Desde la captación saldría un pequeño tramo de tubería o canal que se conectaría con el desarenador, el cual se situaría a pocos metros de la captación y el azud.

El desarenador tiene la función de retener y depositar los materiales granulares de mayor tamaño que arrastra el caudal líquido, por lo que debe contar con una compuerta de lavado inferior, para limpieza y mantenimiento.

Posteriormente, del desarenador sale la línea de conducción, la cual tiene una longitud aproximada de 973 m, empezando alrededor de la cota 1729 msnm y terminando en la cota 1690 msnm. La pendiente promedio de esta conducción es del orden del 4 %.

Al finalizar la línea de conducción se encuentra el tanque de carga, el cual tiene la función de presurizar las tuberías que van hacia la casa de máquinas. El tanque de carga se ubica cerca de la vía, en la zona superior de la margen izquierda del cauce, a una cota aproximada



**Figura 12.** Esquema de captación, desarenador, tanque de carga, tuberías de carga, casa de máquinas, retorno al río y red de distribución.

Fuente: Elaboración propia.

de 1690 msnm. Desde allí salen las tuberías de carga hasta la casa de máquinas, la cual se ubica a una cota de 1637,5 msnm, con lo cual se obtienen una altura inicial de 52,5 m y una altura efectiva estimada de 47 m.

En la casa de máquinas se localizarán las turbinas, los generadores, transformadores y tableros de control, así como el área administrativa y de operación. Por último, el caudal turbinado se debe entregar de manera controlada al río, con el fin de no producir procesos de erosión o socavación lateral o de fondo.

La red de distribución se adecuará en función del punto que se escoja sobre la vía para construir la estación de servicio con las electrolineras, o para distribución a la comunidad rural o urbana del municipio de Cáqueza, en caso de que así se decida.

### Presupuesto estimado

En razón de que se trata de un estudio de prefactibilidad en el que se pueden dimensionar algunos componentes, pero se desconocen las condiciones reales de adecuación del terreno, movimiento de tierras, cimentación, diseño estructural y arquitectónico, entre otros, se estimará de un presupuesto de inversión por medio de información secundaria, relacionada con la construcción de otros proyectos en Colombia que ya se encuentran en operación.

En el libro *Pequeñas centrales hidroeléctricas* (Ortiz, 2011) se relacionan los costos de construcción de PCH en función de su capacidad instalada; esto, con base en los datos de siete PCH construidas y actualmente en funcionamiento en Colombia (tabla 12).

De acuerdo con lo anterior, y teniendo en cuenta que la PCH del río Cáqueza tendría un caudal de 1,35 m<sup>3</sup>/s y una caída de 50 m, podría estar en un rango si-

milar al de las PCH de Pizarro y Juradó; es decir, entre cuatro y ocho millones de dólares, o lo que, a pesos de diciembre de 2022, con un dólar cercano a los 5000 pesos colombianos, podría ser entre 20.000 millones y 40.000 millones de pesos colombianos.

Las alternativas 2 y 3 disponen del mismo caudal, pero sus caídas son de 14,1 y 18,5 m, respectivamente, por lo que su costo estaría más cercano a los 10.000 millones de pesos colombianos; por otra parte, la alternativa 4, con una caída de 28,7, tendría un valor un poco más cercano a la alternativa 1.

### Beneficios esperados

La materialización del proyecto presenta una solución a una necesidad insatisfecha: la falta de una estación de recarga para vehículos eléctricos en uno de los principales corredores viales del país. La retribución económica estaría dada por la venta de energía en cada una de las recargas que haga la estación. También se generarían beneficios indirectos, como la mejora de la infraestructura local y de servicios en la estación de recarga (montallantas, tiendas, baños, cafetería, zona de descanso), lo cual conduciría a una mejora del comercio local, generación de empleo, reducción de éxodo rural, entre otros.

El proyecto en sí y su propietario también resultarían favorecidos, ya que de acuerdo con la Ley 1715 de 2014 podría acceder a beneficios como:

- Deducción especial del impuesto sobre la renta.
- Depreciación acelerada.
- Exclusión del IVA en la adquisición de bienes y servicios.
- Exclusión del gravamen arancelario.

**Tabla 12**  
Costos de construcción de PCH realizadas en zonas no interconectadas.

Proyecto PCH	Costos en miles		Características		
	USD	USD /kW	Potencia (kW)	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Caída (m)
Taraira	225	7,5	30		
La Chorrera	205,7	11756	2*87.5	2,2	12
Pizarro	3900	5,9	3*220	17	4,9
Jurado	8000	8,0	1*500, 2*250	5,4	23,6
San Pedro	22150	1,38	2*8000	24	80
Guapi (propuesta)	25000	1,22	3*6000	23,7	91,1
Mitú	26397	14,6	1800	71	2,7

Fuente: Ortiz, 2011.

### Requerimientos ambientales y sociales

Los requerimientos ambientales y sociales deberán verificarse con las autoridades competentes en el momento de decidir la construcción del proyecto. Se prevé que desde el componente ambiental se requiera tramitar un permiso de ocupación de cauce, con el objeto de construir las obras de captación. En el componente social se deberán hacer las socializaciones necesarias con la comunidad y la atención de dudas y requerimientos respecto al proyecto.

### ANÁLISIS DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Como resultado del estudio efectuado y de la información analizada, se concluye y recomienda lo siguiente:

El suministro de energía eléctrica en Colombia tiene una oferta limitada, la cual incluso podría ser insuficiente a corto plazo, en especial si no se logra que entre en total funcionamiento la hidroeléctrica de Ituango.

Las normas que regulan la generación eléctrica en el país y las políticas gubernamentales de los últimos años incentivan el estudio, desarrollo y puesta en marcha de pequeñas centrales hidroeléctricas, ya que el territorio nacional dispone de muchas cuencas con el potencial para implementarlas, además de que son más amigables con el medio ambiente que otro tipo de energías, tienen un costo de producción relativamente bajo y permiten cumplir con la demanda en zonas donde el cubrimiento del Sistema Interconectado Nacional no es suficiente.

Las PCH son soluciones favorables en razón de que no inundan terrenos adyacentes, no cambian los regímenes de transporte de sedimentos, no alteran significativamente el comportamiento de la fauna de la zona y suelen tener una relación muy favorable entre su costo de inversión y el costo de producción de energía.

La utilización de vehículos eléctricos es una tendencia mundial. En Colombia, su adopción se ha visto limitada, en parte, por la poca infraestructura disponible, como es el caso de las estaciones de recarga, denominadas electrolinerías.

El río Cáqueza en el tramo de estudio, entre el K22+550 y el K25+550 de la vía Bogotá-Villavicencio, dispone de los caudales y de la topografía adecuados para la implementación de una PCH. Adicionalmente, la existencia de estructuras transversales tipo azud

facilitaría en forma significativa la implementación de tales soluciones, en virtud de que se reducirían las intervenciones sobre el cauce, con lo que se reducen a su vez los trámites ambientales.

El caudal que se devuelve al río después de la generación está en mejores condiciones que las iniciales, debido a que el proceso de turbinado aporta oxigenación.

La solución planteada podría generar una potencia efectiva de 449 kilovatios, con lo que se podrían producir a su vez 269 megavatios al mes, con una operación en promedio de 20 horas diarias de la PCH. Con esta producción se podrían atender 1000 viviendas o un promedio de entre 6 y 19 vehículos eléctricos por hora, por medio de estaciones de recarga o electrolinerías.

Para la estimación de la potencia efectiva no se consideraron las pérdidas por fricción y por accesorios en las tuberías y componentes del sistema hidráulico, ni las pérdidas normales por la eficiencia de las redes de transformación y conducción eléctrica; sin embargo, se adoptaron valores conservadores en cuanto a cotas y caudal turbinado, por lo que un estudio de factibilidad o de detalle arrojará valores de potencia similares o, muy seguramente, mayores.

Se recomienda llevar a cabo la siguiente etapa del estudio, para lo cual hay que socializar la propuesta con la comunidad y las autoridades competentes y realizar la ingeniería básica y de detalle requerida para ejecutar el proyecto.

En la siguiente etapa se debe tomar en cuenta el análisis de sedimentos en razón de que, por ser un río de montaña en régimen torrencial, el río Cáqueza puede arrastrar un caudal sólido considerable, en particular durante la ocurrencia de crecientes de mediana o alta magnitud.

Se recomienda analizar la combinación de dos o más de las alternativas propuestas, con el fin de verificar la posibilidad de aumentar la capacidad de producción de potencia del sistema mediante la captación de un mayor caudal en varias etapas.

### REFERENCIAS

Baraya, A. (30 de abril de 2018). Lo que necesita Colombia para masificar el uso de carros eléctricos. *Portafolio*. Disponible en <https://www.portafolio.co/negocios/lo-que-necesita-colombia-para-masificar-los-vehiculos-electricos-516679>.

- Clavijo, S. (01 de octubre de 2018). Desafíos del mercado energético de Colombia. *La República*. Disponible en <https://www.larepublica.co/analisis/sergio-clavijo-500041/desafios-del-mercado-energetico-de-colombia-2776774>.
- Criollo, X. y Quezada, C. (2011) *Diseño de una minicentral de energía hidroeléctrica en la planta de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de Cuenca*. Universidad Politécnica Salesiana. Ecuador.
- Decreto 0570 del 23 de marzo de 2018. Presidencia de la República.
- Electromaps (s.f.). Puntos de carga en Colombia. <https://www.electromaps.com/puntos-de-recarga/colombia>. (s/f). Recuperado el 24 de agosto de 2022.
- El Tiempo* (22 de octubre de 2001). Así se gasta la energía en casa. <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM666980#:~:text=Estos%20son%20algunos%20de%20los,consume%2024%20kilovatios%20al%20mes>.
- Grupo de investigación Xué y Semillero de investigación Barión (2020). *Pequeñas centrales hidroeléctricas*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Ley 143 del 11 de julio de 1994. Ministerio de Minas y Energía. Decreto 1258 del 7 de junio de 2013. Presidencia de la República.
- Hidroconsulta SAS (2022). Informe final V1.1. Estudios y diseños de detalle para las obras de mitigación para la atención de la emergencia en el sitio K20+700 de la UFO del corredor vial Bogotá - Villavicencio. Coviandina. Bogotá.
- Hidroconsulta Ltda.-IGL. (2004a). Estudio hidrológico, hidráulico y geotécnico del río Cáqueza entre el K18+000 y el K25+700 de la carretera Bogotá-Villavicencio. Informe final V1. Información Básica. Bogotá, D. C.
- Hidroconsulta Ltda.-IGL. (2004B). Estudio hidrológico, hidráulico y geotécnico del río Cáqueza entre el K18+000 y el K25+700 de la carretera Bogotá-Villavicencio. Informe final V2. Obras correctivas. Bogotá, D. C.
- Hidroconsulta Ltda. (2007). Informe final V1.0. Estudios y diseño hidráulico en el río Cáqueza en el sector de Puente Real (K18+000-K25+700) de la carretera Bogotá-Villavicencio. Coviandes. Bogotá.
- Hidroconsulta SAS (2012). Informe final V1.1. Estudios y diseños hidráulicos y geotécnicos en el tramo comprendido entre el K22+400 y el K25+500 de la carretera Bogotá-Villavicencio. Coviandes. Bogotá.
- Las2Orillas (8 de septiembre de 2018). Las pequeñas centrales hidroeléctricas de Antioquia, un referente nacional. <https://www.las2orillas.co/las-pequenas-centrales-hidroelectricas-de-antioquia-un-referente-nacional/>.
- León, W. (2022). Diseño de una PCH para la generación de energía eléctrica, aprovechando el sistema de abastecimiento de agua a Riohacha, distrito turístico y cultural. Universidad Antonio Nariño.
- Ley 1715 del 13 de mayo de 2014. Congreso de Colombia.
- López, A. (30 de junio de 2021). Nación alista 70 pequeñas centrales hidroeléctricas. <https://www.portafolio.co/negocios/empresas/nacion-alista-70-pequenas-centrales-hidroelectricas-553547>.
- López, A. (03 de abril de 2022). Desde 2025, Colombia tendría déficit en oferta de energía. *Portafolio*. <https://www.portafolio.co/economia/infraestructura/desde-2025-pais-tendria-deficit-en-oferta-de-energia-563657>.
- Mora, D. y Hurtado, J. (2004). *Guía para estudios de prefactibilidad de pequeñas centrales hidroeléctricas como parte de sistemas híbridos*. Universidad Javeriana.
- Morales, C. y Saavedra, F. (2017). *Diseño de una pequeña central hidroeléctrica para el municipio de Pisba, Boyacá*. UPTC.
- Ortiz, R. (2011). *Pequeñas centrales hidroeléctricas*. Ediciones de la U.
- Portafolio* (04 de julio de 2019). Colombia lidera el mercado de vehículos eléctricos particulares. <https://www.portafolio.co/economia/colombia-lidera-el-mercado-de-vehiculos-electricos-en-la-region-531242>.
- Resolución 865 del 2004 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.
- Restrepo, O. (17 de noviembre de 2019). Portal web El carro colombiano. Sin límite alguno, carros eléctricos tendrán arancel del 0% en Colombia. <https://www.elcarrocolombiano.com/industria/sin-limite-alguno-carros-electricos-tendran-arancel-del-0-en-colombia/>.
- Revista Motor* (06 de septiembre de 2022). Carros eléctricos: la oferta cero emisiones en Colombia. <https://www.motor.com.co/revista/Carros-electricos-la-oferta-cero-emisiones-en-Colombia-20220906-0008.html>.
- Rodríguez, C., Leyton, N. y Duarte, S. (2017). Obras hidráulicas en el río Cáqueza para la estabilización de los taludes de la carretera Bogotá-Villavicencio. VIII Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos.
- Semana* (19 de mayo de 2022). A partir de 2025 hará falta energía para atender el consumo de los colombianos. <https://www.semana.com/economia/macroeconomia/articulo/andeg-advierde-sobre-faltante-de-energia-para-cubrir-el-consumo-de-colombia-a-partir-de-2025/202241/>.
- Sierra et al. (2011). *Pequeñas y microcentrales hidroeléctricas: alternativa real de generación eléctrica*. Universidad Nacional de Colombia.
- Torres, E. (2012). *Investigación en pequeñas centrales en Colombia*. Universidad Libre.
- Trujillo, A. (2017). *Diseño de una picocentral hidroeléctrica en la localidad de Usme*, Bogotá. Universidad Católica de Colombia.
- Upme (2022). Proyecciones de demanda de energéticos. [https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/Informe\\_proyeccion\\_demanda\\_energetic\\_os.pdf](https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/Informe_proyeccion_demanda_energetic_os.pdf).
- Upme (2015). Plan de expansión de referencia generación-transmisión 2015-2029. [https://www1.upme.gov.co/Energia\\_electrica/Planes-expansion/Plan-Expansion-2015-2029/Plan\\_GT\\_2015-2029\\_VF\\_22-12-2015.pdf](https://www1.upme.gov.co/Energia_electrica/Planes-expansion/Plan-Expansion-2015-2029/Plan_GT_2015-2029_VF_22-12-2015.pdf).
- Upme (2015). Plan energético nacional 2050. [https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/PEN\\_2020\\_2050/Plan\\_Energetico\\_Nacional\\_2020\\_2050.pdf](https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/PEN_2020_2050/Plan_Energetico_Nacional_2020_2050.pdf).
- Upme (2018). Plan Nacional de Electrificación Rural (PNER) 2018-2031.
- Upme-Universidad Javeriana (2015). *Atlas de potencial hidroenergético*.

# Lineamientos para la implementación de un sistema de gestión de activos sostenible, en la infraestructura de transporte carretero departamental. Caso de estudio: Cundinamarca (Colombia)

Guidelines to implement a sustainable asset management system in the departmental road transport infrastructure. Case study: Cundinamarca (Colombia)

CAMILO JOSÉ GUZMÁN GUEVARA<sup>1</sup> - MARITZA CECILIA VILLAMIZAR ROPERO<sup>2</sup>

1. Maestría en Ingeniería Civil de la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería.

2. Directora de la especialización en Diseño, Construcción y Conservación de Vías de la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Bogotá, Colombia.

camilo.guzman-g@mail.escuelaing.edu.co - maritza.villamizar@escuelaing.edu.co

Recibido: 21/04/2022 Aceptado: 25/05/2022

Disponible en [http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones\\_revista](http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista)  
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

## Resumen

En 2019, el modo carretero contó con el 77 % de las asignaciones del sector del transporte en Colombia, inversiones asociadas principalmente a mejorar el estado de la infraestructura vial, que asciende a unos 205.379 kilómetros de vías, con el 78 % a cargo de departamentos y municipios, deterioro que sigue generando pérdida de competitividad frente a la región y el resto del mundo. Esta red ocupó el puesto 104 entre 144 países analizados por el Foro Económico Mundial (FEM) en 2019, para el componente “Calidad infraestructura vial”. Mediante este estudio se busca mejorar los procesos de planeación en entidades departamentales colombianas para la gestión de su infraestructura vial, que logren aportar al objetivo del buen uso de los recursos disponibles, tomando como caso de estudio el departamento de Cundinamarca. Se identificaron procesos y mejoras implementados en diferentes partes del mundo y recomendaciones de agencias viales internacionales y se halló que se utiliza el enfoque de gestión de activos y sistemas asociados para la administración de infraestructura de transporte. Así mismo, se hace un diagnóstico de la planeación efectuada por las gobernaciones y sus entidades competentes del sector vial; a partir de un análisis

cualitativo de brechas, se examinan las variables y componentes del enfoque frente a las prácticas llevadas a cabo por las entidades territoriales, haciendo énfasis en el caso de estudio local.

Se concluyó en la viabilidad del enfoque para la infraestructura vial departamental, el cual cumple con normativa vigente del sector y aporta al cumplimiento de la misión, funciones y restricciones presupuestales.

**Palabras claves:** infraestructura vial, planeación, gestión de activos viales, vías regionales, administración pública.

## Abstract

In 2019 the road mode accounted for 77% of the allocations of the transport sector in Colombia, investments associated with improving the state of road infrastructure amounting to approximately 205,379 kilometers of roads, with 78% in charge of departments and municipalities. Network that ranked 104th out of 144 countries analyzed by the World Economic Forum (WEF) in 2019 for the component “Road infrastructure quality”. Deterioration that continues to generate loss of competitiveness compared to the region and the rest of the world. This study seeks improvements in the planning processes in Colombian

departmental entities for the management of their road infrastructure, which contribute to the objective of the effective use of available resources, taking the department of Cundinamarca as a case study.

