

- **Guía metodológica para el diseño de sistemas de drenaje superficial en vías urbanas de bajo tráfico y aplicación a un caso de estudio.**
- **Modelación del flujo en 3D en el proceso de sedimentación primaria para el tratamiento de aguas residuales domésticas utilizando Ansys-Fluent.**
- **Diseño de modelos logísticos para transportar muestras de sangre mediante el uso de drones.**
- **Última milla: articulación intermodal del transporte informal como alimentador del sistema de transporte público masivo de la ciudad de Bogotá (Transmilenio).**
- **Análisis y diseño comparativo de losas nervadas para edificaciones de distintos niveles en la ciudad de Bogotá, empleando dos tipos de reforzamiento: reforzamiento convencional longitudinal y reforzamiento a base de elementos postensados.**
- **Evaluación de la planta de tratamiento de agua potable del municipio de Cumaral (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
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

Acciones con propósito

Martha Edith Rolón Ramírez

7-18

Guía metodológica para el diseño de sistemas de drenaje superficial en vías urbanas de bajo tráfico y aplicación a un caso de estudio

Karla Patricia Cuadros López - Iván Guillermo Vargas Mateus - Héctor Matamoros Rodríguez

En este artículo se presenta el planteamiento de una guía metodológica completa y práctica para el diseño de los sistemas de drenaje superficial en vías urbanas de bajo tráfico, y se incluye un análisis de la normativa vigente y la aplicación a un caso de estudio.

19-33

Modelación del flujo en 3D en el proceso de sedimentación primaria para el tratamiento de aguas residuales domésticas utilizando Ansys-Fluent

Miguel Ángel Díaz García - Germán Ricardo Santos Granados

El artículo desarrollado se enfoca en la puesta en práctica de la dinámica de fluidos computacional aplicada a la modelación tridimensional en estado no permanente de un sedimentador primario diseñado para el tratamiento de las aguas residuales de un municipio tipo de la región occidental de Colombia (CFD), con el objetivo de encontrar la eficiencia de remoción de sólidos suspendidos totales (SST) y describir el comportamiento hidrodinámico de la unidad empleando un enfoque euleriano, aplicando el modelo de mezcla integrado en el software Ansys Fluent.

35-48

Diseño de modelos logísticos para transportar muestras de sangre mediante el uso de drones

Roland Ruiz Fagua - Maritza Cecilia Villamizar Roperó

En el presente artículo se evalúa una operación logística para el transporte de muestras de sangre, con el propósito de aumentar la cobertura y la accesibilidad a las instalaciones de análisis clínico, disminuyendo los tiempos y costos de viaje asociados. Como resultado, se obtiene un modelo de dos etapas, evaluado en los ámbitos estratégico y táctico-operativo, simulado en los departamentos del Guainía y Valle del Cauca.

49-60

Última milla: articulación intermodal del transporte informal como alimentador del sistema de transporte público masivo de la ciudad de Bogotá (Transmilenio)

Sebastián Parada Celis - Maritza Cecilia Villamizar Roperó

En este artículo se habla sobre el funcionamiento polémico del transporte de la ciudad de Bogotá, evaluado desde su falta de cobertura y alcance, justificado por el surgimiento de transportes públicos informales. Se presenta una investigación que aísla el funcionamiento y las condiciones del transporte público y se enfoca en la cobertura de este, donde el surgimiento de transportes informales, nacientes ante las necesidades de transporte de los usuarios, justifica la falta de alcance del sistema masivo en los viajes complementarios del transporte.

61-70

Análisis y diseño comparativo de losas nervadas para edificaciones de distintos niveles en la ciudad de Bogotá, empleando dos tipos de sistema de reforzamiento: reforzamiento convencional longitudinal y reforzamiento a base de elementos postensados

Oscar Julián Ramírez Arias - Jaime Erasmo Garzón Moreno

En naciones altamente desarrolladas, como Estados Unidos y Alemania, el uso de losas presforzadas es mucho más aplicado de lo que se puede llegar a creer para la construcción de losas en edificaciones, y permite hacer construcciones más eficientes.

71-75

Evaluación de la planta de tratamiento de agua potable del municipio de Cumaral (Meta)

Miguel Ángel Betancur Cruz – Jairo Alberto Romero Rojas

En este artículo se presentan la descripción, diagnóstico hidráulico y rendimiento operacional de la planta de tratamiento de agua potable (PTAP) del municipio de Cumaral (Meta), con base en el análisis de sus componentes y de los resultados obtenidos en la caracterización físicoquímica y microbiológica del agua cruda y del agua tratada.

77 / ALCANCE Y POLÍTICAS

Editorial

Acciones con propósito

MARTHA EDITH ROLÓN RAMÍREZ

Directora de la Unidad de Proyectos de la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

martha.rolon@escuelaing.edu.co

Se escucha cada vez con mayor frecuencia la invitación a actuar, a hacer o, de manera más profunda, a despertar. Sin embargo, la actuación, para que sea efectiva, entendiendo la efectividad como la “capacidad de lograr el efecto que se desea o espera”, según la definición que aparece en el *Diccionario de la lengua española*, requiere un marco que la oriente, que la guíe y que la inspire.

En ese sentido, es común encontrar en diversos niveles de una organización –los cuales pueden corresponder al nivel institucional, empresarial, corporativo, gremial, nacional, internacional o global– marcos estratégicos que hacen referencia al norte o propósito, los cuales se pueden traducir en la definición de la visión, misión, valores institucionales, pilares y objetivos estratégicos, que se pueden evidenciar en instrumentos como los objetivos de desarrollo sostenible (ODS), al igual que en planes nacionales, territoriales o institucionales de desarrollo.

En ese orden de ideas, ¿cómo se materializan entonces dichas intenciones? Indudablemente, con el desarrollo de acciones que bien pueden reflejarse en la gestión de proyectos, programas o portafolios que se trazan objetivos y, además, impactos o beneficios, en consonancia con los marcos estratégicos a cuya materialización contribuyen. Esto significa que antes de la ejecución se supone un ejercicio previo, riguroso, de alineación estratégica, que evidencie la contribución a alcanzar los objetivos propuestos.

Henry Ford se refirió a esto hace más de un siglo, cuando dijo una de sus frases célebres: “El mayor

desperdicio en los negocios es hacer bien las cosas incorrectas”, frase que bien se puede extrapolar a las instituciones, al país, al mundo y a la vida misma. No obstante, no es suficiente con que las acciones estén alineadas con los marcos estratégicos, pues “no todo vale”; por tanto, la pertinencia de la acción desde el punto de vista organizacional se definirá previa alineación con los marcos normativos que la rigen, los cuales se pueden reflejar en leyes, decretos, políticas, lineamientos y procesos, entre otros.

Ejemplos de la significación de esta alineación en el ámbito nacional bien podrían traducirse en invitaciones “a la defensa de la institucionalidad” o “a la independencia de poderes”, muy frecuentes por estos días. Es, pues, a partir del respeto y el compromiso frente al cumplimiento de los marcos normativos y la coherencia con el marco estratégico como se pueden emprender acciones efectivas, puesto que todas las acciones que se emprendan compartirán un propósito, serán pertinentes y antepondrán el bien común a los intereses personales.

La invitación es, entonces, a emprender acciones efectivas, a construir en armonía, a aportar a la materialización de los objetivos estratégicos de nuestras organizaciones, del país y del planeta; la invitación es a “hacer” con sentido común, con propósito y responsabilidad compartida, partiendo del respeto y evidenciando nuestra vocación, dejando a un lado el miedo, el odio y la exclusión, y construyendo nuestro legado día tras día.

Guía metodológica para el diseño de sistemas de drenaje superficial en vías urbanas de bajo tráfico y aplicación a un caso de estudio

Methodological guide for designing surface drainage systems in low-traffic urban roads and application to a case study

KARLA PATRICIA CUADROS LÓPEZ¹ - IVÁN GUILLERMO VARGAS MATEUS² - HÉCTOR MATAMOROS RODRÍGUEZ³

1. Magíster en Ingeniería Civil de la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garvito.
2. Magíster en Ingeniería Civil de la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garvito.
3. Ingeniero civil, especialista en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente y magíster en Ingeniería Civil de la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garvito.

karla.cuadros@mail.escuelaing.edu.co - ivan.vargas-m@mail.escuelaing.edu.co - hector.matamoros@escuelaing.edu.co

Recibido: 22/11/2021 Aceptado: 15/12/2021

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

Resumen

En este artículo se presenta el planteamiento de una guía metodológica completa y práctica para el diseño de los sistemas de drenaje superficial en vías urbanas de bajo tráfico, y se incluye un análisis de la normativa vigente y la aplicación a un caso de estudio.

De acuerdo con lo anterior, y como procedimiento previo al planteamiento de la guía, se hizo un análisis comparativo de las normas de diseño de sistemas de drenaje superficial internacionales y de las empresas de servicios públicos de las principales ciudades de Colombia, con base en una serie de criterios definidos, usando una matriz de comparación. El alcance de la comparación se enfoca en los sistemas de drenaje superficial con el uso de sumideros, con el fin de identificar los criterios de diseño utilizados por las empresas de servicios públicos del país, y en esta forma hacer una propuesta que unifique criterios nacionales e internacionales y permita efectuar un análisis general con base en

las consideraciones de las regiones y de organizaciones referentes del exterior.

Adicionalmente, dentro del análisis se incluyen documentos internacionales para identificar los criterios utilizados fuera del país y adoptar aquellos que se consideren apropiados.

Luego de plantear la guía metodológica se realizó la aplicación a un caso de estudio con el fin de verificar su validez.

Palabras claves: drenaje superficial, sumideros, diseño hidráulico.

Abstract

This document presents the proposal of a complete and practical methodological guide for the design of storm drainage systems associated with low-traffic urban roads. The document included an analysis of current regulations and the application to a case study. As a procedure prior to the proposal of the guide, a comparative analysis

of the different design standards for drainage systems of the public utility companies of the main cities of Colombia was made based on a comparison chart. The scope of the comparison was focused on drainage systems with the use of inlets. This analysis was made to identify the design criteria used by the regulations of the country's public utility companies and thus, make a proposal that unifies national and international criteria and allows a general analysis that uses the considerations of the different regions and leading organizations. Additionally, international documents are included in the analysis to identify the criteria used abroad and adopt those that are considered appropriate. After the proposal of the methodological guide, it was applied to a case study.

Keywords: surface drainage, inlets, hydraulic design

INTRODUCCIÓN

En este artículo se presenta una guía metodológica para el diseño de sistemas de drenaje superficial en sectores urbanos con vías de bajo tráfico. Para este fin, se llevaron a cabo una serie de etapas y tareas, a partir de las cuales se definieron los elementos que se deben tener en cuenta al momento de hacer el diseño en forma efectiva, lograr la protección contra inundaciones y mantener un tráfico urbano sin interferencias a causa de eventos de precipitación pluvial.

En la etapa 1 se procedió a recopilar y hacer la revisión bibliográfica de la información requerida para la construcción de la guía. En la información recopilada se incluyeron normas internacionales y de diseño de sistemas de drenaje superficial de las empresas de servicios públicos de las principales ciudades de Colombia.

En la etapa 2 se usó una matriz multicriterio, que permitió el análisis comparativo de los parámetros hidráulicos, aspectos por considerar y recomendaciones de las normas consultadas, con el objeto de identificar los elementos que se deben incluir y unificar criterios de diseño, para definir posteriormente la estructura lógica y la secuencia procedimental que se aconseja seguir y que han de ser parte central de la metodología de diseño, teniendo en cuenta la etapa previa de revisión bibliográfica de los trabajos relacionados con el diseño de sistemas de drenaje superficial.

La etapa 3 consistió en realizar el planteamiento de la guía. Los elementos que se definieron en la etapa anterior, en esta son ordenados y estructurados de modo tal que constituyen el componente principal de la propuesta metodológica y que luego, al plasmarlos

con una estructura documental de norma, dan forma a la guía de diseño.

La etapa 4 se centró en la aplicación práctica de la metodología propuesta para un caso de estudio. Como primer paso, se seleccionó el caso que se va a desarrollar de entre un conjunto de proyectos, a los que los autores tuvieron acceso y sobre los cuales los dueños de la información de campo estuvieron de acuerdo en suministrar para el desarrollo de este trabajo académico.

El caso seleccionado se definió porque se ajusta a las condiciones de zona urbana, típica de Colombia, con vías de bajo tráfico, y con información topográfica, de urbanismo e hidrología suficiente, para garantizar la aplicabilidad de todos los aspectos contenidos en la guía desarrollada en la etapa 3. Para determinar la interacción entre la propuesta teórica y el caso práctico de aplicación, se hizo uso estricto de la guía metodológica, lo que implica que todas las etapas hasta aquí propuestas son la base tanto de la guía como de la aplicación al caso de estudio.

En esta etapa, de manera adicional a la aplicación del caso de estudio, se analizó el riesgo asociado a las inundaciones que se pueden presentar para tormentas con diferentes periodos de retorno, superiores a los de diseño, con el propósito de verificar el grado de protección logrado con el diseño propuesto. Esta labor se consiguió mediante la comparación de los resultados de diversas modelaciones hidráulicas hechas al sistema diseñado, con caudales asociados a tormentas con periodos de retorno superiores.

La etapa 5 se desarrolló en forma paralela a cada una de las etapas previamente descritas. Consistió en documentar los procesos y hallazgos encontrados mediante el desarrollo del trabajo de grado.

OBJETIVOS

General

- Diseñar una guía metodológica teórica y de aplicación para la realización de diseños adecuados de obras de drenaje superficial con la utilización de sumideros en vías urbanas de bajo nivel de tráfico, unificando los criterios existentes en la normativa vigente.

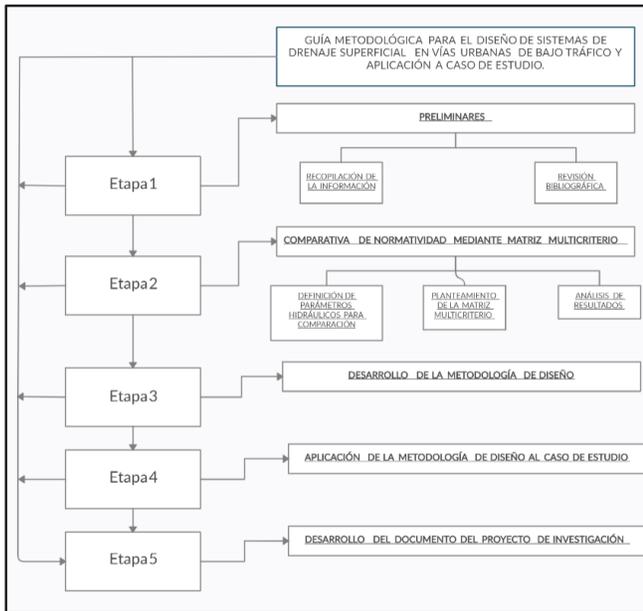


Figura 1. Etapas de realización del documento.
Fuente: Elaboración propia.

Específicos

- Realizar la búsqueda, lectura y análisis de la bibliografía encontrada en relación con las guías metodológicas de diseño de sistemas de drenaje superficial, propuestas por las diferentes entidades prestadoras de servicios públicos en el país.
- Hacer un análisis comparativo de las normas de diseño de sistemas de drenaje superficial de las empresas de servicios públicos de las principales ciudades de Colombia, con base en una matriz multicriterio.
- Definir los procesos de uso de herramientas computacionales con el objeto de determinar los parámetros físicos e hidráulicos, para su posterior uso en el análisis de sumideros, laterales, pozos de inspección y colectores, componentes fundamentales de los sistemas de drenaje de la escorrentía superficial convencionales, aplicando *software* de uso habitual en oficinas de consultoría.
- Aplicar la metodología propuesta a un caso de estudio, y hacer adicionalmente un análisis de riesgo de inundación asociado a diferentes periodos de retorno.

ETAPA 1. PRELIMINARES

En la etapa 1 se procedió a realizar la recopilación y análisis de la información normativa de las empresas de servicios públicos de las principales ciudades del país y de normativas internacionales referentes al diseño hidráulico de sistemas de drenaje superficial. A continuación, se presentan las normas incluidas dentro de la revisión bibliográfica.

Tabla 1
Normas incluidas en el análisis bibliográfico

Distintivo	Norma
	Hydraulic Engineering Circular No. 22, Third Edition URBAN DRAINAGE DESIGN MANUAL
	Norma 5.2 - IC drenaje superficial de la instrucción de carreteras
	Manual de drenaje para carreteras
	Normas y especificaciones técnicas para la construcción de obras de acueducto y alcantarillado
	Normas de Diseño de Sistemas de Alcantarillado de las Empresas Públicas de Medellín. E. S. P.
	Resolución 0330 de 2017 Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS
	Norma Técnica de servicio NS-047 SUMIDEROS
	NDC-SE-RA-015 Sumideros y/o captación superficial de aguas lluvias en vías urbanas

Fuente: Elaboración propia.

Las normas mencionadas en la tabla anterior se descargaron de los portales web oficiales de cada entidad, con el propósito de obtener la información necesaria para continuar con el análisis comparativo de la normativa existente mediante una matriz de comparación.

ETAPA 2. ANÁLISIS DE LA NORMATIVA NACIONAL E INTERNACIONAL EXISTENTE

La normativa nacional e internacional existente se analizó mediante el planteamiento de una matriz de comparación, para la que se definieron múltiples criterios. Conceptualmente, se utilizó esta herramienta con el objetivo de hacer un análisis de los documentos normativos vigentes de la nación en comparación con la Circular 22 de la Federal Highway Administration, perteneciente al Departamento de Transporte de Estados Unidos, la cual, en la revisión previa, mostró ser la más completa.

El alcance de la comparación se enfocó en los sistemas de drenaje superficial con el uso de sumideros, para identificar los criterios de diseño utilizados por las normas de las empresas de servicios públicos del país y, de este modo, hacer una propuesta que unifique criterios nacionales e internacionales y permita efectuar un análisis general que use las consideraciones de las regiones y de organizaciones referentes del exterior.