Processes and improvements implemented in various parts of the world and recommendations of international road agencies were identified, finding that the asset management approach and associated systems are used for the administration of transportation infrastructure. Likewise, a diagnosis of the planning conducted by the governorates and their competent entities of the road sector is made; based on a qualitative gap analysis, the variables and components of the approach are examined in relation to the practices conducted by the territorial entities, with emphasis on the local case study.

The feasibility of the approach for departmental road infrastructure was concluded, which complies with current sector regulations and contributes to the fulfillment of the mission, functions, and budgetary restrictions.

**Keywords:** road infrastructure, planning, road asset management, regional roads, public administration.

## INTRODUCCIÓN

Los activos viales son elementos que componen la infraestructura, tales como pavimentos, puentes, cunetas, alcantarillas, muros y taludes. Cabe anotar que la operación de una infraestructura no solo depende de activos físicos, sino también de otros elementos, como la información, medios financieros, aspectos humanos e intangibles (Van der Velde et al., 2013).

Históricamente, la infraestructura del modo carretero ha estado a cargo del sector público, a diferencia de otros modos. En este sentido, las vías se administran desde distintos niveles de gobierno, que ven a las redes viales no solo como bienes que prestan un servicio, sino como una herramienta para llevar progreso a las regiones y mejorar la calidad de vida de sus habitantes.

Al tener una importancia tan alta, su administración depende directamente de políticas públicas y gobiernos que las implementan en sus planes de desarrollo, programas y proyectos derivados. No obstante, una buena política debería poseer métodos de priorización de la inversión en función de componentes técnicos, como la demanda de transporte, características sociales, ambientales y económicas, que en ocasiones no se utilizan realmente, y tal como mencionan algunos autores, los métodos de planificación no son guiados por una visión de desarrollo a largo plazo que trascienda las diferencias políticas (Piazza et al., 2021)

Según cifras del Ministerio de Transporte, en Colombia se estima una red vial nacional de 205.379 km, que en virtud de la Ley 105 de 1993, su administración y su

planeación en gran medida están a cargo de entidades territoriales, como departamentos y municipios.

La mala calidad de la red vial del país se debe a diversos factores y causas, como la falta de presupuesto, obras defectuosas y el poco o inexistente mantenimiento de estas, al igual que por el desconocimiento de las vías, su estado y necesidades reales. Por ende, se puede determinar como problema central la deficiente planeación de la infraestructura de transporte carretero en el país, especialmente en las entidades territoriales.

En atención a lo anteriormente expuesto, se evidencia la necesidad de encontrar alternativas para mejorar la planeación de la infraestructura vial del país, con el fin de ayudar a su conservación y optimización de los recursos disponibles. En este sentido, con el estudio se busca exponer beneficios encontrados en diferentes partes del mundo que han optado por el enfoque denominado gestión de activos para la administración de carreteras. Esto en contraste con el estado actual de las prácticas de entidades departamentales colombianas, para así determinar la factibilidad y los lineamientos de implementación de sistemas de gestión de activos en Colombia.

En el artículo se exponen, en primer lugar, los sistemas de gestión de activos, sus componentes y casos de estudio internacionales que lo han implementado o se encuentran en la transición hacia este enfoque. Posteriormente se discute el caso colombiano, con su normativa y avances en la gestión de infraestructura vial. Se diagnostica el estado de la gestión vial en los departamentos analizados como muestra, a partir de resultados de encuestas y documentación oficial analizada. Así mismo, se presenta la realidad del departamento de Cundinamarca como caso de estudio local, analizando la institucionalidad y los procesos para la administración de los activos viales a su cargo. Además, se dan lineamientos que permitirán la transformación de la entidad territorial seleccionada y para la implementación de principios del enfoque y sistemas de gestión de activos en la infraestructura vial departamental. Finalmente, se presentan las conclusiones del estudio y se dan recomendaciones para tener en cuenta.

## SISTEMAS DE GESTIÓN DE ACTIVOS VIALES (SGAV)

Los SGAV son un conjunto de elementos y procesos interrelacionados para la toma de decisiones a partir de



**Figura 1.** Modelo conceptual de la gestión de activos.

Fuente: Adaptado de IAM, 2015.

información de calidad y prácticas tanto de ingeniería como de ciencias económicas, sociales y ambientales, que logren la administración de las redes de carreteras y sus componentes durante su ciclo de vida completo, es decir, a través de su diseño, construcción y conservación. Este enfoque es de vital importancia, ya que como indica Schliessler (1994), la tarea del pasado era construir un sistema de carreteras y caminos; la tarea de hoy es conservar este sistema y adaptarlo a las necesidades de los usuarios.

El Instituto de Gestión de Activos (IAM, por su sigla en inglés) del Reino Unido, sugiere un modelo conceptual del enfoque que contempla elementos compuestos por procesos, metodologías, información, personal y sistemas informáticos para la administración y procesamiento de datos. Una adaptación de este modelo se presenta en la figura anterior (figura 1).

Los elementos externos son presiones hacia la infraestructura, toda vez que involucran demandas de niveles de servicio, así como cumplimiento a restricciones legales y presupuestarias por parte de los administradores. Estos hacen que las organizaciones deban adoptar un plan estratégico para cumplir con su misión y objetivos específicos.

La razón de ser de cualquier agencia vial, secretaría u otro tipo de organización, ya sea pública o privada, encargada de la administración de carreteras, siempre estará relacionada con el servicio que presta esta infraestructura a los usuarios y habitantes del territorio donde se encuentre; no obstante, cada una de estas or-

ganizaciones tiene objetivos y políticas particulares para el cumplimiento de su misión común. Priyatningsih & Sutrisno (2020) establecen en su estudio que las estrategias de gestión de activos viales se realizan a través de un enfoque combinado del sistema de gestión de activos integral y políticas en gestión de activos, buscando que el desempeño del servicio prestado esté en consonancia con las expectativas de las partes interesadas.

Por otro lado, la información técnica de los activos administrados resulta ser un elemento transversal en el sistema. No obstante, en la bibliografía se menciona que uno de los principales desafíos de implementar la gestión de activos es la recopilación, disponibilidad y calidad de los datos (Shah et al., 2017). En este sentido, los datos requieren una importante inversión y un estricto seguimiento. La información de los activos para el caso específico de las vías se divide en tres grandes grupos: inventario de activos, condición de activos y datos operativos del sistema de transporte.

Por su parte, el componente de toma de decisiones se da a causa del problema de asignación de recursos económicos, físicos y humanos disponibles en las carteras de desarrollo, conservación y operación de la infraestructura. Estas asignaciones deben obedecer a procesos definidos a partir de variables técnicas, sociales y ambientales para garantizar la transparencia de la organización frente a los usuarios. De igual modo, el enfoque de ciclo de vida permitirá predecir el desempeño en el tiempo y así determinar el estado y alternativas de mantenimiento preventivo para prolongar la vida útil.

Como último proceso, la identificación, evaluación y gestión de los riesgos se requieren, como en todo sistema, para la mitigación de efectos negativos y aprovechamiento de oportunidades de mejora continua que retroalimenten a la organización.

### Casos de estudio internacionales

En el escenario internacional se evidencian un gran avance y notable madurez en prácticas de gestión de activos en países como Estados Unidos y España, los cuales han usado el enfoque por décadas, donde su conocimiento y experiencia es modelo para otras naciones. Según el Foro Económico Mundial, Chile es el país con mejor desempeño para la región de América Latina y el Caribe, con la red vial de mayor calidad, obtenida gracias a su continuo seguimiento del ciclo de vida de sus carreteras que se hace desde 1990 por intermedio del Departamento de Gestión Vial, el cual se encarga de realizar anualmente el inventario de las vías por tipo de superficie de rodadura, así como de efectuar la inspección visual de los pavimentos existentes junto con mediciones de IRI y conteos de tránsito cada dos años. Como nación emergente en la materia, Perú actualmente se encuentra en la implementación de un SGAV a partir de los documentos de la norma ISO 55000, para lo cual trazó un plan que cuenta con recursos asignados mediante la Ley 31084 de 2021, por una suma de quince millones de soles (MTC, 2021).

### INFRAESTRUCTURA VIAL COLOMBIANA

La red vial nacional está compuesta por 205.317 kilómetros de vías, siendo la terciaria la más extensa con un 69 %, administrada en su gran mayoría por los 1101 municipios, los cuales tienen el 71 % de participación en esta red. Por su parte, los departamentos son responsables de 45.137 kilómetros de vías de segundo orden y cerca de 14.000 kilómetros de vías terciarias. En tal virtud, tan solo el 22 % del total de la red es competencia de la nación, que ejerce sus funciones por intermedio de la Agencia Nacional de Infraestructura (ANI) para las vías primarias concesionadas, y del Instituto Nacional de Vías (Invías) para vías primarias no concesionadas y la red terciaria aún a cargo de la nación, que no ha sido transferida a los municipios de conformidad

con la política de descentralización iniciada con la Constitución Política de 1991.

### Avances en gestión vial en Colombia

El Conpes 3272 de 2004 identifica una dinámica de construcción, deterioro y reconstrucción de la infraestructura vial nacional por la mala gestión de esta y la asignación reactiva de recursos sin la debida planeación, lo que generó un pasivo vial por la falta de conservación. A su turno, el Conpes 3480 de 2007 crea el Plan Vial Regional (PVR), en el que el gobierno nacional busca que las entidades departamentales implementen procesos y herramientas de gestión vial que incluyen, principalmente, inventarios, mejoramiento y mantenimiento de vías y su fortalecimiento institucional (DNP, 2007), desarrollando así las metodologías para la elaboración del Plan Vial Departamental (PVD) en cada territorio como herramienta de planeación; sin embargo, no existe normativa que obligue a su cumplimiento por parte de las entidades territoriales. Caso contrario es la categorización e inventarios viales, que de conformidad con la Ley 1228 de 2008 las entidades están obligadas a realizar y presentar ante el Ministerio del Transporte, cumpliendo con las especificaciones técnicas establecidas por este en sus resoluciones.

Mediante el Conpes 3857 de 2016, la nación hace el diagnóstico en la gestión de la red terciaria e identifica seis ejes problemáticos, entre los que sobresalen la ausencia de información, bajo impacto de intervenciones, deficiencias en formulación de proyectos y falta de transparencia en contratación. En tal virtud, se dan lineamientos para mejorar la gestión vial por medio de la realización de inventarios viales, implementación de procesos de priorización, documentos técnicos con enfoque rural, contratación transparente y un alto grado de inclusión y participación de las comunidades en la toma de decisiones y ejecución de los trabajos.

### Infraestructura vial departamental

Para el estudio, se seleccionaron los nueve departamentos enmarcados en categoría especial y categoría 1 por la Contaduría General de la Nación (CGN) a 2022. Estas categorías corresponden a los departamentos con mayores poblaciones y recursos disponibles para la inversión superior. En contraste, menores categorías



**Figura 2.** Inversión de recursos propios en vías y recaudo total por impuesto a vehículos y sobretasa a la gasolina, 2017-2020.

Fuente: Elaboración propia.

obedecen a menor población y recursos más limitados al funcionamiento de las gobernaciones.

Para el desarrollo y la conservación de estas, redes los departamentos hacen uso de recursos propios, provenientes de ingresos tributarios, no tributarios, transferencias e ingresos de capital. Entre los recaudos tributarios se encuentran el impuesto a vehículos automotores, la sobretasa a la gasolina y al ACPM, creados en principio para mitigar externalidades del transporte carretero, como el deterioro de la infraestructura. No obstante, la inversión en vías durante el cuatrienio 2017-2020 en la mayoría de los departamentos analizados fue superior al recaudo por estos conceptos (figura 2).

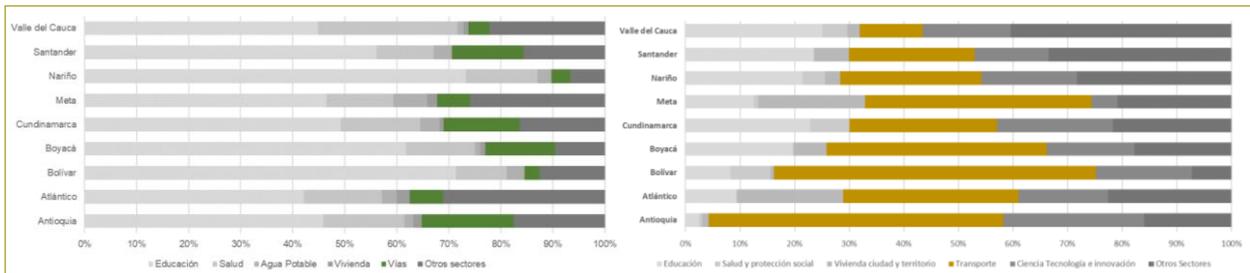
Los recaudos por conceptos de vehículos y combustibles no necesariamente son destinados a la conservación vial, toda vez que estas asignaciones quedan a discreción de los gobiernos territoriales de turno. Aun así, es evidente que se invierten en vías cuantías incluso mayores de lo recaudado por los impuestos establecidos para tal fin. Pese a esto, el sector vial en general tiene mayores asignaciones en los recursos provenientes del Sistema General de Regalías (SGR) que en los recursos propios, donde los departamentos priorizan principalmente el sector de la educación (figura 3).

Para la administración y gestión de la infraestructura vial a cargo, cada departamento tiene secretarías de

infraestructura o entidades descentralizadas en algunos casos. Estas entidades tienen funciones relacionadas con la planeación, contratación y ejecución de actividades de mantenimiento, rehabilitación y mejoramiento de la infraestructura física; no obstante, el personal tiene sobre todo funciones relacionadas con las etapas de la contratación pública. Así mismo, deben ejecutar lo establecido en los planes departamentales de desarrollo (PDD) vigentes que nacen de acuerdos políticos y concertaciones con la comunidad en su etapa de estructuración. Las metas trazadas en los PDD del cuatrienio 2020 - 2023 para los departamentos analizados son, en esencia, las mismas; productos como “Vías mejoradas”, “Vías mantenidas”, “Red vial departamental rehabilitada”, y con métricas en su mayoría en kilómetros o número de vías intervenidas.

### Departamento de Cundinamarca

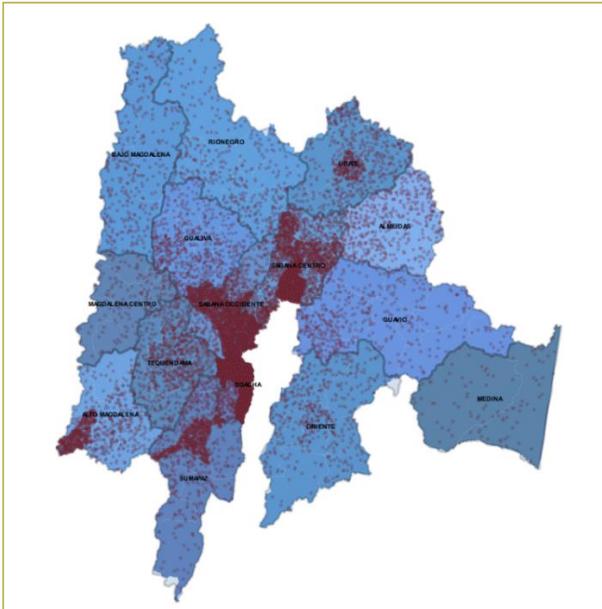
Ubicado en el centro de Colombia, Cundinamarca limita con los departamentos de Boyacá, Meta, Huila, Tolima y Caldas. Bogotá se encuentra incrustado en su centro, lo que genera que entre ambos haya una ciudad región en permanente simbiosis. A 2022, el departamento cuenta con una población de 3.478.323 habitantes, siendo el tercer departamento con mayor



**Figura 3.** Izquierda: Asignaciones de recursos propios. Derecha: Asignaciones de recursos SGR, 2017 - 2020.

Fuente: Elaboración propia.

población del país. Posee un total de 116 municipios, organizados en 15 provincias. A continuación se presenta la ubicación geográfica de su población para el año 2022 (mapa 1).



**Mapa 1.** Densidad demográfica en Cundinamarca, año 2022.

Fuente: Elaboración propia.

Evidentemente, la población del departamento se encuentra localizada en mayor medida en los municipios vecinos a Bogotá, como Soacha, Chía, Zipaquirá, Funza, Facatativá y Mosquera. Estos municipios y sus respectivas provincias son los que mayor actividad económica tienen, aportando cerca del 60 % del PIB del departamento. En contraste, las provincias más alejadas de Bogotá son las que menor desempeño y especialidad en su producción poseen.

El transporte carretero es predominante en el departamento, con una red vial a cargo de 6317 kilómetros, 48 % de vías terciarias, 47 % secundarias y 5 % de vías de primer orden, administradas por el Instituto de Infraestructura y Concesiones de Cundinamarca (ICCU). Entidad descentralizada adscrita a la Secretaría de Transporte y Movilidad, con funciones relacionadas a la elaboración de planes, estudios, estructuración y ejecución de proyectos que propendan en el mejoramiento y conservación de la red vial departamental, así como el apoyo técnico y financiero a las redes terciarias y urbanas de los municipios de su jurisdicción.

## LINEAMIENTOS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE SGAV, EN LA INFRAESTRUCTURA VIAL DEPARTAMENTAL

A partir de la comparación de las buenas prácticas en los SGAV y las hechas por los departamentos analizados, se efectuó un análisis de brechas para identificar el rezago y debilidades de estas entidades en la gestión de su infraestructura, y se hallaron deficiencias en la mayoría de los componentes y procesos del modelo conceptual (figura 1). La información de activos es el componente que mayores retos representa para redes de gran tamaño, toda vez que no se hacen inventarios con una periodicidad definida ni se cuenta con sistemas para el manejo de datos de inventario o condición. En cuanto a la toma de decisiones, los organismos viales proponen, pero no disponen y las decisiones finales las toma el gobierno; de igual forma, se rinden cuentas del uso de los fondos, pero no explícitamente de la condición de las vías (Schliessler, 1994).

A renglón seguido se exponen los principales aspectos que hay que tener en cuenta para la implementación de un SGAV en la infraestructura vial del departamento de Cundinamarca, donde a partir de sus metas, objetivos y políticas se formule un plan de gestión de activos que provea procesos y metodologías para establecer niveles de desempeño de los activos y la forma en que se medirán, así como procesos para la planeación, programación, ejecución y monitoreo de los trabajos realizados. Los sistemas de información, análisis y modelación del estado de los activos serán transversales a todo el plan de implementación, pero el personal debe estar capacitado y resiliente frente al cambio para garantizar el éxito.



**Figura 4.** Componentes para implementación del SGAV en infraestructura vial en Cundinamarca.

Fuente: Elaboración propia.

## CONCLUSIONES

El enfoque de gestión de activos es el camino lógico que deben seguir las entidades territoriales colombianas para cumplir su misión a partir de presupuestos cada vez más limitados y las demandas crecientes por parte de los usuarios y habitantes al sector vial.

Del análisis de brechas realizado por componentes del SGAV se identifica que los datos son el mayor inconveniente para la planeación y gestión de la infraestructura vial a cargo de las gobernaciones, siendo transversales a la mayoría de los demás componentes.

La implementación del SGAV puede durar varios años, dependiendo del tamaño de la red en cada departamento, los recursos destinados para tal fin, el liderazgo y, sobre todo, el nivel de compromiso de los tomadores de decisiones de continuar con una labor que seguramente no terminará durante su periodo de gobierno y deben incluir metas en el PDD para asegurar los recursos necesarios.

El SGAV no implica la eliminación de los planes de desarrollo. Es, más bien, una herramienta para la estructuración transparente y verificable de estos planes de gobierno para el sector vial.

## REFERENCIAS

- IAM (2015). *Gestión de activos: una anatomía* (3rd ed.). www.theIAM.org.
- MTC (2021). Plan de implementación del Sistema de Gestión de Activos de la Red Vial Nacional.
- Piazza, G., Varela, H., & Caso Flórez, M. (2021). Provisión de infraestructura vial: 1. Planificación. Provisión de Infraestructura Vial: 1. Planificación. <https://miriadax.net/web/provision-de-infraestructura-vial-1-planificacion>.
- Priyatningsih, K., & Sutrisno, M. (2020). Road infrastructure asset management strategy and its impact on the environment. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 830(2). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/830/2/022030>.
- Schliessler, A. (1994). Caminos, un nuevo enfoque para la gestión y conservación de redes viales. Cepal.
- Shah, R., McMann, O., & Borthwick, F. (2017). Challenges and prospects of applying asset management principles to highway maintenance: A case study of the UK. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 97, 231–243. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2017.01.011>.
- Van der Velde, J., Klatter, L., & Bakker, J. (2013). A holistic approach to asset management in the Netherlands. *Structure and Infrastructure Engineering*, 9(4), 340–348. <https://doi.org/10.1080/15732479.2012.657650>.



# Metodología para la implementación de redes peatonales a nivel de intralocalidad. Caso de estudio: Localidad Engativá, Bogotá, D.C.

## Methodology for implementing pedestrian networks within a locality. Case study: Engativa Locality, Bogotá, D.C.

ANA MILENA LEMUS ARIAS<sup>1</sup> - MÓNICA SUÁREZ PRADILLA<sup>2</sup>

1. Maestría en Ingeniería Civil de la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería.

2. Doctora en Gestión y Valoración Urbana, profesora asistente del programa de Ingeniería Civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

ana.lemus@mail.escuelaing.edu.co - monica.suarez@escuelaing.edu.co

Recibido: 12/05/2022 Aceptado: 14/06/2022

Disponible en [http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones\\_revista](http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista)  
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

### Resumen

La importancia del proceso de peatonalización en las ciudades latinoamericanas ha crecido en los últimos tiempos debido a la necesidad de hacer sostenibles los ambientes urbanos, generar intermodalidad en las diferentes etapas del viaje y cumplir con las metas de los objetivos de desarrollo sostenible (ODS). Particularmente, en la ciudad de Bogotá se ha desarrollado en los últimos años un programa de redes ambientales sostenibles denominadas RAPS (Redes Ambientales Peadonales Seguras), las cuales conectan diversas zonas o localidades de la ciudad. Sin embargo, considerando el gran tamaño de las localidades con las que cuenta Bogotá, es necesario conectarlas en su interior para disminuir los viajes innecesarios, generar centralidades y una mejor movilidad en la zona.

Por esto, el objetivo del presente trabajo es identificar posibles corredores peatonales dentro de la localidad de Engativá, de la ciudad de Bogotá, para lo cual se estructuró una metodología mixta que mezcla métodos de ingeniería de tránsito y un método de análisis multicriterio, y utiliza información demográfica, urbanística, de usos de suelo, co-

nectividad y tránsito para identificar corredores peatonales en el sector suroriental de la localidad de Engativá. Los resultados muestran que existen cinco corredores que cumplen con los criterios de elección y uno de ellos se puede catalogar como óptimo.

**Palabras claves:** corredores peatonales, sostenibilidad, análisis multicriterio.

### Abstract

The importance of the pedestrianization process in Latin American cities has grown in recent times due to the need to make urban environments sustainable and generate inter-modality in the several stages of the trip and meet the goals of the sustainable development goals SDG. In the city of Bogotá, a program of sustainable environmental networks called RAPS (Safe Pedestrian Environmental Networks, acronym in Spanish) has been developed in recent years, which connect different areas or localities of the city. However, considering the enormous size of the localities that Bogotá has, it is necessary to connect them inside to reduce unnecessary trips, generate centralities and better mobility in

the area. Therefore, the objective of this work is to identify possible pedestrian corridors within the Engativá locality of the city of Bogotá. A mixed methodology was structured that mixes traffic engineering methods and a multi-criteria analysis method and uses demographic, urban, land use, connectivity, and traffic information to identify pedestrian corridors in the southeastern sector of the town of Engativá. The results show that there are five corridors that meet the selection criteria and one of them can be classified as optimal.

**Keywords:** pedestrian corridors, sustainability, multi-criteria analysis.

## INTRODUCCIÓN

Leinberger y Alfonzo (2012) identifican en su trabajo sobre el impacto económico que tiene una peatonalización que los lugares caminables urbanos poseen una economía mucho más activa que los no caminables; en cuanto más caminable es una ciudad, mejores y más fuertes son los lazos que se generan en la comunidad. Por eso es fundamental entender que las necesidades de movilidad de las personas han aumentado por diferentes motivos, tales como las nuevas formas de empleo flexible, los nuevos patrones de consumo, la expansión urbana o la segregación social.

Por otro lado, también aumentan las demandas por mejores formas de moverse y las dinámicas de movimiento en sí mismas (Jirón, 2015). “El automóvil, que una vez fue instrumento de libertad, se ha convertido en una prótesis que pone en peligro nuestras vidas, malgasta nuestro tiempo y genera gases contaminantes” (Speck, 2013); un vehículo dificulta la tranquilidad del viandante cuando las aceras llegan al máximo de su capacidad.

Con la llegada de la “era de la motorización” se ha dado gran prioridad al diseño y construcción de la infraestructura para vehículos, poniendo al peatón en un segundo plano y dejándolo en riesgo, especialmente en materia de accidentalidad; la reducción de la conectividad peatonal afecta a colectivos socialmente vulnerables y constituye no solo una amenaza para la cohesión social, sino que también compromete la sostenibilidad urbana (Pikora et al., 2009), por lo que evaluar los entornos urbanos se convierte en un aspecto de gran importancia desde el punto de vista de la movilidad.

Caminar se considera la forma más sostenible de moverse, ya que es económico, no produce emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), proporciona importantes beneficios para la salud y es accesible para

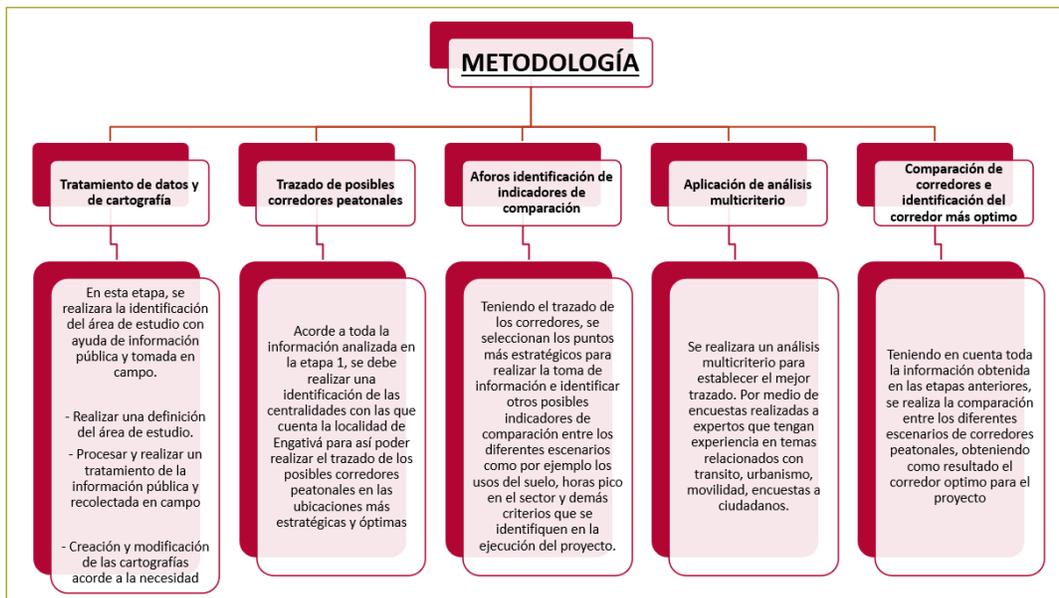
la mayoría de la población, independientemente de su nivel de ingresos (Tournier et al., 2016); también es un modo fundamental de intermodalidad de cadenas de viaje, ya que todo viaje comienza y termina caminando (Litman, 2003).

La movilidad no es solo un derecho de los ciudadanos, sino también una verdadera oportunidad para incrementar la competitividad de las ciudades, disminuir considerablemente el tiempo en traslados y conexiones, aumentar la seguridad del usuario, fomentar el empleo de carburantes con menos contaminantes y de medios de transporte sostenibles, con un impacto positivo para el medio ambiente y la salud pública; en suma, supone una oportunidad para elevar la calidad de vida de los ciudadanos (Herce, 2009). Para determinar cómo las características del usuario, entorno o viaje influyen en el comportamiento peatonal, se han utilizado modelos de elección discreta basados en la teoría de la utilidad aleatoria (McFadden, 1974). En el estudio de Antonini et al. (2006) se observa una combinación de alternativas de caminatas basada en tres factores: velocidad, dirección radial y número de peatones presentes; como resultado del estudio se obtiene que los peatones tienen una tendencia a mantener el rumbo hacia el destino final.

En el estudio de Baltes & Chu (2002), se analizan diferentes hipótesis de por qué la gente cruza las calles en el lugar en que lo hacen; se plantea un modelo de elección discreta, con sondeos de preferencia declarada, que considera el entorno de las vías, las condiciones del tráfico, el diseño vial, la educación vial y la regulación.

En América Latina y el Caribe, las políticas públicas de movilidad urbana sostenible se sitúan cada vez más en el foco del peatón, la bicicleta y el transporte público como ejes articuladores de las ciudades del futuro. Estas políticas han priorizado la aplicación de ciclovías, bicicletas públicas, bicicleta compartida, junto a la peatonalización de las ciudades (BID, 2020) y el abandono de lo que hasta hace algunos años se conocían como puentes peatonales. Ciudades como Bogotá, por su parte, plantean claros objetivos sobre el uso de la bicicleta como modo de transporte alternativo (BID, 2020).

Según un estudio realizado por la Corporación Andina de Fomento (CAF, 2011), en el que se analizaron el desarrollo urbano y la movilidad en quince ciudades



**Figura 1.**  
Metodología.

Fuente: Elaboración propia.

grandes y medianas de Latinoamérica, se encontró que el total de vías destinadas a los peatones y ciclistas en esas ciudades sumaba apenas 996 km dentro de un sistema de vías con una extensión total de 245.000 km. De acuerdo con los datos presentados por la Organización Panamericana de la Salud (OPS), en América Latina y el Caribe más de la mitad de las víctimas por accidente de tránsito son peatones, motociclistas o ciclistas (OMS, 2018). Colombia no es la excepción, según la Agencia Nacional de Seguridad Vial (ANSV), hasta octubre de 2020 se registraron 4156 muertes por accidentes de tránsito, y en su mayoría las víctimas mortales resultaron ser peatones y motociclistas.

## METODOLOGÍA Y DESARROLLO

Para la elección del área de estudio, el principal indicador que se tuvo en cuenta fue el nivel de accidentalidad peatonal en las localidades de la ciudad de Bogotá. Se encontró que de acuerdo con las estadísticas publicadas por la Agencia Nacional de Seguridad Vial, de enero a septiembre de 2022, de 422 accidentes viales en 154 han estado involucrados peatones, de los cuales 116 han sido hombres y 38 mujeres; el rango de edad que más presenta accidentalidad es de 60-65 años, (figura 1).

Al hacer un análisis de los niveles de accidentalidad en las localidades de Bogotá, se halla que durante el año 2017 las localidades con mayor índice de accidentalidad

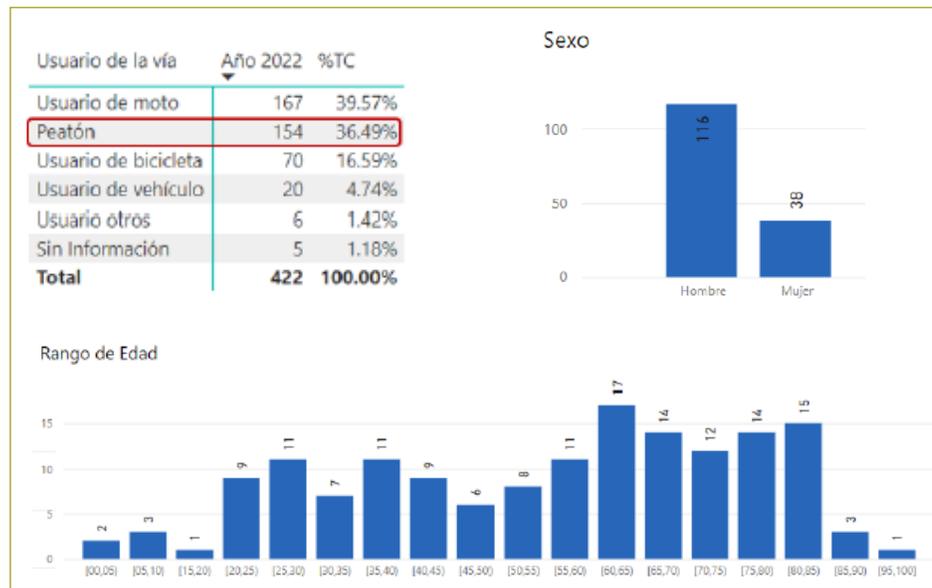
son Kennedy, Engativá y Suba, con 466, 297 y 257 accidentes, respectivamente (figura 2). Además, el 31 % de los siniestros con peatones fallecidos ocurrieron en Puente Aranda, Kennedy y Engativá, y el 29 % de los siniestros con peatones lesionados se presentó en Kennedy, Engativá y Suba (figura 3). Desde esta perspectiva, se identifica que la localidad de Engativá es un caso de estudio que interesa a la ciudad de Bogotá.

### Caso de estudio: Localidad de Engativá

La localidad de Engativá cuenta con una población de 814.468 habitantes, en una extensión urbana de 3439,2 hectáreas, con un total de nueve unidades de planeamiento zonal (UPZ). Específicamente, la UPZ 74 (Engativá) es la que cuenta con una mayor participación en el suelo urbano, aproximadamente el 16,4 %.

Según la Secretaría Distrital de Planeación, en la localidad de Engativá se hacen aproximadamente 1.496.979 viajes diarios, y 10 % de los viajes se realizan en transporte privado. Por ello, es necesario identificar corredores peatonales a nivel intralocal que contribuyan a disminuir los viajes dentro de la localidad (figura 4).

Para identificar los corredores se analizaron criterios como la conectividad entre los equipamientos existentes, como colegios, centros comerciales y accesos al sistema de transporte público de la ciudad.



**Figura 2.** Datos de la Agencia Nacional de Seguridad Vial.

Fuente: Estadísticas de la Agencia Nacional de Seguridad Vial (ANSV).

Al escoger la ubicación y longitud de dichos corredores, lo que se quería lograr es que estos abarcaran un sector representativo dentro de la zona de influencia que podría llegar a tener, y adicionalmente que estos quedaran distribuidos de una manera uniforme dentro de la localidad (figura 5).

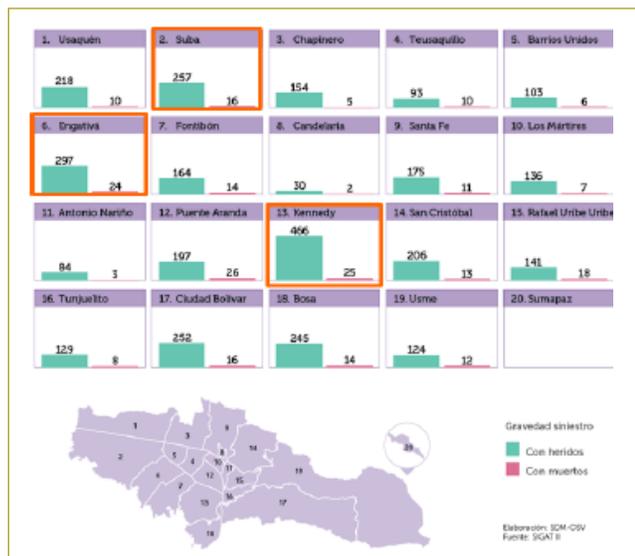
El análisis de las zonas de influencia identificó que los indicadores principales que se deben manejar son los niveles de conexión entre el corredor e instituciones

educativas, puntos de interés como centros comerciales, parques, etc., viviendas, acceso al transporte público como Transmilenio y SITP, estratificación del sector y uso del suelo. Es importante aclarar que el análisis se hizo para una zona de influencia de 500 metros en cada uno de los puntos que contiene cada corredor propuesto (figuras 6 y 7).

Para la toma de información en campo se realizaron aforos en días típico y atípico (jueves y viernes, respectivamente), en un horario de 6 a.m.- 9 a.m. y 2 p.m.- 5 p.m. en ambos días; esto con la intención de establecer la capacidad de volumen que tendría cada corredor. Los datos se obtuvieron del portal de datos abiertos de Bogotá de la Secretaría Distrital de gobierno.

Después de la elección de los corredores y del análisis de tránsito correspondiente se aplicó un análisis multicriterio para elegir el corredor óptimo. Para esto, lo primero que se realizó fue el diseño de sondeos para expertos en tránsito, movilidad o urbanismo, con el objetivo de identificar las preferencias entre diferentes criterios de evaluación, independientemente del contexto y la magnitud de los impactos. Esto con la intención de que la metodología se pueda aplicar a diversos contextos, sin estar sujetos a ningún tipo de característica en específico.