Adicionalmente, se incluyen documentos internacionales con el fin de identificar los criterios utilizados fuera del país y adoptar aquellos que se consideren apropiados.

Dentro del análisis realizado se evaluaron aspectos de forma, tales como la descripción del contenido, lista de símbolos, glosario e introducción. Igualmente, se tomaron en cuenta aspectos técnicos, como la planificación del sistema, procedimientos hidrológicos, drenaje de pavimento, canales abiertos y estructuras. Estos aspectos técnicos corresponden a los capítulos existentes en la Circular 22 de la Federal Highway Administration, perteneciente al Departamento de Transporte de Estados Unidos, tal como se mencionó anteriormente.

ETAPA 3. PLANTEAMIENTO DE LA GUÍA METODOLÓGICA PARA DISEÑO

La *Guía metodológica para diseño de sistemas de drenaje superficial en vías urbanas de bajo tráfico* es un documento de ocho capítulos, en los cuales se describe el paso a paso para lograr un diseño adecuado y armónico de cada uno de los componentes de un sistema de drenaje superficial.

Así mismo, se explican desde los procedimientos previos al diseño, como la planificación del sistema y la revisión de la información de entrada, hasta las consideraciones que se deben tener en cuenta para seguir las recomendaciones y observaciones del diseñador, para cerrar posteriormente con las conclusiones, plasmadas en las memorias de cálculo y planos en los que se exhiben los resultados topológicos e hidráulicos. Más adelante se presenta un diagrama conceptual en el que se resume el contenido de la *Guía* (figura 2).

Después del planteamiento de la *Guía metodológica para diseño*, se procedió a aplicarla a un caso de estudio. Esta tarea se ejecutó como la siguiente etapa del proceso definido.

ETAPA 4. APLICACIÓN DE LA GUÍA METODOLÓGICA PARA DISEÑO AL CASO DE ESTUDIO

En el marco de la etapa 4 se aplicó la *Guía metodológica* a un caso de estudio. Se procedió a realizar uno por uno los procedimientos descritos en la *Guía* con el fin de verificar la validez de esta.

En los siguientes apartados se presentan los resultados obtenidos al aplicar la *Guía metodológica* al caso de estudio seleccionado.

Objetivo general

Hacer el diseño del sistema de drenaje superficial para proporcionar un paso seguro de todos los actores viales durante el evento de la tormenta de diseño en las vías de la zona de expansión proyectada entre las carreras 4.^a y 7.^a, entre la calle 4.^a y la vía a la vereda Cacique, en la cabecera municipal de Ubaque (Cundinamarca).

A continuación, se presenta la localización específica del área de estudio (figura 3).

Se realizó la localización de la infraestructura de alcantarillado, según lo especificado en la *Guía metodológica de diseño*, en la que se presentan los criterios para la ubicación de cada uno de los componentes del sistema de drenaje, como sumideros, tuberías laterales, pozos de inspección y colectores. La disposición de todos estos componentes del sistema está determinada por controles geométricos e hidráulicos (figura 4).

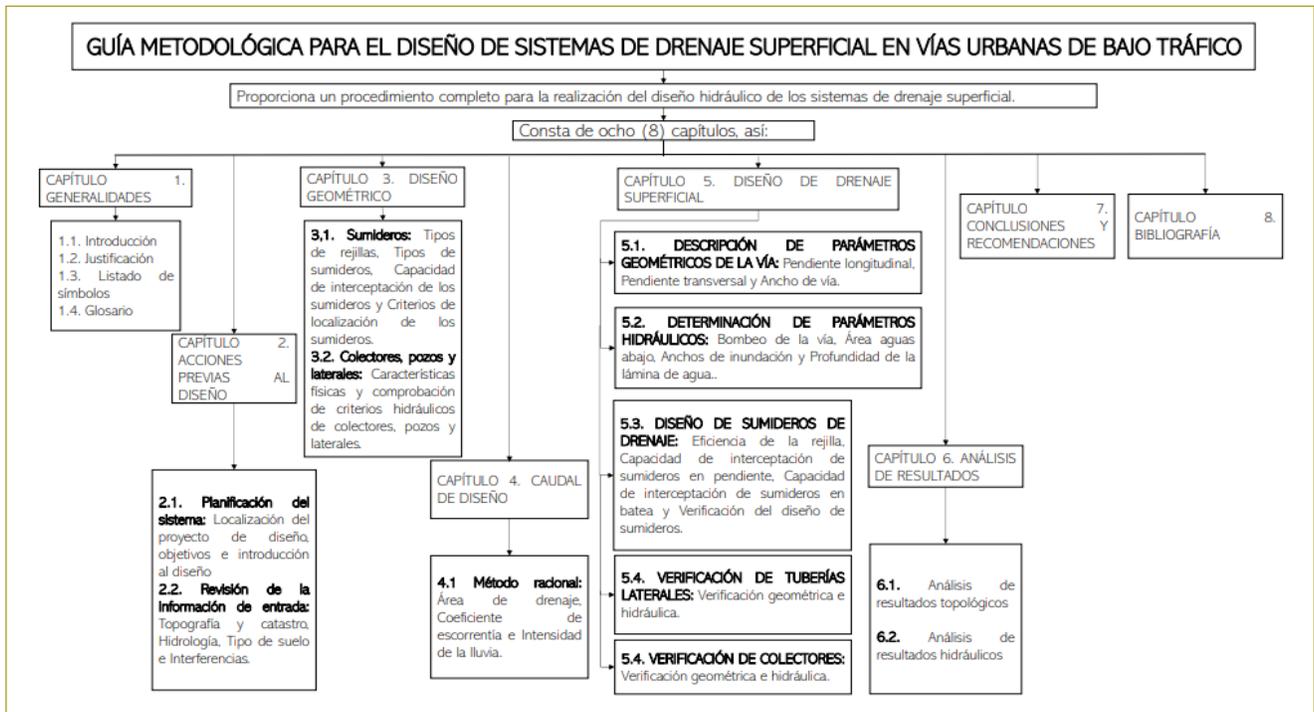


Figura 2. Guía metodológica para el diseño de sistemas de drenaje superficial en vías urbanas de bajo tráfico.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4. Localización de la infraestructura en caso de estudio.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 3. Localización específica del área de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

Cálculo de áreas pluviales

Se aplicaron los procedimientos computacionales para el trazado de áreas pluviales, al tiempo que se definieron superficies acotadas, asociadas a una determinada estructura de captación, las cuales recogen el agua proveniente de un evento de precipitación; están delimitadas por la línea divisoria de las aguas, tomando en cuenta la topografía del terreno (figura 5).

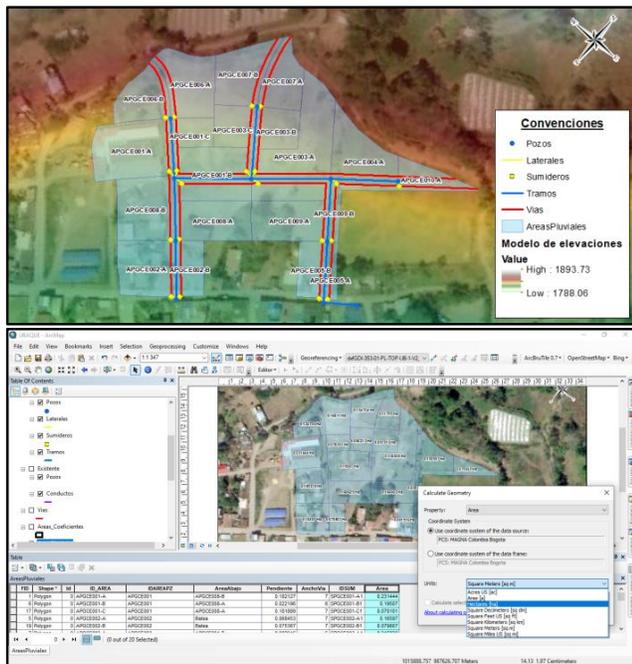


Figura 5. Trazado y cálculo de áreas pluviales.
Fuente: Elaboración propia.

Cálculo del coeficiente de escorrentía

Este procedimiento fue necesario para clasificar el uso del suelo (zona permeable o impermeable), indispensable para determinar el caudal de diseño. Para su eje-

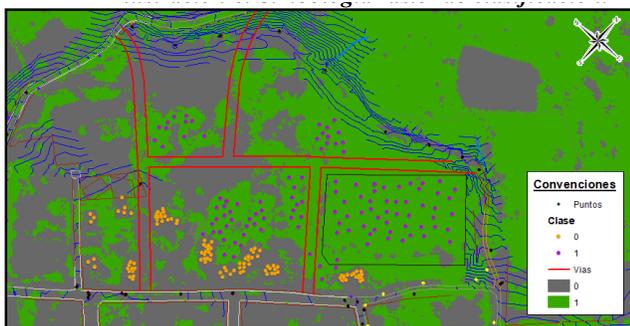


Ilustración 6. Simbología ráster de clasificación.
Fuente: Elaboración propia.

cución se utilizó una ortofoto, la cual se puede extraer de algún servidor de mapas o imágenes satelitales. En el procedimiento se utilizan herramientas tales como: Create Signatures, Maximum Likelihood Classification y Zonal Statistics as Table (figura 6).