El modelo que se aplicó tiene como objetivo obtener coeficientes de ponderación (pesos -  $I_w$ ) para los criterios de sostenibilidad. Estos pesos provienen del

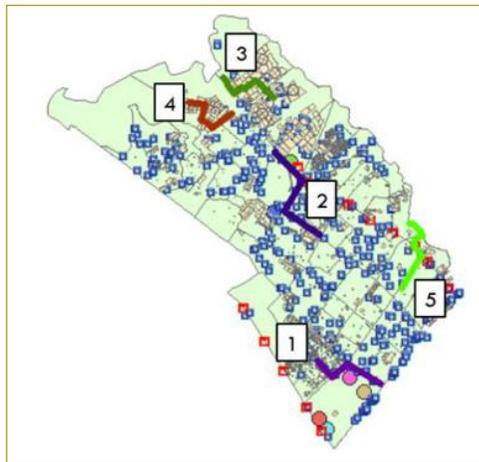


**Figura 3.** Accidentalidad en las localidades de Bogotá.

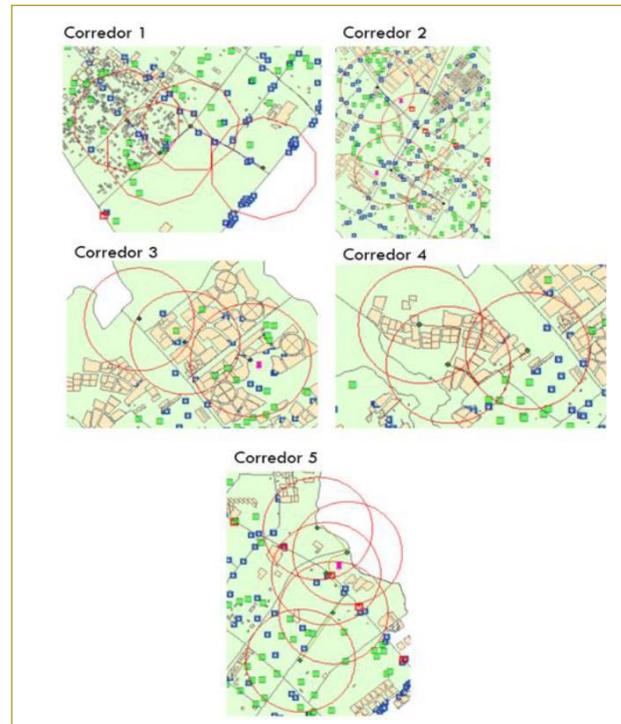
Fuente: Alcaldía Mayor de Bogotá.



**Figura 4.** Viajes diarios en la localidad de Engativá  
Fuente: Alcaldía Mayor de Bogotá.



**Figura 5.** Mapa de los corredores peatonales propuestos para la localidad de Engativá.  
Fuente: Elaboración propia.

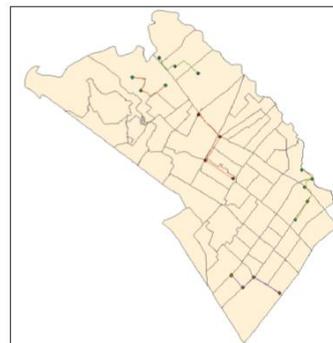


**Figura 6.** Zonas de influencia de los corredores propuestos  
Fuente: Elaboración propia.

contexto (nivel de gravedad) y de los juicios y preferencias comparativos basados en el consenso (pesos convergentes -  $C_w$ ).

Para calcular el valor de  $C_{wi}$ , es decir, los pesos convergentes, se utilizó un análisis multicriterio para derivar los pesos, ya que es necesario establecer una comparación entre los diferentes criterios. Para esto, se hace uso de la información recolectada por medio de la encuesta a expertos, en la que los expertos tenían una escala de respuesta de 1 a 9, pero tomando en cuenta que para hacer uso del análisis multicriterio es necesario organizar las comparaciones por pares de  $-8$  a  $+8$ , se realizaron los remplazos que se muestran a continuación (figura 9).

Después de esto, se realizó un análisis estadístico en el *software* R, en el que se aplicaron pruebas como



**Ilustración 7.** Puntos toma de información  
Fuente: Elaboración Propia.

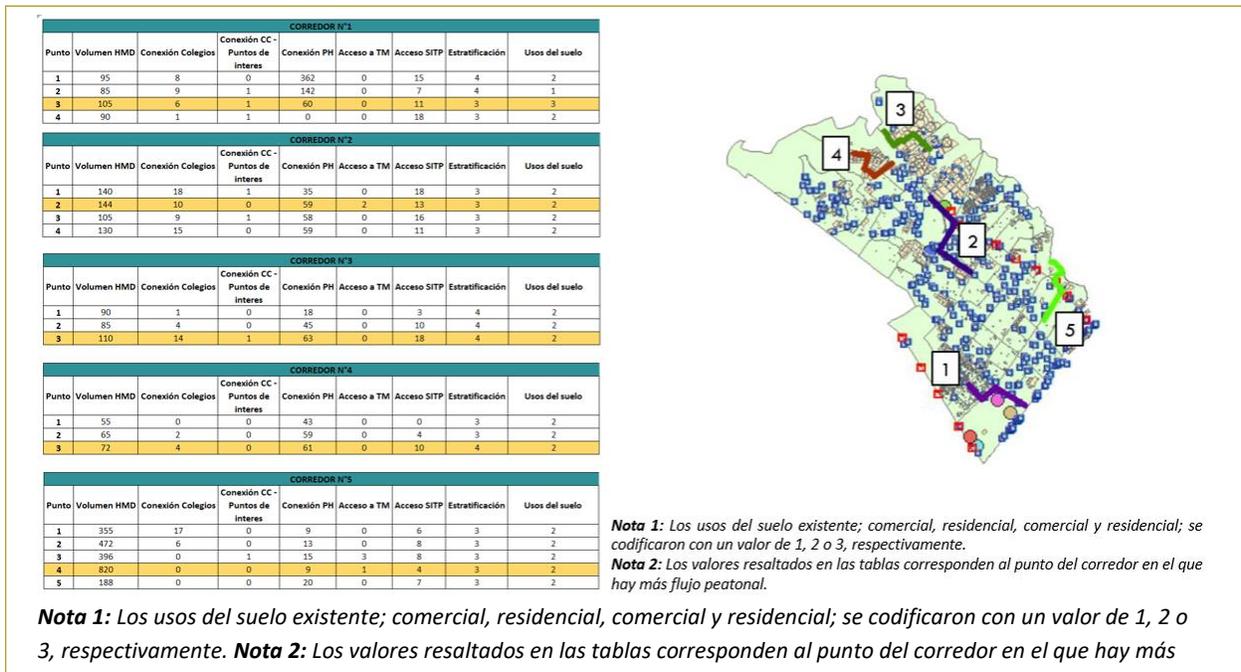


Figura 8. Resultados de aforos.

Fuente: Elaboración propia.

la Shapiro y la Wilxcon. Los resultados que arrojaron estos análisis se aceptan, ya que no hay diferencia mayor de un 93 % y el nivel de confianza utilizado fue del 5 % (figura 10).

Una vez obtenidos los valores de peso para cada una de las variables, se procede a calcular el nivel de gravedad; para esto, lo primero que se hizo fue un sondeo a los ciudadanos para tener el contexto de la movilidad propia del lugar y poder involucrar las partes interesadas en el proyecto. Es importante tener en cuenta que las preguntas que se formaron para dicho sondeo se diseñaron considerando el ambiente y la cultura de donde se implementara el proyecto, preguntas que se pueden ajustar según las necesidades del estudio. Se evaluaron todos los criterios con una puntuación del 0 al 5, donde el 0 es el mejor y el 5 es el peor. Luego se debe tomar en cuenta la tendencia que tendrán dichos criterios; para esto se hace una evaluación de 0, 1 o 2 (mejorando, estable, empeorando, respectivamente).

Ahora, aplicando la ecuación 1 se obtiene el peso mejorado para cada una de las variables del caso de estudio (figura 13).

Una vez obtenidos los valores de los pesos mejorados para cada una de las variables, se procede a aplicar

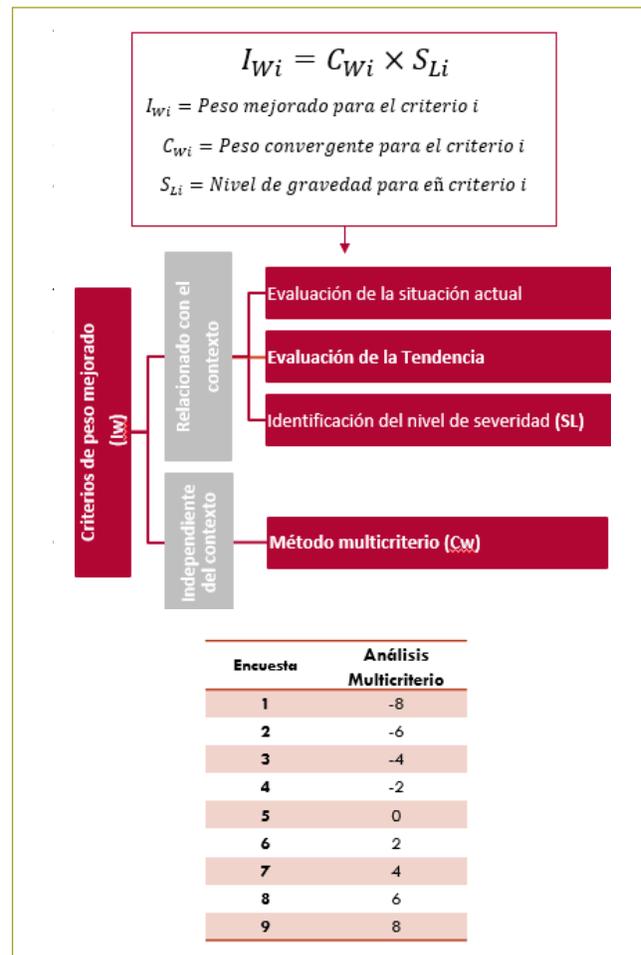


Figura 9. Reemplazos por análisis multicriterio.

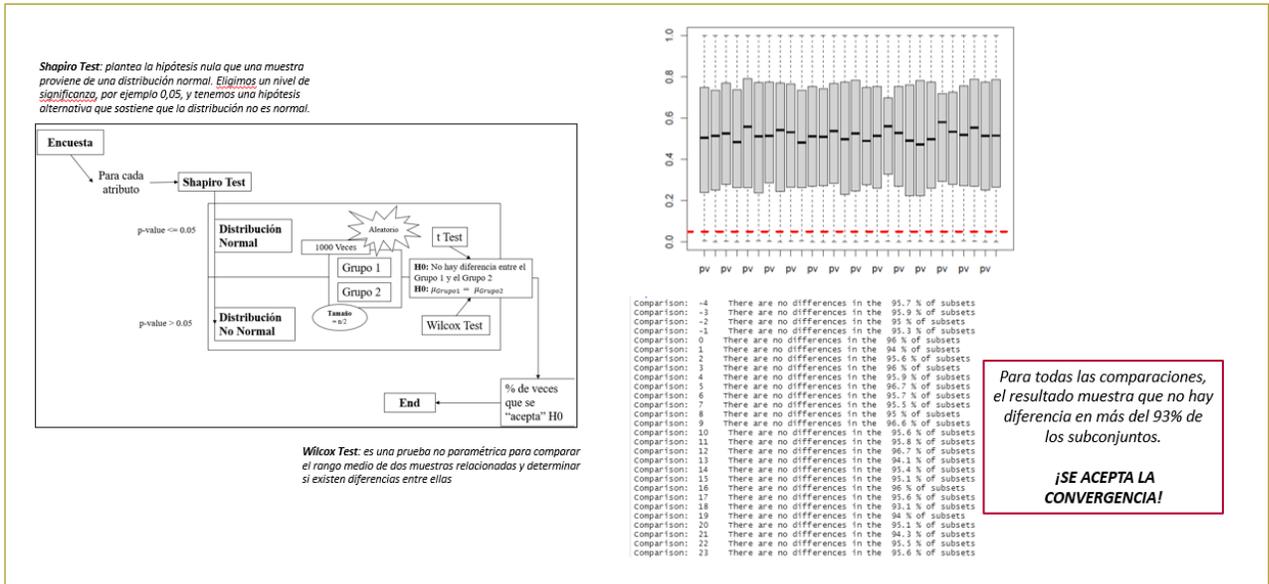


Figura 10. Resultados de software.

este valor a los datos tomados en campo, con la finalidad de identificar el corredor óptimo dentro de las opciones que se plantearon. Para esto, lo primero que se hace, teniendo en cuenta la información recolectada en campo y las bases de datos públicas, es tomar los valores más críticos para cada una de las variables en cada uno de los corredores planteados en la tercera etapa de este

proyecto y sacar la media de estos, con el objetivo de tener un valor estándar con el cual se puedan evaluar por igual todos los criterios.

Una vez obtenidos los valores debidamente estandarizados, se procede a multiplicar cada una de las variables por los pesos hallados en la etapa 4 del estudio. Más adelante se puede observar que para el caso de estudio

No.	Criterio	Valor	Valor Estandarizado
1	KPI_1	4,4163581	28,68753
2	KPI_2	2,4380273	15,836801
3	KPI_3	1,8114473	11,766698
4	KPI_4	1,4142136	9,186369
5	KPI_5	1,3459002	8,742623
6	KPI_6	2,1015133	13,650892
7	KPI_7	0,7071068	4,593184
8	KPI_8	1,1601294	7,535903

Variable	Criterio
KPI_1	Volumen HMD
KPI_2	Conexión Colegios
KPI_3	Conexión CC -Puntos de interés
KPI_4	Conexión PH
KPI_5	Acceso a TM
KPI_6	Acceso SITP
KPI_7	Estratificación
KPI_8	Usos del suelo

Figura 11. Peso de las variables.  
Fuente: Elaboración propia.

Points to assign to the PS of each attribute	Situación					
	0 point	1 point	2 points	3 points	4 points	5 points
Description	If the Ps for the attribute is considered to be Much better or moderately better than the average in the context	If the Ps for the attribute is considered to be Slightly better than the average in the context	If the Ps for the attribute is considered to be Similar to the average in the context	If the Ps for the attribute is considered to be Slightly worse than the average in the context	If the Ps for the attribute is considered to be Moderately worse than the average in the context	If the Ps for the attribute is considered to be Much worse than the context average
	4	0	4	0	1	1
	5	1	6	0	1	1
	0	1	1	0	1	1
	0	1	1	0	1	1
	3	0	3	0	1	1
	3	0	3	0	1	1
	2	1	3	0	1	1
	1	2	3	0	1	1

Figura 12. Nivel de gravedad  
Fuente: Elaboración propia.

**Figura 13.** Peso mejorado.

Fuente: Elaboración propia.

$$I_{Wi} = C_{Wi} \times S_{Li} \quad I_{wi}$$

KPI	C <sub>Wi</sub>	S <sub>Li</sub>	I <sub>wi</sub>
KPI_1	28,68753	4	114,75
KPI_2	15,836801	6	95,02
KPI_3	11,766698	1	11,77
KPI_4	9,186369	1	9,19
KPI_5	8,742623	3	26,23
KPI_6	13,650892	3	40,95
KPI_7	4,593184	3	13,78
KPI_8	7,535903	3	22,61

que nos ocupa, el corredor óptimo es el corredor 5 (figura 14).

Por medio del análisis y la metodología utilizada en este capítulo se logró concluir que la mejor opción para implementar un corredor peatonal es el corredor número 5, el cual va por toda la avenida carrera 70 hasta llegar a la calle 80, y allí sube por esta misma avenida hasta llegar a la Universidad Minuto de Dios.

**Figura 14.** Resultados finales

Fuente: Elaboración propia.

Corredor	HDM	COLEGIOS	CC	PH	TM	SITP	ESTRATO	SUELO	TOTAL
1	-48,157	-68,967	14,708	29,429	0,000	51,191	15,311	30,829	24,344
2	-66,043	137,933	14,708	-4,796	52,456	51,191	-11,483	-20,552	153,413
3	-50,450	107,282	14,708	-5,122	0,000	51,191	15,311	-20,552	112,368
4	-33,022	-30,652	0,000	-4,959	0,000	-28,439	15,311	-20,552	-102,314
5	376,080	130,270	14,708	-1,626	78,684	-22,751	-11,483	-20,552	543,329

*Nota: Se asignó signo positivo o negativo teniendo en cuenta si el valor de se encontraba por encima o por debajo de la media respectivamente.*

Corredor	HDM	COLEGIOS	CC	PH	TM	SITP	ESTRATO	SUELO
1	105	9	1	362	0	18	4	3
2	144	18	1	59	2	18	3	2
3	110	14	1	63	0	18	4	2
4	72	4	0	61	0	10	4	2
5	820	17	1	20	3	8	3	2
Media	250,2	12,4	0,8	113	1	14,4	3,6	2,2

*Valores críticos en los corredores propuestos*

Corredor	HDM	COLEGIOS	CC	PH	TM	SITP	ESTRATO	SUELO
1	-0,420	-0,726	1,250	3,204	0,000	1,250	1,111	1,364
2	-0,576	1,452	1,250	-0,522	2,000	1,250	-0,833	-0,909
3	-0,440	1,129	1,250	-0,558	0,000	1,250	1,111	-0,909
4	-0,288	-0,323	0,000	-0,540	0,000	-0,694	1,111	-0,909
5	3,277	1,371	1,250	-0,177	3,000	-0,556	-0,833	-0,909

*Valores diferenciales*

**Figura 15.** Valores críticos en los corredores propuestos y valores diferenciales.

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 16.** Corredor Óptimo - corredor 5.

Fuente: Elaboración propia.

## CONCLUSIONES

Con base en la ejecución, los resultados y el análisis del presente proyecto se puede concluir que hacer uso de métodos multicriterio permite, efectivamente, la interacción de las partes interesadas durante el proceso, aportando múltiples beneficios y garantizando que el proyecto en estudio va a satisfacer las necesidades de quienes harán uso de él. Adicionalmente, cuenta con una serie de ventajas como las siguientes:

- La sencillez y comprensibilidad, aspectos que facilitan la comprensión y el uso del método para las aplicaciones prácticas.
- La flexibilidad y la capacidad de replicación del método, debido a que se puede adaptar a diferentes aplicaciones y diferentes proyectos.
- La capacidad de aumentar la frecuencia, el rigor y la objetividad, que permite que los pesos asignados a cada una de las variables puedan tener la subjetividad del proceso y se puedan ajustar a diferentes criterios sostenibles del proyecto que se desee analizar.

Es importante tener presente que durante la ejecución del proyecto se identificaron aspectos relevantes que se deben evaluar antes de la aplicación del método, tomando en cuenta la ubicación del proyecto. Un ejemplo de esto es la zona de influencia que se aplicará para cada uno de los puntos de toma de información. Para el caso del presente estudio este valor fue de 500 metros, ya que como se mencionó, en la ciudad de Bogotá sería la distancia máxima que los peatones están dispuestos a recorrer. Pero si se llegara a desarrollar en alguna otra ciudad, con condiciones y culturas diferentes, se debería realizar un estudio previo que indicara cuál sería esta distancia, para poder obtener un resultado más confiable. Vale la pena aclarar que las variables que se utilizaron específicamente para este estudio fueron las que se consideraron adecuadas para el proyecto y para el entorno en el que se desarrollaría, pero esto no quiere decir que el método se encuentre atado a estas variables o que se deben usar las mismas para todos los estudios.

Finalmente, este estudio se puede complementar incluyendo a otros usuarios, como los modos motorizados y la congestión de la zona de estudio. Para este trabajo en particular se tuvo en cuenta solo al peatón.

## REFERENCIAS

- Antonini, G., Bierlaire, M., & Weber, M. (2006). Discrete choice models of pedestrian walking behavior. *Transportation Research Part B: Methodological*, 40(8), 667–687. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2005.09.006>
- Baltes, M. R., & Chu, X. (2002). Pedestrian level of service for midblock street crossings. *Transportation Research Record*, 1818, 125–133. <https://doi.org/10.3141/1818-19>
- BID (2020). Informe Anual 2020. *LXXXIII Asamblea General Ordinaria*, 337. <https://www.inditex.com/documents/10279/284661/INDITEX+IAR+2020.pdf/4c1023db-c4d0-a29d-e355-74afb-3f3c6a8>.
- CAF (2011). Desarrollo urbano y movilidad en América Latina. *Banco de desarrollo de América Latina (CAF)*.
- Gilbert, D. & Stoner, J. (1996). Administración. *Neonatology*, 62(6), 424–426. <https://doi.org/10.1159/000327435>
- Herce, M. (2009). *Sobre la movilidad en la ciudad*, 26. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-84212015000100004](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-84212015000100004)
- Jirón, P. (2015). La movilidad como oportunidad para el desarrollo urbano y territorial. *La Ciudad que Queremos*, 46–61.
- Leinberger, C., & Alfonzo, M. (2012). Walk this way: the economic promise of places in Metropolitan Washington. *Metropolitan Policy Program at Brookings*, May, 1–21.
- Litman, T. (2003). Measuring Transportation: Traffic, Mobility and Accessibility three approaches to measuring transportation evaluate motor person and freight the ability of people and businesses to reach perspective supports Transportation and connections among modes an. *ITE Journal*, October, 28–32.
- Mcfadden, D. (1974). The Measurement of Travel Demand. *Journal of Public Economics*, 3, 303–328.
- OMS (2018). *Nuevo informe de la OMS destaca que los progresos han sido insuficientes en abordar la falta de seguridad en las vías de tránsito del mundo*. [https://www3.paho.org/hq/index.php?option=com\\_content&view=article&id=14857:news-who-report-highlights-insufficient-progress-to-tackle-lack-of-safety-on-the-world-s-roads&Itemid=1926&lang=es](https://www3.paho.org/hq/index.php?option=com_content&view=article&id=14857:news-who-report-highlights-insufficient-progress-to-tackle-lack-of-safety-on-the-world-s-roads&Itemid=1926&lang=es).
- Pikora, T., Giles-Cortia, B., Bulla, F. & Jamrozika, K. (2009). Developing a framework for assessment of the environmental determinants of walking and cycling. *The University of Western Australia*, 57(SUPPL. 1), 49–57.
- Speck, J.-T. (2013). *The walkable city*. [https://www.ted.com/talks/jeff\\_speck\\_the\\_walkable\\_city](https://www.ted.com/talks/jeff_speck_the_walkable_city).
- Tournier, I., Dommès, A., & Cavallo, V. (2016). Review of safety and mobility issues among older pedestrians. *Accident Analysis and Prevention*, 91, 24–35. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2016.02.031>.



# Diagnóstico de la planta de tratamiento de agua potable San Antonio-Santa Bárbara del municipio de Arbeláez (Cundinamarca)

## Evaluation of the San Antonio Santa Bárbara Water Treatment Plant of Arbeláez (Cundinamarca)

ELKIN DANIEL HUERTAS DAZA<sup>1</sup> – JAIRO ALBERTO ROMERO ROJAS<sup>2</sup>

1. Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente de la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

2. Ingeniero civil. MEEE. Profesor titular de la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

elkin.huertas@mail.escuelaing.edu.co - jairo.romero@escuelaing.edu.co

Recibido: 02/06/2022 Aceptado: 30/06/2022

Disponible en [http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones\\_revista](http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista)  
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

### Resumen

En este artículo se presentan el diagnóstico y las propuestas de optimización de la PTAP, teniendo en cuenta los resultados de la evaluación realizada [1].

**Palabras claves:** PTAP, agua potable, tratamiento de agua.

### Abstract

This article presents the diagnostic and optimization proposals of the WTP, considering the results of the evaluation performed [1].

**Keywords:** WTP, water treatment, drinking water.

## INTRODUCCIÓN

El municipio de Arbeláez (Cundinamarca) cuenta actualmente con una planta de tratamiento de aguapotable (PTAP) en el casco urbano y con 20 acueductos veredales, entre los cuales se encuentra el acueducto San Antonio-Santa Bárbara al que se hace referencia en la presente investigación. Esta planta se diseñó para tratar un caudal de 9,05 L/s, con una proyección futura hasta el año 2028. De acuerdo con la información suministrada [2], el sistema actual corresponde a un sistema convencional que consta de bandejas de aireación, canal de interconexión, floculador hidráulico de flujo horizontal, sedimentador de alta tasa, filtración rápida y tanque de almacenamiento.

## METODOLOGÍA

Se analizaron las dimensiones de cada una de las estructuras y se verificaron los parámetros de operación correspondientes para el caudal y el horizonte para el

cual se construyó la planta de tratamiento, de 9,05 L/s. Se verificó el cumplimiento de los parámetros calculados, en comparación con los criterios establecidos en el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS 2000 [3], título C; Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria [6]; Resolución 0330 de 2017 [4]; Resolución 0799 de 2021 [5], y Resolución 2115 de 2007 [7].

## RESULTADOS

La PTAP cuenta con un tren de tratamiento que consta de bandejas de aireación, mezcla rápida con canaleta Parshall, floculador hidráulico de flujo horizontal, sedimentador de alta tasa, filtro rápido y tanque de almacenamiento. Se determinó que el sistema no cuenta con desinfección y el filtro carece de medios filtrantes.

A continuación se presentan los resultados del diagnóstico para las estructuras existentes (tablas 1 a 6).

**Tabla 1**  
Diagnóstico de aireador de bandejas

Parámetro	Unidad	Resultado	Valor de referencia [4]	Observación
Número bandejas	unidades	4	3 - 9 bandejas	Cumple Res. 0799
Distancia entre bandejas	m	0,2	0,3 - 0,5 m	No cumple Res. 0799
Profundidad de bandeja	m	0,2	0,2 - 0,25 m	Cumple Res. 0799
Altura total	m	1,6	1,2 - 3 m	Cumple Res. 0799
Carga hidráulica	m/d	100	500 - 1500 m/d	Cumple Res. 0799
Espesor de lecho de contacto	m	0,15	0,15 - 0,20 m	Cumple Res. 0799
Material de lecho de contacto	-	Coque	Coque, carbón activado, ladrillo triturado, cerámica, resinas de intercambio iónico	Cumple Res. 0799

**Tabla 2**  
Diagnóstico de mezcla rápida

Parámetro	Unidad	Resultado	Valor de referencia [2]	Observación
ho/W		2,33	0,4-0,8	No cumple.
Valor de V1 para iteración	m/s	1,84	>2	No cumple
Número de Froude (F1)		2,32	1,7-2,5	Cumple
Velocidad agua sección de salida	m/s	0,12	> 0,75	No cumple
Tiempo de mezcla (s)	s	0,31	< 1 s	Cumple
Gradiente de velocidad	s <sup>-1</sup>	1347	1000-2000 s <sup>-1</sup>	Cumple

El aireador de bandejas no satisface el valor de referencia para la distancia entre bandejas, pero se considera aceptable para el tratamiento del agua.

Cumple además parámetros importantes, como el número de Froude, el tiempo de mezcla y el gradiente, por lo que se puede considerar que el sistema de aforo y mezcla rápida es adecuado.

Para la optimización del floculador hidráulico de flujo horizontal se propone dividir el floculador existente en tres zonas, con ancho de canales de 9, 10 y 11 cm, respectivamente.

La zona de sedimentación cumple tanto con los parámetros de las resoluciones 0330 y 0799, y el RAS 2013; por tanto, no se requiere optimización (tabla 4).

**Tabla 3**  
Diagnóstico floculador hidráulico de flujo horizontal

Parámetro	Unidad	Resultado	Valor de referencia [2], [4]	Observación
Número de zonas	unid	1	3	No cumple Resolución 0330
Profundidad del agua	m	0,85	1-2	No cumple RAS 2000
Ancho de canales	m	0,175	-	-
Ancho en los giros	m	0,13	1,5a	-
Velocidad del flujo	m/s	0,06	0,1-0,6	-
Tiempo de retención	min	39	20 - 40	Cumple Res. 0799
Gradiente	s <sup>-1</sup>	9	10-70 s <sup>-1</sup>	No cumple resoluciones 0330 y 0799

**Tabla 4**  
Diagnóstico sedimentador de alta tasa

Parámetro	Unidad	Resultado	Valor de referencia [2], [4]	Observación
Espesor de la placa	m	0,008	8-10	Cumple con RAS 2000
Separación entre placas o ancho de canal	m	0,05	0,05	Cumple con RAS 2013
Longitud de acceso	m	0	Espacio mínimo para operación	No cumple con Res. 0799
Tiempo de retención	min	11,33	(10-15)	Cumple con RAS 2000
Ángulo de inclinación	°	60	45-60°	Cumple con RAS 2000
Carga hidráulica superficial	m/d	132	120-185	Cumple con Res. 0799
Número de Reynolds	-	87	<500	Cumple con Res. 0799
Velocidad crítica de sedimentación	m/d	12,4	15-30	Cumple con Res. 0799
Velocidad crítica de sedimentación	cm/min	0,86	15-30	Cumple con Res. 0799

**Tabla 5**  
Diagnóstico filtro rápido

Parámetro	Unidad	Resultado	Valor de referencia [3], [5]	Observación
Número de filtros	unid	1	>3	No cumple Res. 0799
Tasa de filtración	m/d	54,52	180 - 350 m/d	Cumple Res. 0799
Profundidad del medio filtrante	m	No cuenta con medio	Arena 0,15 - 0,3 m y antracita 0,4 - 0,6 m	No existe

El filtro tiene capacidad de abastecer caudales superiores al de diseño, pero requiere dotación del medio filtrante.

Se propone la instalación de tres baffles dentro del tanque existente, con el fin de favorecer que el sistema funcione a flujo en pistón.

El tren de tratamiento no cuenta con un sistema para el tratamiento de los lodos generados, motivo por el cual se propone un sistema de tratamiento de lodos mediante lagunas de secado de lodos. Los resultados se presentan más adelante (tabla 7).

**Tabla 6**  
Diagnóstico Tanque de almacenamiento y contacto

Parámetro	Unidad	Resultado	Valor de referencia [3], [5]	Observación
Volumen del tanque	m <sup>3</sup>	77	-	-
Tiempo de retención	min	142	>20	Cumple Res. 799

**Tabla 7**  
Resultados diseño de lagunas de secado

Parámetro	Unidad	Resultado	Valor de referencia [5]
Carga de sólidos	kg/m <sup>2</sup> d	40	-
Número de lagunas	unid	2	2
Profundidad de las lagunas	m	1,2	(0,5-1,2)
Coagulante consumido	kg/d	47	-
Lodo seco	kg/d	12	-
Lodo húmedo	kg/d	1220	-
Caudal Lodo húmedo	m <sup>3</sup> /d	1,2	-
Área de cada laguna	m <sup>2</sup>	180	-
Volumen de cada laguna	m <sup>3</sup>	216	-
Ancho de cada laguna	m	12	-
Longitud de cada laguna	m	15	-

## CONCLUSIONES

- La planta posee la capacidad hidráulica y estructural suficiente para satisfacer la demanda y el caudal para el que se diseñó.
- Se debe dotar a la PTAP de sala de cloración, así como del tratamiento de lodos.
- Es necesario proveer el medio de filtración para el filtro rápido existente.

## REFERENCIAS

Cepis (1992). *Criterios de diseño para filtros. Manual V*, tomo III. Cepis.  
Huertas, E.D. (2023, enero). *Diagnóstico de la planta de tratamiento de agua potable San Antonio-Santa Bárbara, del municipi-*

*pio de Arbeláez (Cundinamarca)*. Trabajo de grado. Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.  
Liévano, A.V. (2013). *Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico. Título C. Sistemas de potabilización*, (pp. 180-320). Ministerio de Vivienda.  
MVCT. Resolución 0330, pp. 61-81, 08 06 2017.  
MVCT. Resolución 0799 de 2021, pp. 27-38.  
MPS y MVD. Resolución 2115 de 2007, pp. 2-17.  
Rivas, W. y Bravo, G. (2015). *Potabilización del agua. Principios de diseño, control de procesos y laboratorio*, (1.ª ed. vol. 1, pp. 90-95). En F.S. Sánchez y A.C. Vivas (eds.). Bogotá, D.C: Universidad Piloto de Colombia.  
Valencia, J. (1992). *Teoría y práctica de la purificación del agua* (2.ª ed., pp. 108-576). En M.G. Hill (ed.). Gainesville, Florida: Asociación Colombiana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (Acodal).  
Vélez, L. y Quevedo, K. (2020). *Estudio de las condiciones actuales y propuesta de mejoramiento del acueducto veredal de Quebrada de Oros en el municipio de Arbeláez (Cundinamarca)*. (pp. 22-65). Universidad Piloto de Colombia.

# Solución de alternativa de tratamiento de aguas residuales para el municipio de Mesetas, departamento del Meta

## Alternative solution for wastewater treatment in the municipality of Mesetas, Department of Meta

MANUEL SALAZAR CUEVAS<sup>1</sup> - JAIRO ALBERTO ROMERO ROJAS<sup>2</sup>

1. Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Ingeniería Ambiental de la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería, Julio Garavito.

2. Ingeniero Civil. MEEE. Profesor titular de la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

manuel.salazar@mail.escuelaing.edu.co - jairo.romero@escuelaing.edu.co

Recibido: 10/06/2022 Aceptado: 12/07/2022

Disponible en [http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones\\_revista](http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista)  
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

### Resumen

El municipio de Mesetas (Meta), con una población de 5616 habitantes para el año 2022 y de 8485 habitantes para el periodo de diseño, año 2049, no cuenta con un sistema de tratamiento de aguas residuales, su vertimiento de aguas servidas se descarga directamente al río Güejar, fuente hídrica con excelentes condiciones ambientales, utilizada en la actualidad para actividades turísticas y practicar deportes como rafting y kayak.

En este artículo se presenta el análisis de cinco opciones de tratamiento que permitan al municipio cumplir con los requerimientos exigidos en los objetivos de calidad para el río Güejar. Los sistemas de tratamiento analizados son tecnologías que logran eficiencias en remoción de carga de DBO, DQO y SST superiores al 95 %.

Las alternativas evaluadas son las siguientes:

- **Alternativa 1.** Filtros percoladores (FP) + desinfección y manejo de lodos con lechos de secado.
- **Alternativa 2.** Lodos activados + desinfección y manejo de lodos con lechos de secado.

- **Alternativa 3.** Reactor anaerobio de flujo ascendente (RAFA o UASB) + reactor anaerobio de flujo pistón (RAP) + sedimentación secundaria + desinfección y manejo de lodos con lechos de secado.
- **Alternativa 4.** Reactor anaerobio de flujo ascendente (RAFA o UASB) + lodos activados + desinfección y manejo de lodos con lechos de secado.
- **Alternativa 5.** Lagunas de estabilización.

**Palabras claves:** tratamiento de aguas residuales, filtros percoladores, lodos activados, UASB, RAP, lagunas de estabilización.

### Abstract

The Municipality of Mesetas, with a population of 5,616 habitants for the year 2022 and 8,485 habitants for the design period (2049) does not have a wastewater treatment system, its sewage discharged directly into the Güejar river, a water source with excellent environmental conditions currently used for tourist activities and sports such as rafting and kayaking.

This article presents the analysis of five treatment alternatives that allow the municipality to reach the requirements of the quality objectives for the Güejar River. The treatment systems analyzed are technologies that achieve efficiencies in BOD, COD and TSS load removal of over 95%.. The alternatives evaluated are:

- **Alternative 1:** Trickling filters (TF) + disinfection and sludge management with drying beds.
- **Alternative 2:** Activated Sludge + disinfection and sludge management with drying beds.
- **Alternative 3:** Upflow anaerobic sludge blanket (UASB) + Anaerobic Plug Flow Reactor (AnPFR) + secondary sedimentation + disinfection and sludge management with drying beds.
- **Alternative 4:** Upflow anaerobic sludge blanket (UASB) + Activated Sludge + disinfection and sludge management with drying beds.
- **Alternative 5:** Stabilization ponds.

**Keywords:** wastewater treatment, trickling filters, activated sludge, UASB, AnPFR, stabilization ponds.

## INTRODUCCIÓN

En el Plan Nacional de Desarrollo (PND) 2019-2022, al igual que en los objetivos estratégicos planteados por el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (MVCT), se busca alcanzar el tratamiento del 54,3 % de las aguas residuales urbanas en 2022 y el 68,6 % en 2030, en el marco de los compromisos adquiridos por el país en el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

Es ineludible que en la formulación de proyectos para el tratamiento de las aguas residuales domésticas municipales se efectúe un análisis minucioso de las aguas residuales y del diseño de cada una de las estructuras que hay que construir, el cual se debe hacer en un contexto integral del manejo del recurso hídrico, considerando aspectos de viabilidad técnica, económica, ambiental e institucional, de tal manera que el sistema de tratamiento

que se haya seleccionado se pueda implementar exitosamente y se garantice su sostenibilidad.

El proceso de diseño de la planta de tratamiento de agua residual (PTAR) contempla el dimensionamiento y análisis de alternativas para evaluar y comparar varias soluciones, con el fin de escoger la más conveniente para realizar el diseño definitivo.

## METODOLOGÍA

Las cinco alternativas se analizan y evalúan mediante el diagnóstico del municipio, en el cual se establecen los parámetros de diseño, caudales, constituyentes de entrada y salidas del sistema, ubicación del sistema y áreas disponibles (diagrama 1).