CÁLCULO DE PENDIENTES DE VÍA

Para el cálculo de las pendientes de vía se creó un modelo de elevaciones (DEM), el cual es necesario para poder asignar la cota rasante de diversos elementos que se van agregando a la red en el proceso de diseño, así como la definición de las pendientes longitudinales de las vías en cada área de drenaje. Para ello se usan los puntos topográficos, levantados por las comisiones en campo, es posible obtener un modelo de elevación digital DEM o una triangulación de elevaciones (TIN) para el área a analizar como se explica a continuación: Natural Neighbor, Merge, Intersect, Interpolate Shape, Calculate Geometry, Add Surface Information (ver Ilustración 7).

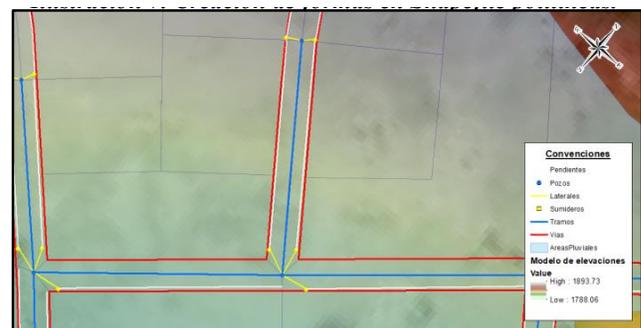


Figura 7. Creación de formas en Shapefile polilíneas.
Fuente: Elaboración propia.

Ancho de la vía

El procedimiento consistió en medir de manera transversal a la vía la distancia entre bordillos o sardineles, y registrar el valor para cada vía (figura 8).

Bombeo de la vía

El procedimiento consistió en hacer uso del modelo digital de elevaciones creado en procedimientos anteriores y verificar con la herramienta Identify las elevaciones en secciones transversales de la vía, tanto en los bordes

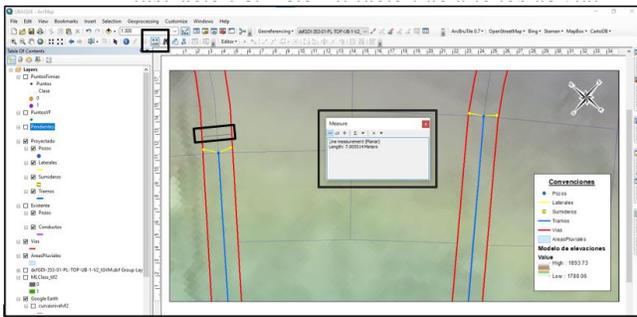


Figura 8. Determinación de anchos de vía.

Fuente: Elaboración propia.

como en el eje. Si la elevación del eje de la vía es mayor que la elevación en los bordes, el bombeo de la vía es a ambos lados. Por otro lado, si la elevación de alguno de los bordes es mayor que el eje y el borde opuesto, el bombeo es a un solo lado.

La determinación del bombeo de la vía es importante para comparar el ancho de inundación de la vía, puesto que el ancho de inundación máximo admisible se encuentra en función de si la vía tiene bombeo a ambos lados o a un solo lado (figura 9).

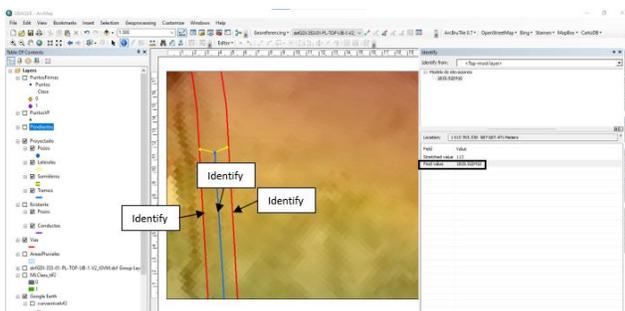


Figura 9. Determinación del bombeo de la vía.

Fuente: Elaboración propia.

Área aguas abajo

Se realizó la definición de las áreas aguas abajo. La finalidad de este procedimiento es tener conocimiento del sumidero aguas abajo al cual se le asignará el caudal remanente en caso de que el análisis hidráulico así lo requiera. El resultado se esquematiza más adelante (figura 10).

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Una vez diseñadas las estructuras de captación del sistema de drenaje pluvial y verificados los parámetros



Figura 10. Definición de áreas aguas abajo.

Fuente: Elaboración propia.

geométricos e hidráulicos de las tuberías laterales que transportan el caudal pluvial de sumidero a pozo, se realizó la verificación de los parámetros geométricos e hidráulicos de los colectores.

Para la verificación de los parámetros que se mencionan, se usó el software SewerGems Connect Edition en su versión 10.02.01.04 de Bentley Systems, Inc., en el cual se realiza la estructuración del modelo hidráulico del caso de estudio, según la localización de los pozos y colectores definida. La topología del modelo se presenta a continuación (figura 11).

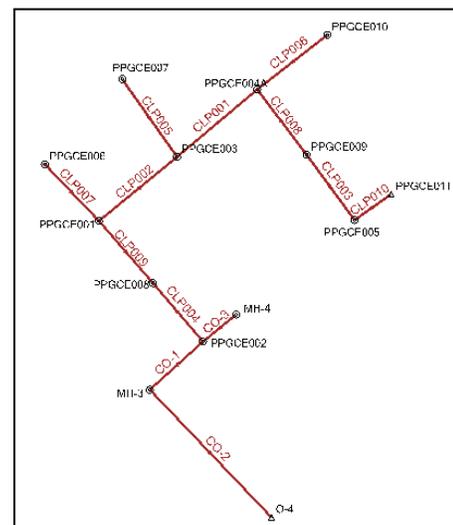


Figura 11. Localización de colectores en el modelo hidráulico.

Fuente: Elaboración propia.

ANÁLISIS DE RESULTADOS TOPOLÓGICOS

A renglón seguido se presenta un conjunto de salidas gráficas con las que se ilustró el cumplimiento de los siguientes criterios topológicos de la red.

Diámetro nominal mínimo permitido

A continuación, se presenta el diámetro nominal de las tuberías, con el fin de evidenciar de manera gráfica que en las redes de alcantarillado pluvial se diseñaron tramos de doce pulgadas de diámetro como mínimo y de diez pulgadas de diámetro como mínimo en las tuberías laterales (figura 12).



Figura 12. Resultados de diámetro nominal.
Fuente: Elaboración propia.

Coefficiente de Manning

En la siguiente ilustración se presentan los valores del coeficiente de Manning para el análisis hidráulico, los cuales se encuentran en función del material que transporta el caudal. Estos valores se definieron según la norma IC de drenaje superficial.

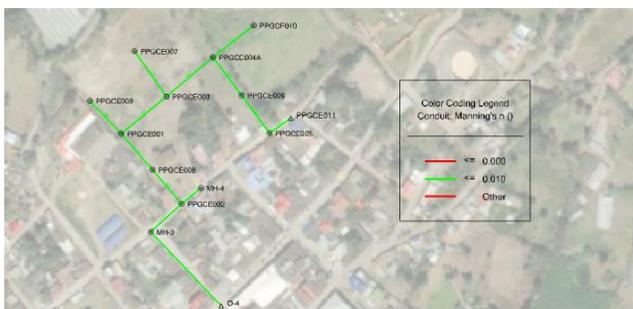


Figura 13. Resultados del coeficiente de Manning.
Fuente: Elaboración propia.

Profundidad de instalación de la tubería en alcantarillados

Como parte del análisis de resultados topológicos de la red, a continuación se ilustran los resultados de la profundidad a cota clave de instalación de los colectores. El diseño de los colectores se hizo con el fin de cumplir los valores mínimos permisibles de recubrimiento de estos en relación con la rasante definitiva. A continuación, se muestran los resultados de las profundidades inicial y final de los tramos.

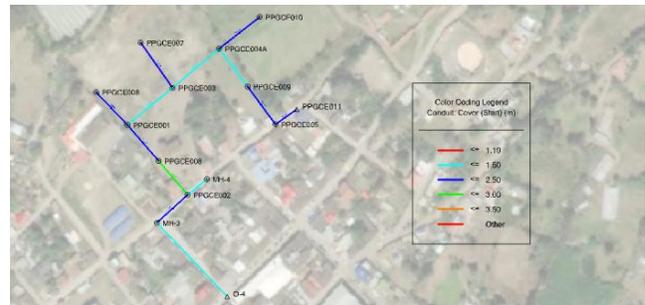


Figura 14. Resultados de la profundidad inicial de instalación.
Fuente: Elaboración propia.

De igual forma se presentan los resultados de profundidad final de los tramos (figura 15). Con esto se evidencia el cumplimiento de dicho aspecto de las normas de diseño.