Una vez establecidos los parámetros de diseño, se hacen los dimensionamientos de las cinco alternativas, teniendo en cuenta cada uno de los componentes de los sistemas, de acuerdo con el diagrama siguiente (diagrama 2).

## RESULTADOS

Para el dimensionamiento de un sistema de tratamiento de agua residual doméstica, se deben tener en cuenta los caudales contemplados a continuación (tabla 1).

Para el diseño de las plantas de tratamiento de aguas residuales se deben usar datos históricos de factores máximos del área de influencia del proyecto, de plantas de tratamiento de aguas residuales similares en tamaño y condiciones, o en su defecto, emplear los factores pico de la tabla siguiente (tabla 2).



**Foto 1.** Vertimiento de las aguas residuales al río Güejar.

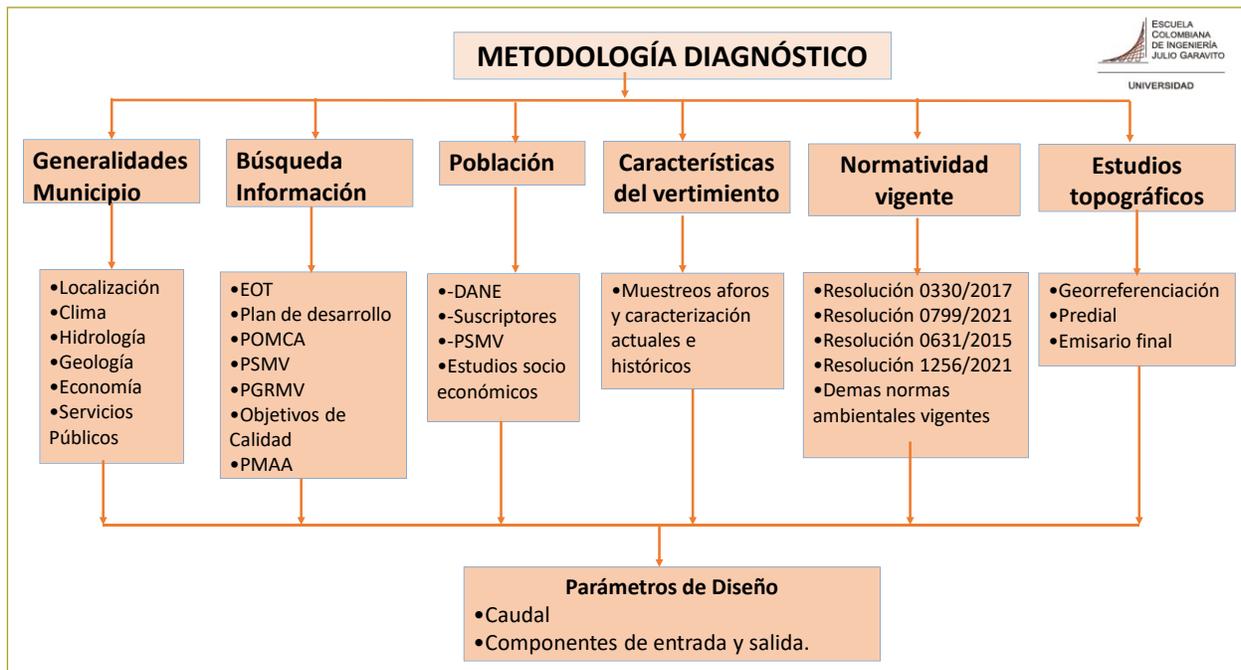


Diagrama 1. Metodología de diagnóstico.

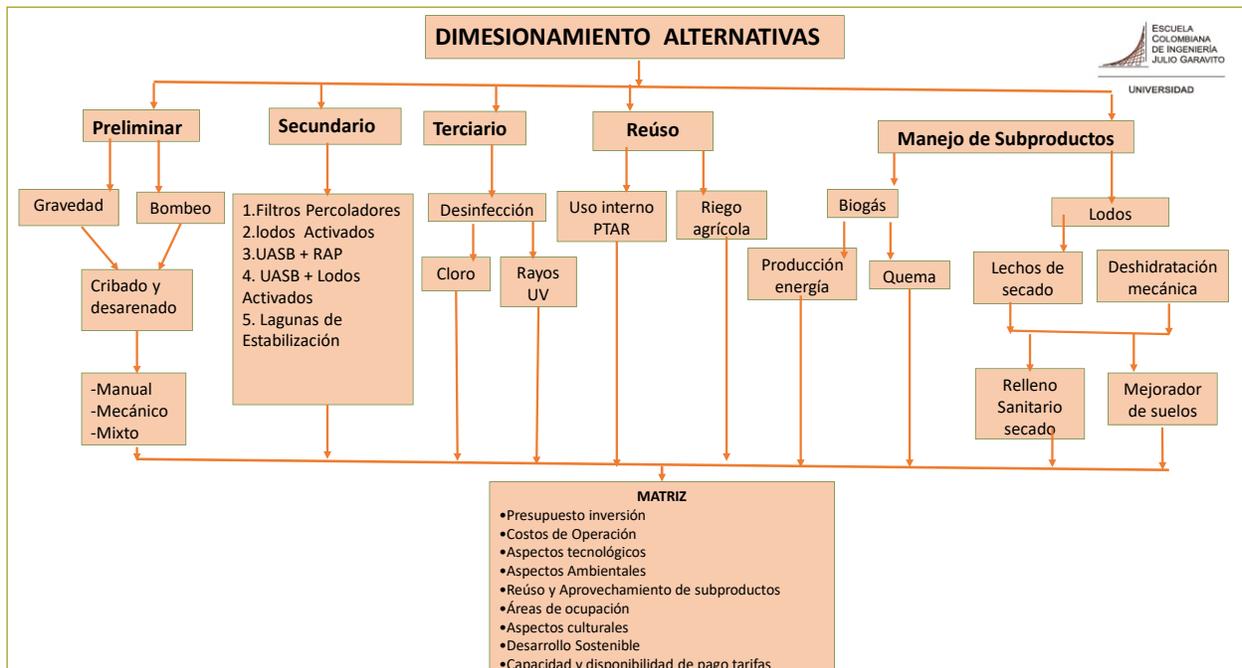


Diagrama 2. Metodología Fase de Alternativas

**Tabla 1**  
Caudales de diseño para PTAR con caudales superiores a 30 L/s.

Caudal	Descripción	Aplicación
Caudal medio de diseño	Caudal medio diario de capacidad de la PTAR	Caudal de referencia Caudal de diseño de unidades de tanques sépticos Sistemas lagunares
Caudal máximo horario	Máximo volumen en una hora, identificado en los registros estudiados	Dimensionamiento de sistemas de bombeo, procesos físicos (desarenadores, cribados, trampas de gras y sedimentadores primarios y secundarios) Desarrollo de estrategias operativas Conductores de interconexión de unidades de proceso
Caudal máximo diario	Máximo volumen en un día identificado en los registros estudiados	Dimensionamiento de tanques de regulación Dimensionamiento de sistemas de bombeo de lodos Dimensionamiento de dosificación química
Caudal máximo MENSUAL	Máximo volumen en un mes, identificado en los registros estudiados	Dimensionamiento de biorreactores Dimensionamiento del almacenamiento de químicos.

Fuente: Resolución 0799 de 2021.

**Tabla 2**  
Factores pico para caudales de tratamiento de aguas residuales

Rango de caudales medios (L/s)	Factor máximo horario	Factor máximo diario	Factor máximo mensual
0-10	4	3	1,7
Los valores de los factores máximos horario, diario y mensual para caudales entre 10 y 90 L/s se interpolan linealmente			
90	2,9	2,1	1,5
Los valores de los factores máximos horario, diario y mensual para caudales entre 90 L/s y 700 L/s se interpolan linealmente.			

Fuente: Resolución 799 de 2021.

Según lo definido en el numeral 3° del artículo 134 de la Resolución 799, únicamente el caudal medio de diseño en tiempo seco será afectado por el factor pico (definido en la tabla 2), más un caudal de infiltración.

Los presupuestos de inversión de las alternativas dimensionadas, analizadas y evaluadas se cuantifican con base en los precios establecidos por la Empresa de Servicios Públicos del Meta (Edesa S.A., ESP).

#### Parámetros de diseño

Población diseño:	8.485 Hab
Caudal medio diario (2049):	14,00 L/s
Caudal máximo mensual (2049):	35,07 L/s
Caudal máximo horario (2049):	47,08 L/s
Caudal máximo diario (2049):	35,74 L/s
Fuente de Vertimiento:	Río Güejar
DBO Afluente:	288 mg/L
DQO Afluente:	798 mg/L
SST Afluente:	119 mg/L
DBO Efluente:	15 mg/L
DQO Efluente:	30 mg/L
SST Efluente:	25 mg/L

**Alternativa 1.** Tratamiento preliminar, filtros percoladores, sedimentación, desinfección, manejo de lodos con espesamiento y lechos de secado (figuras 1 y 2).

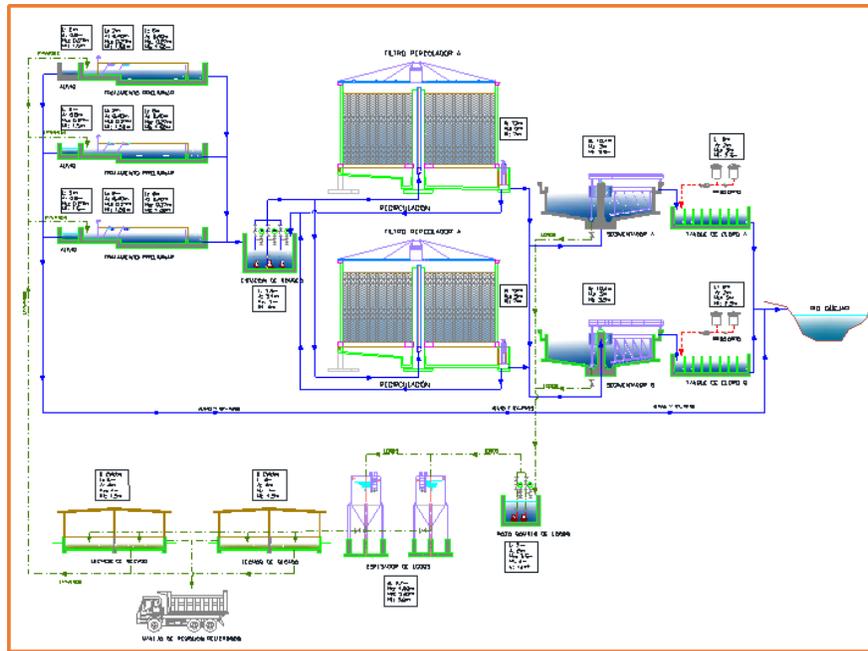


Figura 1. Diagrama de flujo de la alternativa 1. Filtro percolador.

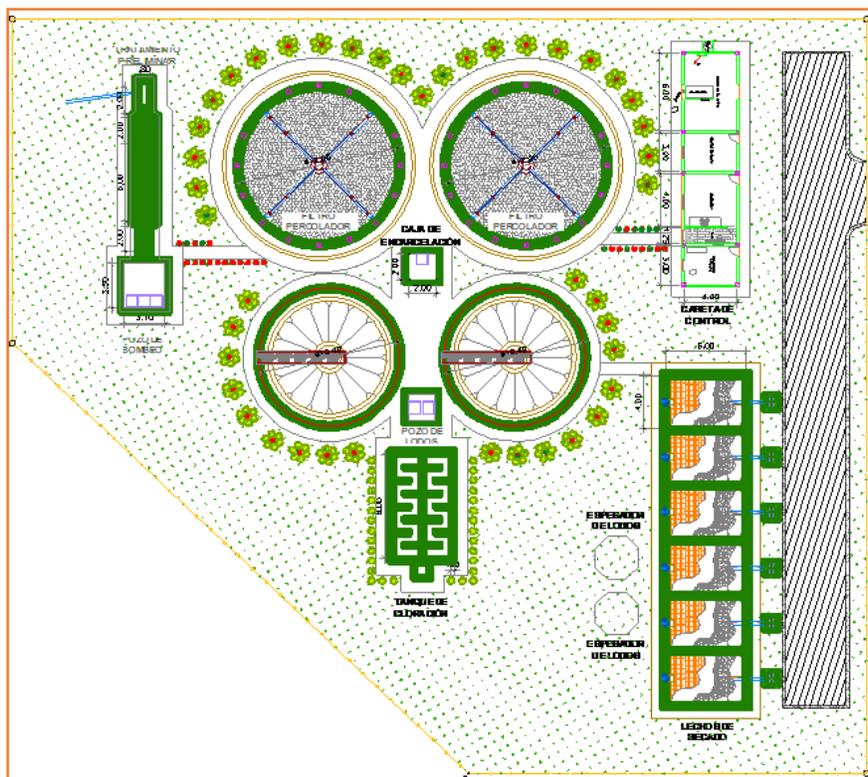


Figura 2. Implantación de la alternativa 1. Filtro percolador.

**Alternativa 2.** Tratamiento preliminar, lodos activados, sedimentación, desinfección, manejo de lodos con espesamiento y lechos de secado (figuras 3 y 4).

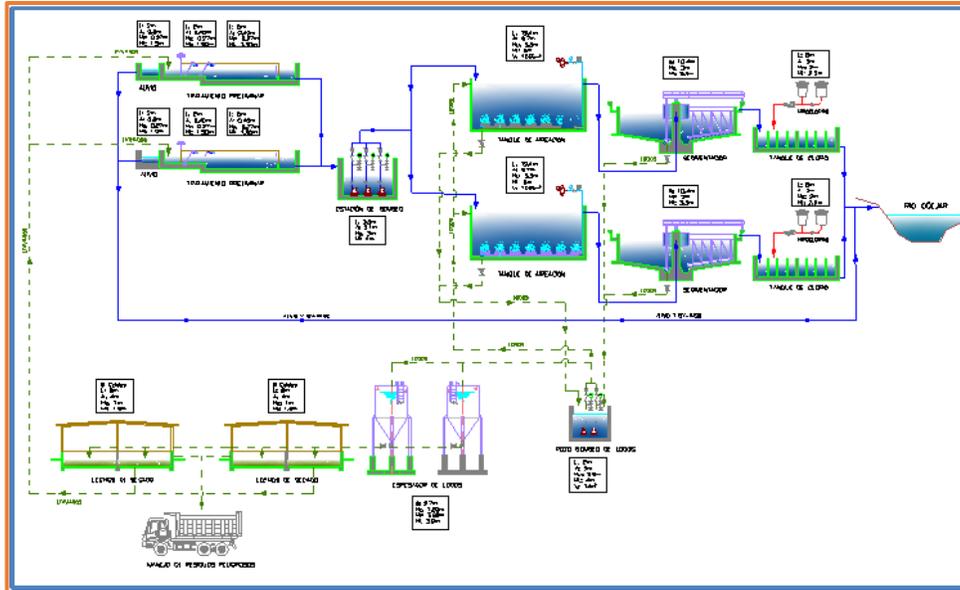


Figura 3. Diagrama de flujo de la alternativa 2. LAC.

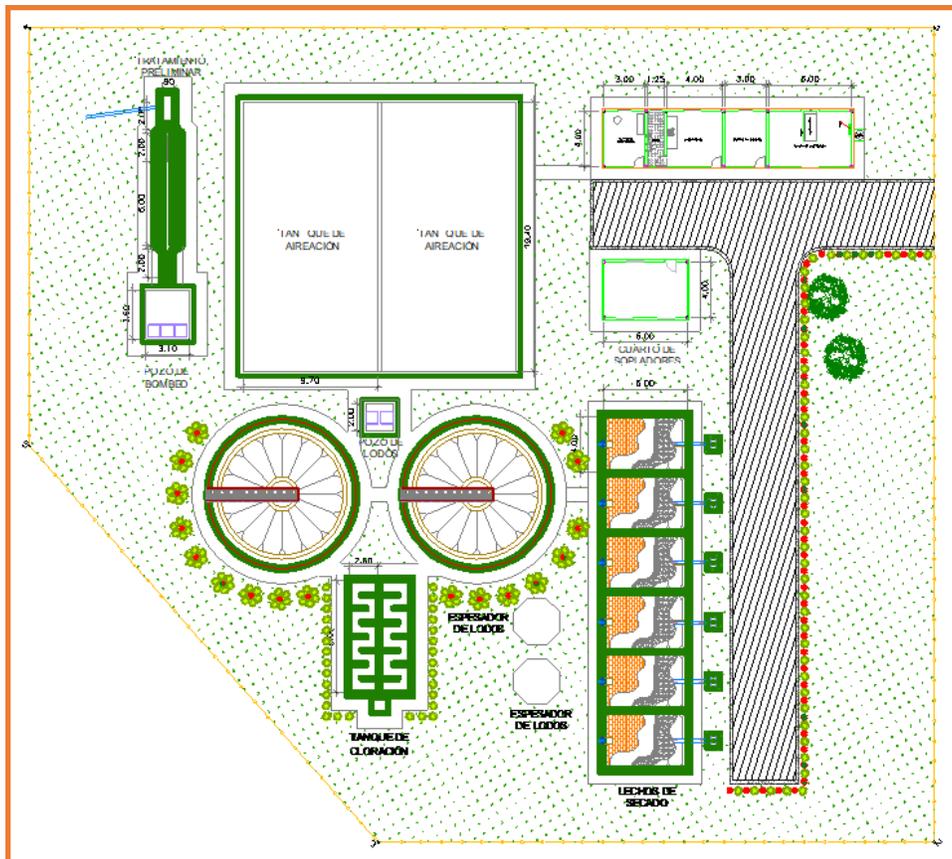


Figura 4. Implantación de la alternativa 2. LAC.

**Alternativa 3.** Tratamiento preliminar, UASB + RAP, sedimentación, desinfección, manejo de lodos con lechos de secado (figuras 5 y 6).

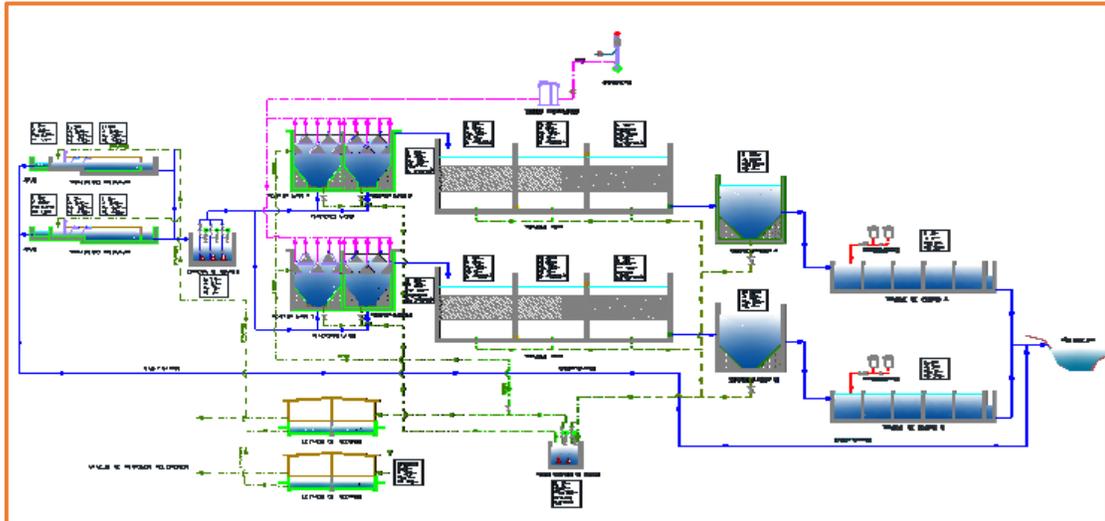


Figura 5. Diagrama de flujo alternativa 2. UASB + RAP.

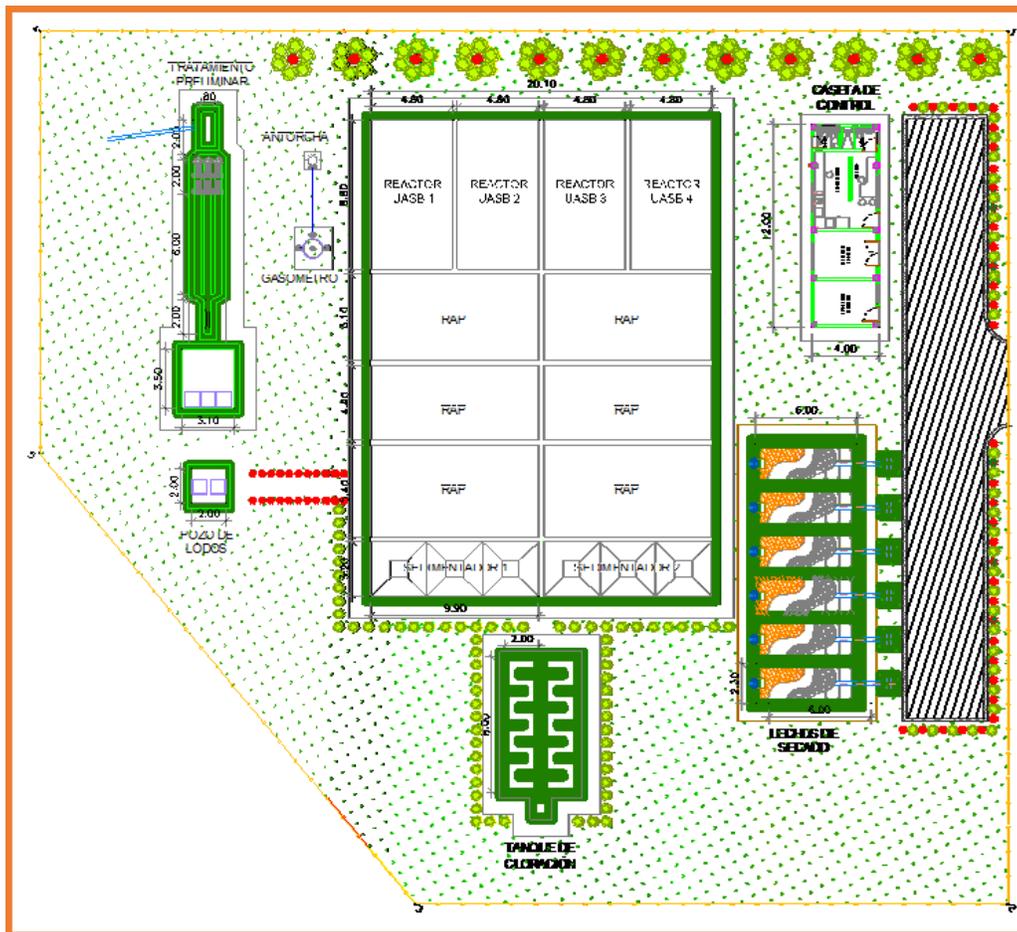


Figura 6. Implantación de la alternativa 3. UASB + RAP.

**Alternativa 4.** Tratamiento preliminar, UASB + LAC, sedimentación, desinfección, manejo de lodos con espesamiento y lechos de secado (figuras 7 y 8).

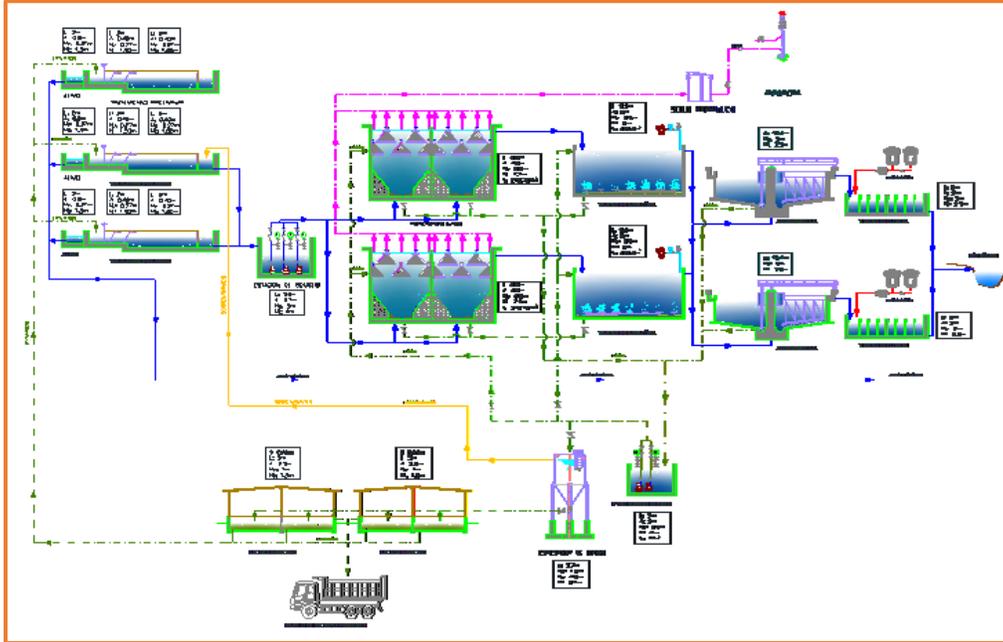


Figura 7. Diagrama de flujo de la alternativa 4. UASB + LAC.

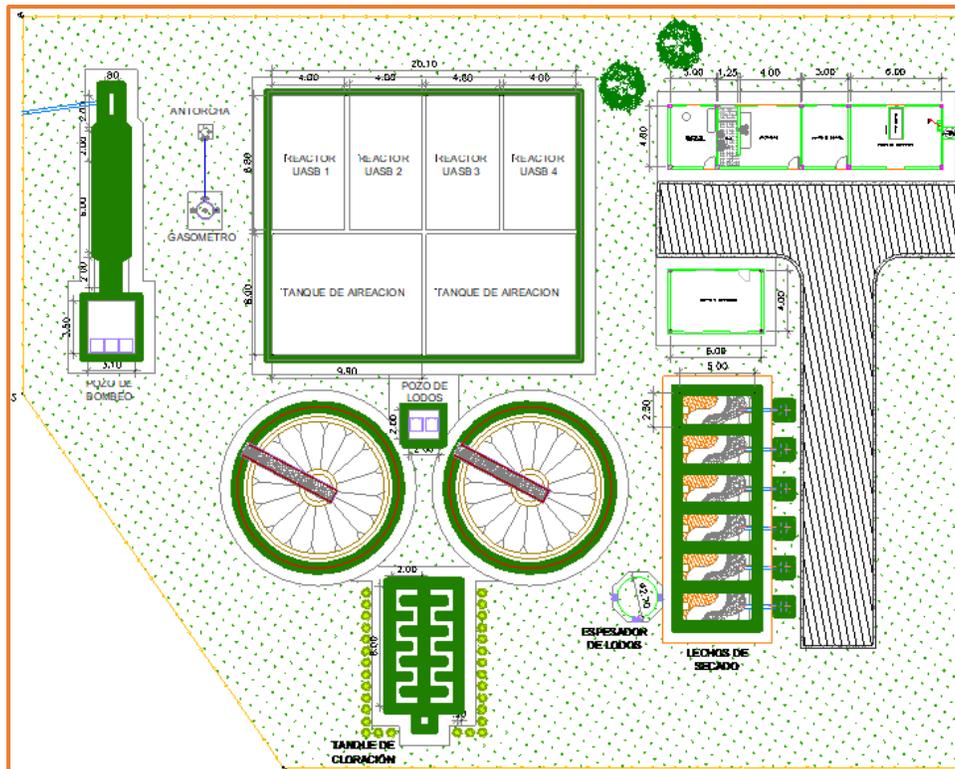
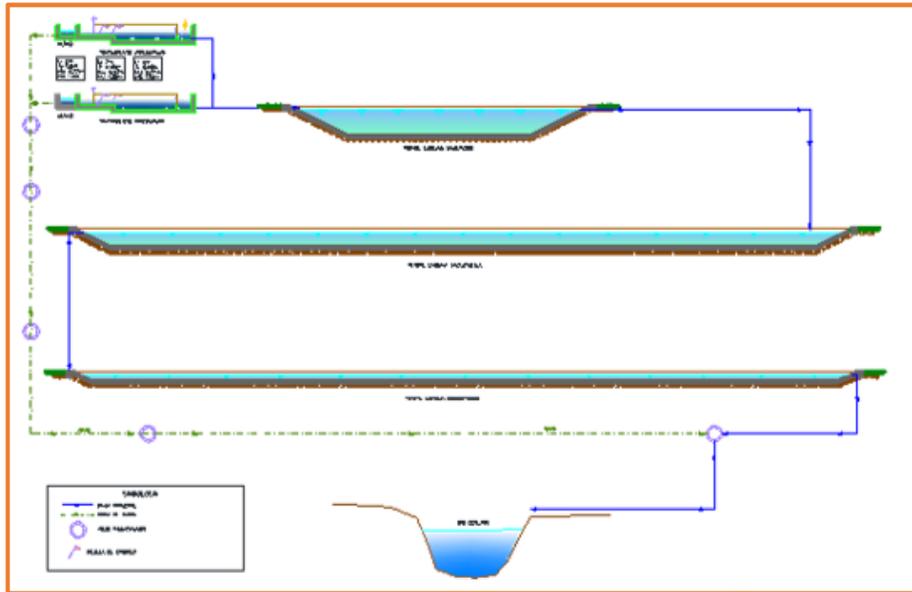
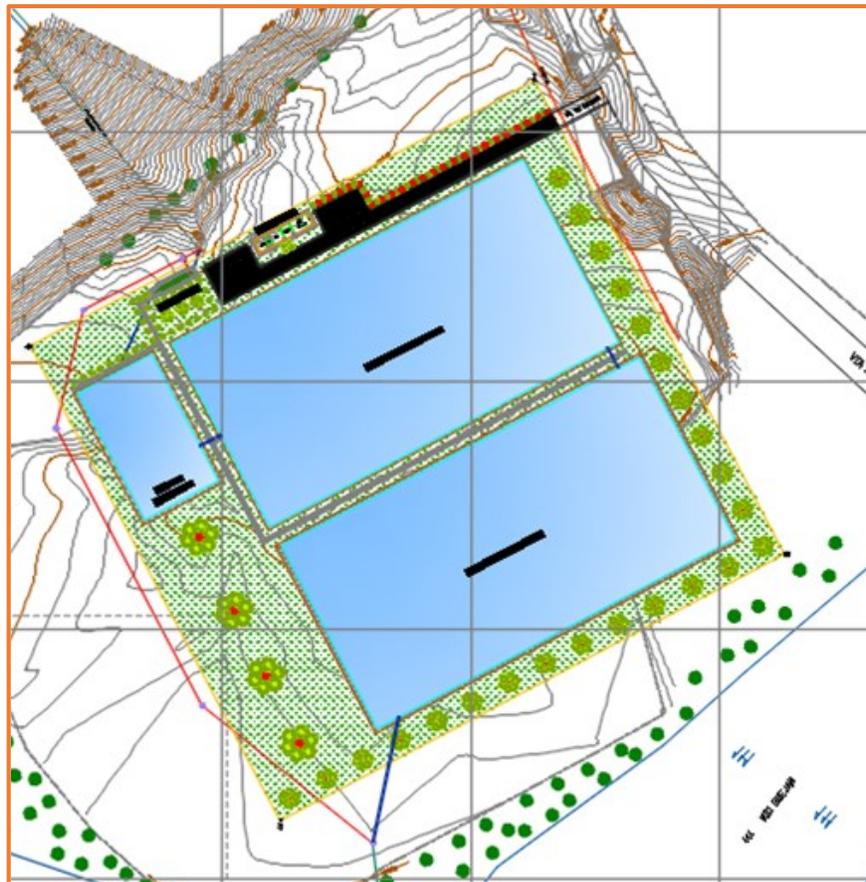


Figura 8. Implantación de la alternativa 4. UASB + LAC.

**Alternativa 5.** Tratamiento preliminar en lagunas de estabilización (figuras 9 y 10).



**Figura 9.** Diagrama de flujo de la alternativa 5. Lagunas de estabilización.



**Figura 10.** Implantación de la alternativa 5. Lagunas de estabilización.

Los planos de implantación, para tener en cuenta estructuras adicionales como casetas de administración y operación, cerramientos y zonas verdes de aislamiento, permiten determinar el área de ocupación de cada sistema de tratamiento.

### Resumen de áreas

Alternativa 1. (Filtro percolador FP)	Área 3174 m <sup>2</sup>
Alternativa 2 (Lodos activados LAC)	Área 3450m <sup>2</sup>
Alternativa 3. (UASB + RAP)	Área 2655 m <sup>2</sup>
Alternativa 4 (UASB + LAC)	Área 2877 m <sup>2</sup>
Alternativa 5 (Lagunas de estabilización LAG-EST)	Área 27.781 m <sup>2</sup>

A renglón seguido se presenta el resumen de las dimensiones de cada una de las unidades de cada alternativa (tablas 3 y 4).

En la tabla 5 se presentan los presupuestos para cada una de las cinco alternativas.

**Tabla 3**  
Resumen de las unidades de proceso para las alternativas 1,2,3 y 4

DISEÑO GENERAL								
MUNICIPIO DE MESETAS META								
RESUMEN DIMENSIONAMIENTO ALTERNATIVAS								
ESTRUCTURA	CANT.	DIAM (m)	LONGITUD (m)	ANCHO (m)	ALTURA CÓNICA (m)	AITURA UTIL (m)	ALTURA TOTAL (m)	VOLUMEN (m3)
<b>TRATAMIENTO PRELIMINAR</b>								
Cámara de alivio	1,00		2,00	1,00		0,50	1,50	
Canal de rejillas	3,00		2,00	0,40		0,27	1,50	
Desarenador	3,00		6,00	0,40		0,27	1,50	
Pozo de bombeo inicial	1,00		3,50	3,10		3,00	4,00	32,55
<b>PROCESO SECUNDARIO</b>								
Filtro percolador	2,00	13,00				5,00	7,00	
TK lodos activados	2,00		19,40	9,70		5,50	6,00	1034,99
UASB	4,00		8,80	4,80		6,60	7,10	278,78
RAP1	2,00		9,90	5,10		3,50	5,00	176,72
RAP2	2,00		9,90	4,40		3,50	5,00	152,46
RAB 3	2,00		9,90	5,40		3,50	5,00	187,11
TK lodos activados Con UASB	2,00		9,90	8,00		5,50	6,00	435,60
<b>SEDIMENTACION</b>								
Sedimentador FP, LAC, UASB + LAC	2,00	10,40				3,00	3,50	255,00
Sedimentación UASB + RAP	2,00		9,90	3,20		3,50	4,00	110,88
<b>CLORACIÓN</b>								
Tanque contacto de cloro	2,00		8,00	2,00		2,00	2,30	16,00
<b>MANEJO DE LODOS</b>								
Pozo de lodos	1,00		2,00	2,00		3,50	4,00	14,00
<b>ESPEZAMIENTO</b>								
Espesador de lodos FP y LAC	2,00	2,70			1,80	3,60	3,90	13,74
Espesador de lodos UASB + LAC	1,00	2,70			1,80	4,80	5,10	20,61
<b>LECHOS DE SECADO</b>								
FP y LAC	6,00		6,00	4,00		1,00	1,50	72,00
UASB + RAP	6,00		6,00	2,30		1,00	1,50	41,40
UASB + LAC	9,00		5,00	2,30		1,00	1,50	51,75

**Tabla 4**  
Resumen de las dimensiones de lagunas de estabilización

<b>Dimensiones de las Lagunas.</b>				
		Anaerobia	Facultativa	Maduración
Número de lagunas		1	1	1
Profundidad agua h (m)		4,0	2,5	1,0
Borde libre b (m)		0,5	0,5	0,5
Profundidad total h (m)		4,5	3,0	1,5
Área media total (m <sup>2</sup> )		0,0605	0,6473	0,7256
Rel. Largo / ancho		2,0	2,0	2,0
Talud (1/n)		2,0	2,0	2,0
Área / laguna (Ha)		0,0605	0,6473	0,7256
		Anaerobia	Facultativa	Maduración
Profundidad media	ancho (m)	17,4	56,9	60,2
	largo (m)	34,8	113,8	120,5
	Área (m <sup>2</sup> )	605	6473	7256
Base laguna	ancho (m)	9	52	58
	largo (m)	27	109	118
	Área (m <sup>2</sup> )	251	5644	6899
Lámina de Agua	ancho (m)	25	62	62
	largo (m)	43	119	122
	Área (m <sup>2</sup> )	1086	7351	7621
Cota Terreno	ancho (m)	27,4	63,9	64,2
	largo (m)	44,8	120,8	124,5
	Área da (m <sup>2</sup> )	1226	7716	7995
Por cada laguna	Volumen agua (m <sup>3</sup> )	2480	16197	7257
	Volumen total* (m <sup>3</sup> )	2710	16634	7440

**Tabla 5**  
Resumen de inversiones por alternativas

<b>RESUMEN GENERAL DE COSTOS DE INVERSIÓN</b>						
<b>PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MESETAS (QMH)=47,10 L/S (QMM)=35,09 L/S</b>						
<b>CAUDAL MEDIO DIARIO (Qmd) 14,00 L/s</b>						
ITEM	DESCRIPCION	FILTRO PERCOLADOR	LODOS ACTIVADOS	UASB+RAP	UASB+LODOS ACTIVADOS	LAGUNAS DE ESTABILIZACION
1	OBRAS CIVILES - PRELIMINAR	\$ 241.687.900,35	\$ 241.687.900,35	\$ 241.687.900,35	\$ 241.687.900,35	\$ 136.902.770,46
2	OBRAS CIVILES PROCESOS	\$ 3.567.094.892,28	\$ 4.184.992.637,07	\$ 4.643.483.063,80	\$ 4.279.546.493,13	\$ 5.619.384.791,21
3	OBRAS MECÁNICAS - PELIMINAR	\$ 127.600.000,00	\$ 127.600.000,00	\$ 127.600.000,00	\$ 127.600.000,00	\$ 127.600.000,00
4	OBRAS MECÁNICAS - PROCESOS	\$ 2.305.368.294,00	\$ 1.774.456.910,00	\$ 2.063.019.480,00	\$ 2.061.227.182,00	
5	OBRAS ELÉCTRICAS	\$ 412.500.000,00	\$ 735.500.000,00	\$ 270.500.000,00	\$ 506.500.000,00	\$ 82.000.000,00
6	ARRANQUE Y PUESTA EN MARCHA	\$ 38.600.000,00	\$ 38.600.000,00	\$ 46.320.000,00	\$ 46.320.000,00	\$ 38.600.000,00
	<b>VALOR COSTO DIRECTO</b>	<b>\$ 6.692.851.086,63</b>	<b>\$ 7.102.837.447,42</b>	<b>\$ 7.392.610.444,15</b>	<b>\$ 7.262.881.575,48</b>	<b>\$ 6.004.487.561,67</b>
	AIU (31%)	\$ 2.074.783.836,86	\$ 2.201.879.608,70	\$ 2.291.709.237,69	\$ 2.251.493.288,40	\$ 1.861.391.144,12
	<b>TOTAL DEL PROYECTO</b>	<b>\$ 8.767.634.923,49</b>	<b>\$ 9.304.717.056,12</b>	<b>\$ 9.684.319.681,84</b>	<b>\$ 9.514.374.863,88</b>	<b>\$ 7.865.878.705,79</b>
	<b>INTERVENTORÍA (7%)</b>	<b>\$ 613.734.444,64</b>	<b>\$ 651.330.193,93</b>	<b>\$ 677.902.377,73</b>	<b>\$ 666.006.240,47</b>	<b>\$ 550.611.509,41</b>

Como se puede observar, las alternativas 2, 3 y 4 tienen costos de inversión muy similares. Por su parte, la alternativa 5, de lagunas de estabilización, tiene los menores costos de inversión.