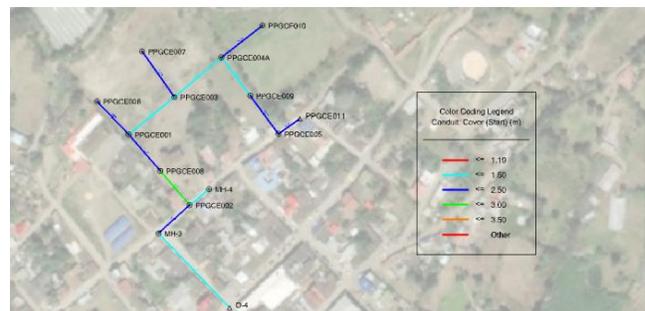


Figura 15. Resultados de la profundidad final de instalación.
Fuente: Elaboración propia.

ANÁLISIS DE RESULTADOS HIDRÁULICOS

A continuación, se presenta un conjunto de salidas gráficas que pretenden ilustrar el cumplimiento de los siguientes criterios hidráulicos de la red.

Criterios de autolimpieza en los alcantarillados pluviales

En la figura siguiente (figura 16) se puede observar con un código de colores en el que se resaltan con convenciones los tramos de alcantarillado pluvial que tengan un esfuerzo cortante en la pared de la tubería mayor o igual que 2.0 Pa, para la condición de operación con el caudal de diseño.



Figura 16. Resultados de criterios de autolimpieza.
Fuente: Elaboración propia.

Velocidad máxima en los alcantarillados pluviales

Más adelante se presenta una salida gráfica en la que se encuentran los tramos cuya velocidad máxima no sobrepase 5,0 m/s para el caudal de diseño. En el caso de que existan condiciones hidráulicas especiales y complejas, como las topografías con pendientes superiores al 30 %, colectores de gran diámetro iguales o superiores a 600 mm o caudales de flujo superiores a 500 L/s, se debe hacer la aclaración y ajustar el código de colores, señalando los tramos cuya velocidad máxima no sobrepase los límites recomendados para el material del ducto o de los accesorios que se van a emplear. Se debe dejar en claro que el flujo en los tramos no supera una velocidad de 10 m/s (figura 17).

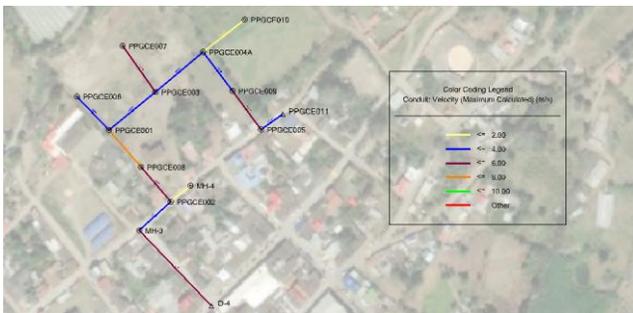


Figura 17. Resultados de velocidad máxima.
Fuente: Elaboración propia.

Relación máxima entre profundidad y diámetro de la tubería en los alcantarillados

Como complemento al análisis de resultados, a continuación se presenta una salida gráfica en la que se puede observar el valor de la profundidad del flujo para el caudal de diseño en cada uno de los colectores,

teniendo en cuenta que no debe superar un valor de 93 % del diámetro interno real de este, correspondiente a flujo lleno (figura 18).



Figura 18. Resultados de relación máxima entre profundidad y diámetro.
Fuente: Elaboración propia.

ANÁLISIS DE RIESGO DE INUNDACIÓN EN LA ZONA

El análisis de riesgo efectuado consistió en evaluar el comportamiento de los componentes hidráulicos del sistema diseñado, considerando diferentes periodos de retorno para el análisis. Los periodos de retorno que se incluyeron dentro del análisis fueron TR=2, 5, 10, 25, 50 y 100 años.

En el análisis se utilizó un factor de corrección de la frecuencia de los eventos (Cf), como modificador del coeficiente de escorrentía de la fórmula racional. La intención del factor de corrección es compensar el efecto reducido de la infiltración y otras abstracciones hidrológicas durante las tormentas menos frecuentes y de mayor intensidad. El factor de corrección por frecuencia de eventos se multiplica por el coeficiente de escorrentía (C), para producir un coeficiente de escorrentía ajustado.

El análisis consistió en calcular los valores de caudal y las respectivas variaciones porcentuales para los periodos de retorno, para posteriormente, con estos valores de caudal, hacer el cálculo de los anchos de inundación y los caudales remanentes. Lo anterior se realiza con el propósito de evidenciar la incidencia de la variación del periodo de retorno en el desempeño hidráulico de los sumideros, laterales y sistema de pozos y colectores del sistema de alcantarillado pluvial.

Con el ejercicio de análisis de riesgo de inundación en la zona, se puede concluir que para el caso más crítico, un cambio en el caudal de un 121 % provoca diferencias en los anchos de inundación de apenas un

36,91 %, por lo que se puede evidenciar que a causa de las características geométricas de la zona de estudio, particularmente debido a los altos valores de la pendiente longitudinal de las vías, no existe un riesgo considerable de inundación en la zona, dado que los anchos máximos calculados solo son superados en cuatro zonas y los valores se encuentran cerca del límite exigido por norma.

Por otro lado, en cuanto a los caudales remanentes calculados en función de cada uno de los periodos de retorno, se obtiene que un cambio en el caudal de un 121 % produce diferencias en los caudales remanentes incluso de un valor de 151 %, por lo cual se concluye que, en la zona de influencia del proyecto, no existe un riesgo inminente de inundación debido a las características geométricas de las vías.

Esto se comprobó calculando el ancho de inundación para los caudales de cada uno de los periodos de retorno mencionados, pero se evidenció que el cambio de los caudales remanentes era considerablemente alto y dependía en gran medida del caudal inicial analizado, por lo cual, al tener caudales remanentes mayores sin que necesariamente se afecten los anchos de inundación de la zona del proyecto, sí existirían implicaciones y un inminente riesgo de inundación para los sectores aguas abajo, los cuales son más planos, debido a que recibirían el caudal remanente del proyecto en cuestión.

Continuando con el análisis de riesgo, se procedió a evaluar las demás estructuras con los caudales efectivamente captados para el escenario crítico, es decir, para el periodo de retorno TR = 100 años. Como resultado de esto, se obtuvo que las tuberías laterales cuentan con la capacidad de transportar el caudal captado hacia los pozos de inspección. A continuación se presenta una tabla en la que se evidencia que la capacidad de las tuberías laterales es, en todos los casos, mayor que el caudal efectivamente captado por cada sumidero (tabla 2).

De igual manera, se procedió a realizar la modelación hidráulica de la red de alcantarillado transportando los caudales previamente determinados como captados por los sumideros y transportados por los laterales, con el objeto de observar el comportamiento del sistema de alcantarillado.

Más adelante se presenta el perfil de la línea más extensa del sistema (figura 19).

Tabla 2
Capacidad de tuberías laterales

Sumidero	Caudal captado	Qo tuberías laterales
ID	Q [l/s]	Qo (l/s)
SPGCE001-B1	41,23	84,61
SPGCE001-C1	19,46	230,42
SPGCE002-A1	44,06	84,61
SPGCE002-B1	23,84	84,61
SPGCE003-A1	56,82	84,61
SPGCE003-B1	22,63	197,86
SPGCE003-C1	20,70	171,44
SPGCE004-A1	45,97	84,61
SPGCE005-A1	9,63	138,75
SPGCE005-B1	23,66	134,23
SPGCE006-A1	34,71	141,00
SPGCE006-B1	29,68	92,95
SPGCE007-A1	27,54	161,40
SPGCE007-B1	31,84	84,61
SPGCE008-A1	27,45	156,73
SPGCE008-B1	60,38	84,61
SPGCE009-A1	35,03	84,61
SPGCE009-B1	9,28	84,61
SPGCE010-A1	25,38	84,61

Fuente: Elaboración propia.



Figura 19. Modelo de alcantarillado en un escenario crítico.

Fuente: Elaboración propia.

A partir de la modelación hidráulica del sistema de alcantarillado se observó cómo la relación de llenado no se cumple en la mayoría de los tramos del sistema, e incluso presenta entrada en carga de algunos colectores del sistema y almacenamiento en los pozos de inspección, pero sin dar resultados de salida de flujo por las

bocas de los pozos, lo cual indica que no hay riesgo de inundación en la zona.

Estos tramos y pozos pertenecen a la infraestructura aguas abajo del punto de entrega, confirmando las afirmaciones realizadas en el análisis previo a la modelación, en las que se mencionó que, debido a los altos valores de la pendiente longitudinal de las vías del caso de estudio, no existe un riesgo considerable de inundación en el área de influencia directa. Sin embargo, sí existirían implicaciones y un posible riesgo de inundación para los sectores aguas abajo, los cuales son más planos, debido a que recibirían el caudal remanente del proyecto en cuestión.

CONCLUSIONES

Conclusión general

- Mediante el presente trabajo de grado se diseñó una guía metodológica teórica y de aplicación para la realización de diseños óptimos de obras de drenaje superficial, con la utilización de sumideros en vías urbanas de bajo nivel de tráfico, unificando los criterios existentes en la normativa vigente.