A continuación se resumen los costos de operación, teniendo en cuenta los componentes de costos por energía, consumos de cloro, costos de personal (operarios e ingeniero jefe de planta), más los costos de caracterizaciones para control y monitoreo del sistema, así como los costos del manejo y disposición de los lodos (tabla 6).

Como se observa en la tabla 6, la alternativa 5 es la de menores costos de operación, seguida de la alternativa 3, que es un sistema de tratamiento anaerobio.

Así mismo, se presentan las diferencias entre los costos de operación de cada alternativa comparados con el costo menor de las lagunas de estabilización (tabla 7).

Igualmente, se muestra cómo la diferencia entre el sistema con menores costos de operación, lagunas de estabilización, y el sistema de mayor costo de operación, lodos activados, puede ser de \$377.101.656 al año.

En el proceso de selección de la alternativa de diseño, se valora cada una de ellas mediante una matriz multicriterio dividida en tres componentes:

- Aspectos técnicos
- Aspectos sociales y ambientales
- Aspectos económicos y financieros

**Tabla 6**  
Resumen de costos de operación.

<b>COSTOS DE OPERACIÓN</b>						
<b>PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MESETAS</b>						
<b>CAUDAL 35,10 L/s</b>						
<b>TECNOLOGÍA DE TRATAMIENTO</b>	<b>ENERGÍA</b>	<b>QUÍMICOS</b>	<b>PERSONAL</b>	<b>MANEJO DE LODOS</b>	<b>TOTAL OPERACIÓN</b>	<b>COSTO POR m<sup>3</sup></b>
ALT 1 FILTRO PERCOLADOR	6.335.467	3.275.251	10.040.000	2.835.000	22.485.718	247
ALT 2 LODOS ACTIVADOS	28.590.138	3.275.251	10.040.000	2.835.000	44.740.389	492
ALT 3 UASB + RAP	3.033.508	3.275.251	10.040.000	675.000	17.023.759	187
ALT 4 UASB + LAC	16.509.798	3.275.251	10.040.000	1.350.000	31.175.049	343
ALT 5 LAGUNAS ESTABILIZACION	250.000	0	7.240.000	350.000	7.840.000	86

**Tabla 7**  
Diferencias en costos anuales de operación por alternativa

<b>COSTOS DE OPERACIÓN PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MESETAS</b>								
<b>POR AÑO, POR m<sup>3</sup> Y DIFERENCIAS EN COSTOS DE OPERACIÓN</b>								
<b>CAUDAL 35, 10 L/s</b>								
<b>TECNOLOGÍA DE TRATAMIENTO</b>	<b>ENERGÍA</b>	<b>QUÍMICOS</b>	<b>PERSONAL</b>	<b>MANEJO DE LODOS</b>	<b>COSTO POR MES</b>	<b>COSTO POR m<sup>3</sup></b>	<b>TOTAL OPERACIÓN ANUAL</b>	<b>DIFERENCIA OPERACIÓN ANUAL</b>
ALT1 FILTRO PERCOLADOR	6.335.467	3.275.251	10.040.000	2.835.000	22.485.718	247	269.828.621	110.045.606
ALT2 LODOS ACTIVADOS	28.590.138	3.275.251	10.040.000	2.835.000	44.740.389	492	536.884.670	377.101.656
ALT3 UASB + RAP	3.033.508	3.275.251	10.040.000	675.000	17.023.759	187	204.285.106	44.502.091
ALT4 UASB + LAC	16.509.798	3.275.251	10.040.000	1.350.000	31.175.049	343	374.100.590	214.317.576
ALT5 LAGUNAS ESTABILIZACION	0	3.275.251	10.040.000	0	13.315.251	146	159.783.014	0

**Tabla 8**  
Matriz de evaluación y calificación de alternativas

MATRIZ DE EVALUACIÓN MULTICRITERIOS									
PTAR MUNICIPIO DE MESETAS - META									
Puntaje	Rango	Puntos	Evaluación	Alt. #	Alt. #	Alt. #			
				1	2	3	4	5	
				FP	LAC	UASB + RAP	UASB + LAC	LAG EST	
<b>ASPECTOS TECNICOS</b>									
1	30	<b>Tecnología apropiada</b>							
		0-2	Área requerida	1	1	1	2	0	
		0-2	Características del agua a tratar	2	2	2	2	2	
		0-2	Complejidad de la tecnología	1	1	1	1	2	
		0-2	Facilidad de ampliación o compatibilidad con nuevos componentes	2	2	2	2	0	
		0-2	Eficiencia del tratamiento	1	1,5	1	2	2	
		0-2	Requerimiento de equipos para mantenimiento y operación	1	1	1	1,5	2	
		0-2	Vulnerabilidad de la tecnología	1	1	1	2	2	
	0-1	Vida útil	0,5	0,5	0,5	0,5	1		
	0-15	<b>Exigencias operativas y de mantenimiento</b>							
		0-5	Facilidad operativa	3	2	4	5	5	
		0-5	Facilidad de mantenimiento	3	2	5	4	5	
		0-5	Requerimientos de energía para la operación y funcionamiento	3	1	5	4	5	
<b>ASPECTOS SOCIALES Y AMBIENTALES</b>									
2	10	<b>Afectación antrópica</b>							
		0-3	Calidad de vida	3	3	2	3	1	
		0-3	Generación de empleo	3	3	3	3	2	
		0-4	Riesgo para la salud	3	3	3	3	2	
	10	<b>Afectación biótica y abiótica</b>							
		0-1	Régimen de vientos	0,5	1	0,5	1	0	
		0-1	Limitaciones climáticas	1	1	1	1	1	
		0-2	Limitaciones ambientales	2	2	1	2	2	
		0-2	Generación de ruidos, olores y contaminación atmosférica	1	0,5	2	1,5	1	
		0-2	Contaminación de fuentes superficiales	1	2	1	2	2	
0-1	Calidad visual del paisaje	0,5	0,5	1	1	0			
0-1	Generación de lodos y sólidos	0,5	0,5	1	1	1			
<b>ASPECTOS ECONOMICOS Y FINANCIEROS</b>									
3	0-20	<b>Inversión inicial</b>							
		0-5	Valor de los lotes	4	4	4	5	1	
		0-15	Costos de construcción	13	12	11	10	15	
	0-25	<b>Costos de operación</b>							
		0-5	Infraestructura institucional	5	5	5	5	5	
		0-10	Insumos químicos, consumo de electricidad, disposición de lodos	8	4	7	6	10	
		0-2	Requiere de personal calificado	1	1	1	1	2	
		0-3	Requiere de personal no calificado	2	2	3	2	3	
	0-5	Aprovechamiento de subproductos Biogás y Lodos	3	3	5	5	0		
	0-5	<b>Costos de mantenimiento</b>							
0-2		Requiere de personal calificado	1	1	1	1	2		
0-3		Requiere de personal no calificado	3	3	3	3	2		
PUNTAJE TOTAL OBTENIDO				74	66,5	79	82,5	78	
ORDEN DE ELEGIBILIDAD				4	5	2	1	3	

Igualmente, se evalúa cada componente con los criterios correspondientes de calificación y valoración. Los resultados de la matriz de evaluación se incluyen en la tabla siguiente (tabla 8).

De la matriz de evaluación se deduce que la alternativa tecnológica 4, correspondiente a un tratamiento de tipo híbrido: anaerobio-aerobio (UASB + LAC), es la de mayor opción para realizar el tratamiento de las aguas residuales para el casco urbano del municipio de Mesetas por ocupar menos área, tener costos moderados de inversión, operación y mantenimiento relativamente simples y proveer confiabilidad para cumplir con los objetivos de calidad establecidos para el vertimiento sobre el río Güejar: DBO < 15 mg/L.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con el fin de dar cumplimiento a la norma de vertimiento para la PTAR de Mesetas, se evaluaron cinco alternativas de tratamiento.

Una vez contemplados aspectos técnicos, económicos, sociales y ambientales, la evaluación matricial indica como mejor alternativa la de UASB + lodos activados.

Se deben hacer los diseños definitivos e ingeniería de detalle de dicha PTAR para ejecutar la fase de construcción.

Para la realización del diseño definitivo se recomienda aplicar metodología semejante a la desarrollada en la fase de diagnóstico (figura 11).

## REFERENCIAS

Salazar Cuevas, M. (2023). Solución de alternativa de tratamiento de aguas residuales para el municipio de Mesetas, departamento del Meta. Trabajo de grado para optar al título de magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Ingeniería Ambiental. Bogotá: Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. MVCT. Resolución 0799 del 9 de diciembre de 2021.

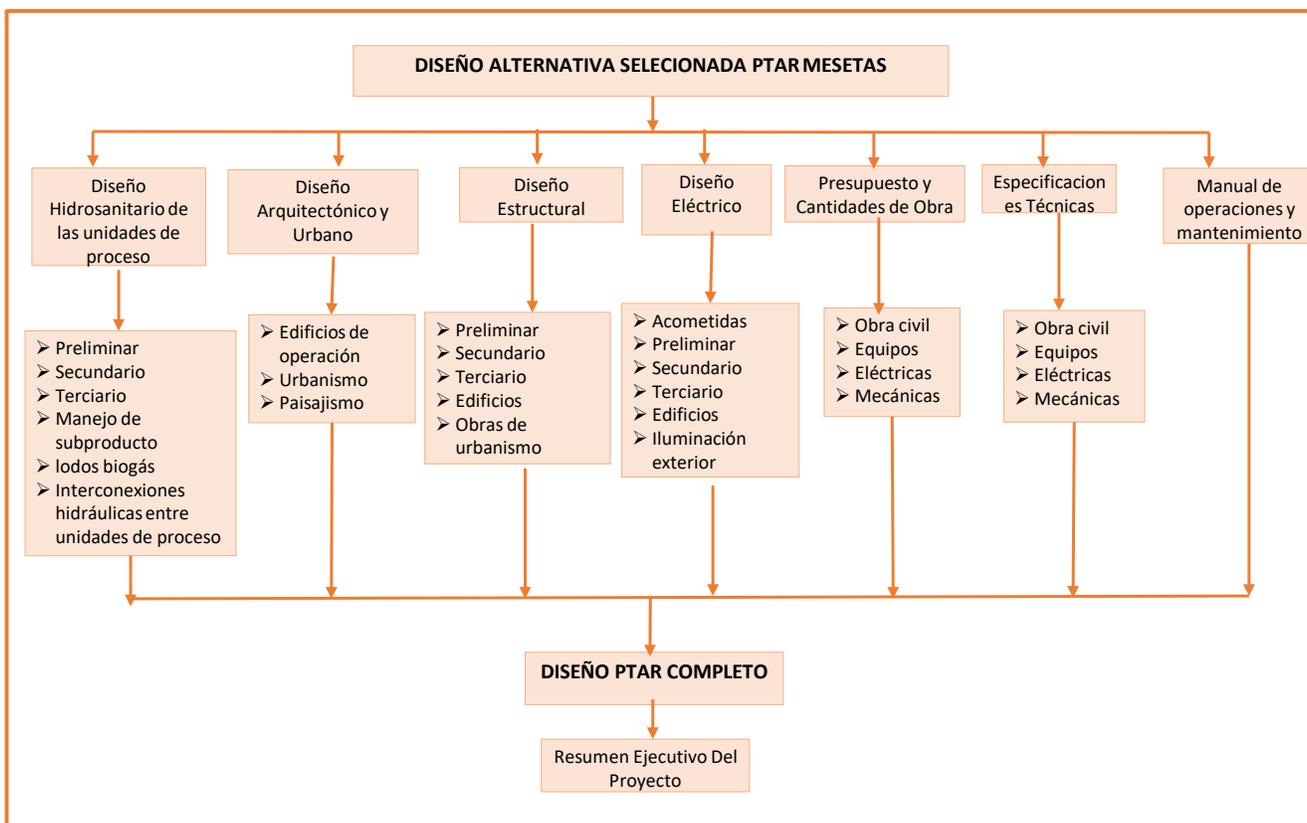


Figura 11. Metodología de la fase de diseño.

# REVISTA DE LA ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA

## Alcance y política

El objetivo de la *Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería* es difundir artículos técnicos que contribuyan al desarrollo del país a través de una publicación con alta calidad editorial y rigor científico.

La revista acepta prioritariamente los siguientes tipos de trabajos, que le permiten mantener su categorización:

1. **Artículo de investigación científica y tecnológica.** Documento que presenta, de manera detallada, los resultados originales de proyectos de investigación. La estructura generalmente utilizada contiene cuatro apartes importantes: introducción, metodología, resultados y conclusiones.
2. **Artículo de reflexión.** Documento que presenta resultados de investigación desde una perspectiva analítica, interpretativa o crítica del autor, sobre un tema específico, recurriendo a fuentes originales.
3. **Artículo de revisión.** Documento producto de una investigación donde se analizan, sistematizan e integran los resultados de investigaciones publicadas o no publicadas, sobre un campo en ciencia o tecnología, con el fin de dar cuenta de los avances y las tendencias de desarrollo. Se caracteriza por presentar una cuidadosa revisión bibliográfica.

También admite artículos de las siguientes tipologías:

4. **Artículo corto.** Documento breve que presenta resultados originales preliminares o parciales de una investigación científica o tecnológica, que por lo general requieren una pronta difusión.
5. **Reporte de caso.** Documento que presenta los resultados de un estudio sobre una situación particular, con el fin de dar a conocer las experiencias técnicas y metodológicas consideradas en un caso específico.
6. **Revisión de tema.** Documento resultado de la revisión crítica de la bibliografía sobre un tema en particular.

Cabe destacar que se privilegian para la revista los tipos de artículos de los numerales 1, 2 y 3.

La revista circula trimestralmente y recibe sólo artículos inéditos. Los trabajos recibidos se someten al concepto de pares académicos y del Consejo Editorial.

## Requisitos para la publicación de artículos

Los artículos presentados a la revista deben remitirse por correo electrónico a [revista@escuelaing.edu.co](mailto:revista@escuelaing.edu.co), adjuntando los siguientes formatos debidamente diligenciados: autor.doc, clasificación.doc y tipo.doc, cuyos archivos se pueden descargar de <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>. En este mismo sitio está disponible la plantilla guía que contiene la estructura determinada por la revista para los artículos.

## Scope and policy

*Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería* disseminates technology articles helping to our country development. It emphasises on its high quality print and its scientific rigour. Articles submitted for publication shall be classified into one of the following categories— which allow it keeps its indexation:

1. **Scientific and technological research article.** These documents offer a detailed description about the original findings of research projects. In general, the usually used structure contains four important sections: introduction, methodology, results and conclusions.
2. **Reflection article.** These documents present the results of a research project on a specific, interpretative, or critical view by the author about a particular topic by using original sources.
3. **Review.** A document resulting from a finished research, where the published and/or unpublished findings of investigation in a particular field of science or technology are analysed, systematised and integrated to report the progress and the development tendencies. These documents include a careful bibliographic review.

*Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería* also accepts the following types of articles:

4. **Short article.** A brief text presenting the original, preliminary and/or partial results of a scientific or technological study, which normally need to be disseminated as quickly as possible.
5. **Case report.** A document that presents the results of a study on a specific situation in order to report the technical and methodological experiences considered in a particular case.
6. **Thematic review.** These documents are the product of a critical review of literature on a particular topic.

Our revista privilege articles as the highlight ones in numbers 1, 2 and 3.

*Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería* is a quarterly publication that only accepts unpublished articles. The revista submits all the papers to the verdict of two academic peers, who evaluate the article.

## Ruling for publication

The article must be sent by e-mail to [revista@escuelaing.edu.co](mailto:revista@escuelaing.edu.co) with 3 files attached: Author.doc, Classification.doc and Type.doc available in <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>. There is also a template guide for the structure of the article (template guide.doc).



**Confía en 4-72,**  
el servicio de envíos  
de Colombia

Línea de atención al cliente:  
**(57 - 1) 472 2000 en Bogotá**  
**01 8000 111 210 a nivel Nacional**

.....

[www.4-72.com.co](http://www.4-72.com.co)