Conclusiones específicas

- La búsqueda, lectura y análisis preliminar de la bibliografía encontrada en relación con las guías metodológicas de diseño de sistemas de drenaje superficial, propuestas por las entidades prestadoras de servicios públicos en el país y las guías internacionales, permitió establecer como base del análisis comparativo el documento de la Circular 22 de la Federal Highway Administration, perteneciente al Departamento de Transporte de Estados Unidos.
- El análisis comparativo de las normas de diseño de sistemas de drenaje superficial de las empresas de servicios públicos de las principales ciudades de Colombia, con base en la matriz de comparación por múltiples criterios, permitió evidenciar que la norma de Triple A no presenta una base para el diseño de estos sistemas de drenaje superficial. Además, se pudo establecer una base común entre las normas nacionales y las internacionales, que contribuyó en forma clara a la construcción de la guía metodológica materia del presente trabajo. Conceptualmente, se puede afirmar que el uso de la matriz como herra-

mienta con el objetivo de hacer un análisis comparativo de los documentos normativos vigentes de la nación frente a los documentos internacionales permitió establecer aciertos y carencias de dichas normas.

- Se evidenció que la normativa de las empresas de servicios públicos en Colombia no tiene un completo esquema descriptivo de los criterios definidos para el diseño de drenaje pluvial, como la importancia de la planificación del sistema antes de comenzar el diseño, los métodos y procedimientos hidrológicos que hay que considerar para el diseño del drenaje, lo que se debe tomar en cuenta en el drenaje de la superficie, el caudal y la capacidad de los sumideros, las relaciones de diseño para los canales y las consideraciones hidráulicas para los sumideros, pozos de inspección y cámaras de empalme, que son las estructuras que componen los sistemas de drenaje superficial.
- La mayoría de las normas existentes en Colombia no tienen una descripción de las ecuaciones utilizadas para el cálculo de la capacidad de interceptación de los sumideros, tanto en pendiente como en puntos bajos o batea. La norma NS-047 de la EAAB presenta una adaptación de las ecuaciones utilizadas en la Circular 22 de la Federal Highway Administration, perteneciente al Departamento de Transporte de Estados Unidos. Esta adaptación se hace debido a que la circular en su formulación establece unos tipos de rejilla definidos en Estados Unidos con unas gráficas realizadas en pruebas de laboratorio, que determinan el factor de obstrucción y la eficiencia de la rejilla en condiciones reales y diferentes tipos de pendientes, tipos de rejilla que no están definidos en el territorio colombiano; de igual manera, a pesar de que la EAAB define algunos tipos de rejillas, no se encuentra un estudio que determine su eficiencia real. Por tal razón, para calcular la eficiencia de la rejilla, según la norma de la EAAB, se hace uso de unos parámetros de aproximación que dependen de las características geométricas de la rejilla y de los parámetros geométricos de la vía; así mismo, se definen unos aspectos que hay que considerar para el factor de obstrucción de la rejilla, teniendo en cuenta el tipo de sumidero definido, que carece de sustento teórico. Por lo anterior, es importante que se definan unos tipos de rejilla aplicables en el

territorio colombiano y se abordó de manera más detallada un estudio de cálculo de factor de obstrucción y eficiencia de las rejillas, por medio de pruebas de laboratorio que simulen las condiciones reales en diferentes tipos de pendientes.

- Se definieron los procesos computacionales para la determinación de cada uno de los parámetros geométricos e hidráulicos utilizados en el análisis de sumideros, mediante la utilización de *software* convencionales. Los parámetros incluidos dentro del análisis fueron determinación de áreas de drenaje, coeficiente de escorrentía, pendiente longitudinal, transversal, ancho y bombeo de la vía. La determinación de esos parámetros se propuso mediante ArcMap de ArcGIS. Se debe aclarar que el uso de estos procedimientos es sugerido, por lo que no constituye camisa de fuerza para la aplicación de la guía metodológica construida en este trabajo de grado.
- Se aplicó la metodología propuesta a un caso de estudio realizando el diseño del sistema de drenaje superficial en las vías de la zona de expansión proyectada entre las carreras 4.^a y 7.^a, entre la calle 4.^a y la vía a la vereda Cacique, en la cabecera municipal de Ubaque (Cundinamarca). El diseño obtenido cumple con las normas y lo especificado en la *Guía de diseño*, configurándose como un sistema eficiente para transferir el agua de la escorrentía superficial al sistema subterráneo de alcantarillado. Además, muestra que puede manejar eventos superiores a los de diseño en forma segura, pues no presenta

riesgos de posible inundación en el área de diseño, sino solamente en sectores aguas abajo, donde los caudales remanentes pueden discurrir con láminas más altas en las vías, debido a las pendientes más bajas de esas zonas del municipio.

REFERENCIAS

- Departamento Nacional de Planeación, Subdirección Territorial y de Inversiones Públicas (2018). Lineamientos para el diseño de sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS). Bogotá: Departamento Nacional de Planeación.
- Emcali EICE ESP, NDC-SE-RA-015 (2011). Norma técnica de recolección de aguas residuales y lluvias - sumideros y/o captación superficial de aguas lluvias en vías urbanas. Cali: Emcali EICE ESP.
- Empresa de Acueducto, Agua y Alcantarillado de Bogotá NS-047 (2021). Sumideros, versión 6.0. Bogotá: EAAB, Norma Técnica.
- Empresas Públicas de Medellín, ESP (2013). Normas de diseño de sistemas de alcantarillado de las Empresas Públicas de Medellín, ESP. Medellín: Empresas Públicas de Medellín, ESP.
- Instituto Nacional de Vías (2009). Manual de drenaje para carreteras. Bogotá: Instituto Nacional de Vías.
- Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo (2015). 5.2-IC. Drenaje superficial. Madrid: Ministerio de Fomento.
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (2017). Resolución 0330. Bogotá: Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (2017).
- Murad Rivera, r. (2009). *Estudio sobre la distribución espacial de la población en Colombia*. Santiago de Chile: Cepal.
- Goudie, A.S. (2009). *The human impact on the natural environment: past, present and future*.
- Ruiz, M., González, P., Aristizábal, J., Oliva, R., Pareja, A. y López, J.D. (2000). PI-IN-DC-2. Normas y especificaciones técnicas para la construcción de obras de acueducto y alcantarillado. Barranquilla: Triple A S.A., ESP.
- Sedano Cruz, K., Carvajal Escobar, Y. Ávila Díaz, Á.J. (2013). Análisis de aspectos que incrementan el riesgo de inundaciones en Colombia. *Luna Azul*, ISSN 1909-2474, pp. 219-238.
- U.S. Department Transportation (2009). *Urban Drainage Design Manual*. Washington D.C.: National Highway Institute.

Modelación del flujo en 3D en el proceso de sedimentación primaria para el tratamiento de aguas residuales domésticas utilizando Ansys-Fluent

3D flow modeling of the primary sedimentation process for domestic wastewater treatment using Ansys-Fluent

MIGUEL ÁNGEL DÍAZ GARCÍA¹ - GERMÁN RICARDO SANTOS GRANADOS²

1. Magíster 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.

miguel.diaz-ga@mail.escuelaing.edu.co - german.santos@escuelaing.edu.co

Recibido: 24/11/2021 Aceptado: 10/01/2022

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

Resumen

El artículo desarrollado se enfoca en la puesta en práctica de la dinámica de fluidos computacional aplicada a la modelación tridimensional en estado no permanente de un sedimentador primario diseñado para el tratamiento de las aguas residuales de un municipio tipo de la región occidental de Colombia (CFD), con el objetivo de encontrar la eficiencia de remoción de sólidos suspendidos totales (SST) y describir el comportamiento hidrodinámico de la unidad empleando un enfoque euleriano, aplicando el modelo de mezcla integrado en el *software* Ansys Fluent (*Mixture Model*), un modelo multifásico simplificado, con el cual se describió el comportamiento de las fases granulométricas del agua residual doméstica en el clarificador diseñado y el modelo de turbulencia k- ϵ para simular los efectos hidrodinámicos generados en el flujo en el interior de la unidad, tomando como elemento geométrico de partida la configuración típica de un sedimentador primario circular con pantallas de flujo deflectoras.

Palabras claves: sedimentación primaria, modelo multifásico, dinámica de fluidos computacional (CFD), modelación de turbulencia.

Abstract

The developed article focuses on the application of computational fluid dynamics applied to the three-dimensional modeling in non-steady state of a primary settler designed for the treatment of wastewater from a typical municipality in the western region of Colombia CFD, to find the removal efficiency of total suspended solids (TSS) and describe the hydrodynamic behavior of the unit using a Eulerian approach. Applying the mixing model integrated in the Ansys Fluent software (*Mixture Model*), a simplified multiphase model with which the behavior of the granulometric phases of the domestic wastewater in the designed clarifier was described and the k- ϵ turbulence model to simulate the hydrodynamic effects generated in the flow inside the unit, taking as starting geometric element the typical configuration of a circular primary settler with deflecting flow screens.

Keywords: primary settling, multiphase model, computational fluid dynamics (CFD), turbulence model.

INTRODUCCIÓN

Existen varios elementos matemáticos para elaborar la modelación numérica de los fluidos en diferentes estructuras y condiciones físicas. En el mercado se ofrecen *softwares* como Flow 3D, OpenFoam, Ansys-Fluent, Star cmm+ y Autodesk CFD (Berrío, 2015), los cuales permiten resolver las ecuaciones de transporte y conservación de masa o continuidad, por medio de métodos de discretización.

De estos *softwares* existentes el que presenta mayor soporte técnico, un entorno más simplificado de cálculo y acceso libre en alguna de sus versiones es el Ansys-Fluent. Este *software*, además de que permite evaluar el comportamiento de los fluidos en diferentes condiciones, incluye el ecuacionamiento necesario para modelar la interacción partículas-fluido que ocurre en las unidades de tratamiento preliminar, primario y secundario que constituyen los sistemas de tratamiento de aguas residuales. De esta manera, es posible mejorar el diseño y la operación de las unidades de tratamiento, con el fin de optimizar su funcionamiento y garantizar una adecuada gestión de los vertimientos.

En razón de que la Universidad Escuela Colombiana De Ingeniería Julio Garavito cuenta con un convenio y soporte asistido por los desarrolladores del *software* Ansys-Fluent, en esta investigación se empleó dicha herramienta para evaluar el comportamiento hidrodinámico de una unidad de sedimentación primaria convencional y su eficiencia en la reducción de sólidos suspendidos, todo esto con el propósito de identificar si las estructuras convencionales son una solución adecuada para realizar el tratamiento primario del agua residual.

Para la estructuración del modelo del sedimentador primario evaluado, se tomó como referencia una población y se efectuó el diseño geométrico e hidráulico de la unidad. Una vez obtenidas las dimensiones, se configuró la geometría en tres dimensiones mediante los *softwares* Autodesk Civil 3D y Space Claim.

Posteriormente, se discretizó el volumen modelado, el cual se considera como la región interna o la región de flujo del sedimentador primario.

Para la simulación del escenario inicial se consideró una serie de submodelos, los cuales forman parte de la configuración del programa, donde se destacan el modelo de mezcla, el modelo de turbulencia y los parámetros iniciales para las condiciones de frontera.

Para la evaluación del modelo se consideró emplear diferentes *time step size* y discretizaciones de la malla, con el objetivo de generar un modelo que se ajuste en relación con el tiempo computacional y el grado de acercamiento a los datos de validación del modelo. Estos valores de validación se tomaron con base en otros estudios elaborados.

En el modelo desarrollado se tuvo en cuenta una composición granulométrica de acuerdo con las características propias del agua residual doméstica, tomando como fuente de referencia las fracciones de volumen que componen la fase de sólidos, siendo los diámetros de 80 μm , 50 μm y 10 μm los más representativos de la composición total en el agua residual, como lo expone en su estudio Enríquez (2019).

El modelo de mezcla del *software* Ansys Fluent empleado permite efectuar un análisis de las fases del agua residual considerando las fracciones de volumen, tomando como fases secundarias los tres diámetros de partículas que se analizaron y como fase primaria el agua.

La eficiencia y el comportamiento hidrodinámico en el sedimentador primario dimensionado se evaluaron tomando las fracciones de volumen a la entrada y a la salida, una vez verificadas la estabilidad y la convergencia del modelo.

El estudio se enfocó en describir los procesos hidrodinámicos que determinan la eficiencia en la remoción de las partículas, para finalmente proponer escenarios que se pueden desarrollar en futuros estudios con la geometría diseñada, para incrementar la eficiencia en el proceso de sedimentación primaria.

METODOLOGÍA

En la metodología aplicada se considera una serie de pasos basados en las actividades que se deben ejecutar para realizar la evaluación del comportamiento hidrodinámico y la eficiencia de remoción de los sólidos suspendidos totales de un sedimentador primario convencional para el tratamiento del agua residual municipal, por medio del *software* Ansys Fluent.

Para el desarrollo de la presente investigación se consideraron los siguientes pasos (figura 1).

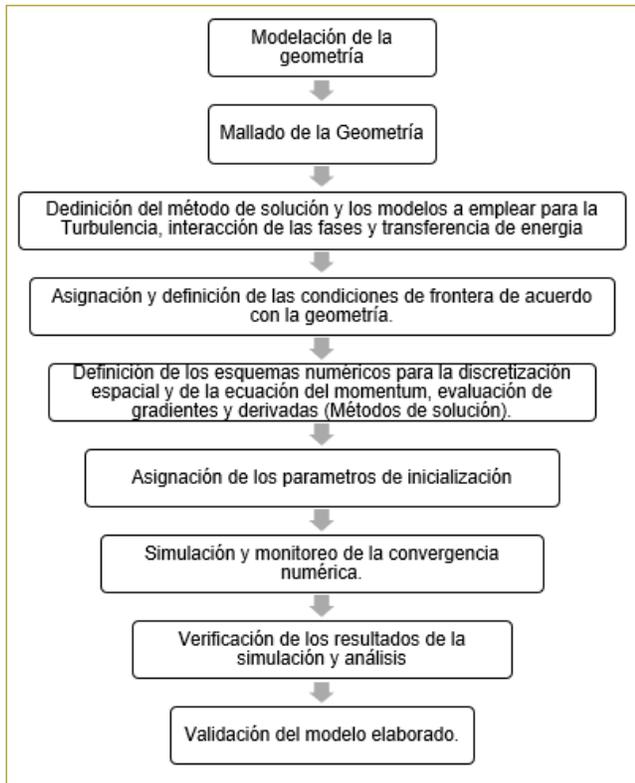


Figura 1. Pasos metodológicos para la modelación del sedimentador primario.

RESULTADOS

Las simulaciones desarrolladas mediante el modelo de turbulencia k-épsilon estándar y el modelo de interacción de fases denominado modelo de mezcla en el programa Ansys Fluent se analizaron mediante un estudio de independencia para la malla, empleando diferentes discretizaciones de la geometría y varios pasos de tiempo en las simulaciones.

Análisis de discretizaciones de la geometría

Como producto del desarrollo del análisis de estas discretizaciones se obtuvieron tres mallados, los cuales se muestran más adelante (figura 2 y tabla 1): el número de elementos, el tipo de elementos y el tiempo computacional que se tomó para desarrollar las simulaciones para cada una de las discretizaciones.

El modelo se elaboró con un computador portátil de 4 núcleos y 16 GB de memoria RAM. Los tiempos obtenidos para cada una de las simulaciones, el tipo de elementos y la cantidad total de elementos de cada malla se presentan en la tabla siguiente (tabla 1).

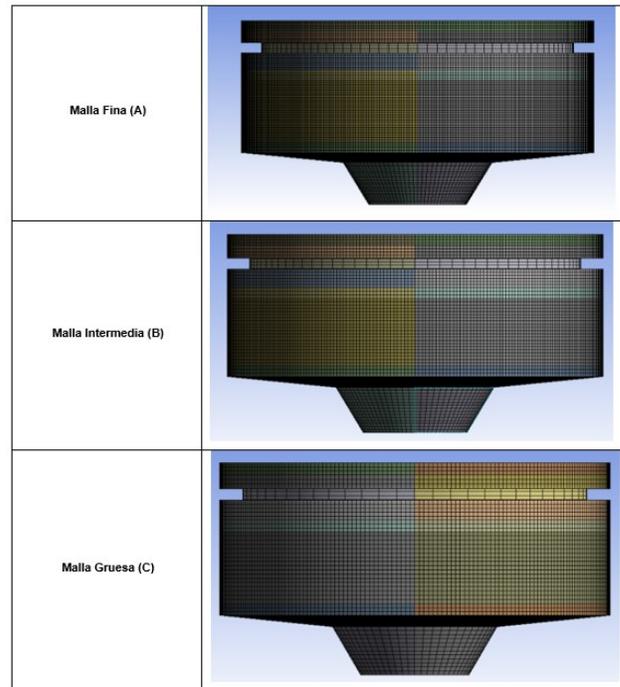


Figura 2. Mallas generadas para la modelación (A. Malla fina; B. Malla intermedia; C. Malla gruesa).

Tabla 1

Número de elementos para las mallas generadas y tiempos de cálculo computacional

Observación	Malla fina	Malla intermedia	Malla gruesa
Tipo de elementos	Hexaedros	Hexaedros	Hexaedros
Cantidad total de elementos	474.864	282.976	143.364
Tiempo de cómputo	14 horas	10 horas	6 horas

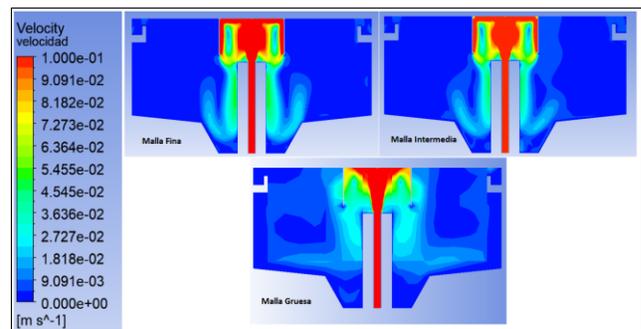


Figura 3. Perfil de contorno de velocidades en rango ajustado para cada discretización.

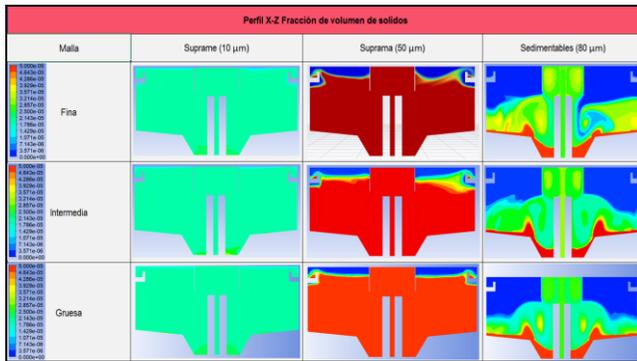


Figura 4. Fracción de volumen corte ZX, rango ajustado para cada discretización.

Como se puede observar (figuras 3 y 4), las tres mallas empleadas, a pesar de tener una cantidad de elementos diferentes presentan patrones de flujo similares, pero se diferencian en el grado de detalle. La malla más gruesa no resuelve adecuadamente la distribución de velocidades en la proximidad del baffle en la entrada del sedimentador, por lo que no describe en forma apropiada el comportamiento hidrodinámico de la unidad.

En regiones como la anteriormente descrita, y las secciones en las cercanías del fondo de la estructura, el tamaño de los elementos es mayor en comparación con el de las otras dos mallas, por lo que el grado de difusión numérica es mayor y, por ende, el comportamiento hidrodinámico del tanque no se describe adecuadamente.

Para la malla más fina y la intermedia, se considera que el modelo presenta una difusión numérica mucho más baja, puesto que se pueden observar patrones de flujo muy similares en las regiones presentadas en el perfil ZX.

En lo que respecta a la fracción de volumen, se puede observar que para la correspondiente a 10 μm los perfiles son similares; sin embargo, para 50 μm y 80 μm se nota la variación en el comportamiento de las partículas en la región de salida y las zonas de recirculación para los sólidos sedimentables.

En términos generales, se puede observar la similitud entre las mallas intermedia y gruesa en lo que respecta al componente hidrodinámico y las fracciones de volumen.

Análisis de pasos de tiempo

En forma complementaria al análisis de la malla, se efectuó el análisis del intervalo del tiempo para la eje-

cución del modelo. Para dicho análisis se seleccionó un tiempo de corrida de 78 minutos y 120 minutos con diferentes pasos de tiempo, los cuales se seleccionaron teniendo en cuenta que el tiempo computacional del modelo fuera razonable.

Para el presente estudio se emplearon valores de 2, 3 y 4 segundos, y el tiempo computacional de las simulaciones fue de 14, 10 y 6 horas, respectivamente.

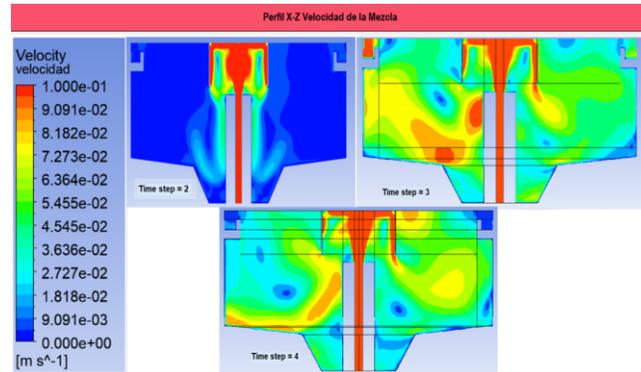


Figura 5. Perfil de velocidades para *time step* de dos, tres y cuatro segundos en el rango ajustado.

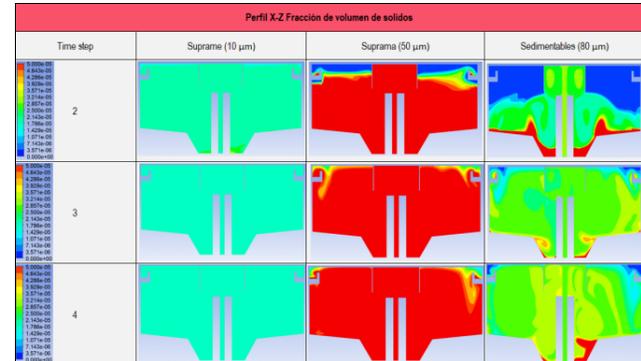


Figura 6. Fracción de volumen corte ZX, rango ajustado para los pasos de tiempo de dos, tres y cuatro segundos.

Como se puede ver en las figuras anteriores (figuras 5 y 6), cuando el valor del paso de tiempo se incrementa, los resultados obtenidos tienen una mayor desviación con respecto al paso de tiempo de dos segundos. De igual manera, la convergencia del modelo empieza a hacerse menos eficiente y en varios lapsos iterativos el modelo diverge para el paso de tiempo de cuatro segundos, generando valores de fracción de volumen superiores en la salida, en comparación con los de la entrada, incrementando así la concentración de sólidos.

De acuerdo con lo anterior, el modelo presenta valores en los residuales por fuera del rango aceptado (entre 1×10^{-6} y 1×10^{-4}) para la condición de convergencia, lo cual permite determinar que para el paso de tiempo de cuatro segundos el modelo es divergente.

Para el paso de tiempo de tres segundos se obtiene una concentración de sólidos con una desviación aceptable en relación con los resultados obtenidos para el valor de dos segundos; sin embargo, se genera una desviación del 22 % respecto a los resultados obtenidos con un paso de tiempo de dos segundos.

Para el paso de tiempo de cuatro segundos se puede observar cómo las partículas de 80 μm y 50 μm no se comportan en forma precisa en su fracción de volumen y muestran una diferencia muy amplia con respecto al paso de tiempo de dos segundos (figura 6).

Al incrementar el paso de tiempo el modelo genera una dispersión numérica muy elevada, lo cual provoca una tendencia distinta en los resultados obtenidos para la fracción de volumen.

En lo que respecta al comportamiento hidrodinámico del modelo para los pasos de tiempo estudiados (figura 5), se observa que las velocidades en los segmentos intermedios en el sedimentador primario son diferentes al incrementar el valor de dos a tres segundos; esto indica que para valores superiores o iguales a tres segundos los resultados no son representativos de una unidad de sedimentación real.

Para los pasos de tiempo de tres y cuatro segundos se obtienen resultados similares en el comportamiento hidrodinámico, sin embargo, los valores de velocidad tienen magnitudes superiores sobre la región de salida en la simulación efectuada con un paso de tiempo tres segundos.

Para efectuar un análisis cuantitativo de la desviación de los resultados para cada uno de los tres pasos de tiempos evaluados se tomó la concentración a la entrada y salida del tanque sedimentador, valor con el cual es posible estudiar de manera precisa el grado de aproximación a la solución de dos segundos de los valores evaluados.

Más adelante se presenta la desviación obtenida en los resultados para los pasos de tiempo de tres y cuatro segundos respecto a los datos obtenidos para un paso de tiempo de dos segundos.

Según los resultados obtenidos con la configuración para el paso de tiempo de dos, tres y cuatro

segundos, es posible determinar que el grado de desviación se incrementa considerablemente cuando el paso de tiempo es mayor de tres segundos. De acuerdo con lo anterior no es adecuado seleccionar los valores de tres y cuatro segundos para el desarrollo del modelo definitivo.

Tabla 2

Análisis de los resultados obtenidos para los pasos de tiempo empleados mediante la desviación porcentual.

Condición de frontera	Concentración de SST			Desviación	
	Time step 2s	Time step 3s	Time step 4s	Time step 3s	Time step 4s
Inlet	144.50	144.50	144.50	0.000	0.000
Outlet	65.41	79.62	163.38	0.22	1.49
Rango residuales	1×10^{-6} - 1×10^{-4}	1×10^{-4} - 1×10^{-2}	1×10^{-4} - 1×10^{-1}		

Para efectos de la presente modelación, es importante tener en cuenta que con los resultados se busca describir en la forma más adecuada y aproximada posible el comportamiento real de una estructura de sedimentación primaria, con el objetivo de determinar el desempeño de la unidad diseñada.

Una vez evaluados y analizados los resultados obtenidos, es posible afirmar que el modelo presenta una mejor aproximación numérica mediante un paso de tiempo de dos segundos, puesto que la solución permite alcanzar una condición de convergencia y estabilidad; de este modo, se decide emplear un paso de tiempo de dos segundos para el modelo.

Patrones de flujo y perfiles de velocidad

Para el estudio de los patrones de flujo se empleó el módulo de resultados de Fluent, el cual permite revisar las líneas de corriente, trayectorias y perfiles de velocidad dentro de la región considerada para la modelación del sedimentador.

Para el análisis hidrodinámico se estimó que las regiones que se debían estudiar las comprendidas en la estructura de sedimentación, teniendo en cuenta la entrada, la ventana de acceso al tanque, la sección de encuentro con la pantalla, la tolva, la región de flujo

horizontal y la región de salida sobre el vertedero perimetral.

En cada una de estas secciones se efectuó el respectivo análisis del patrón de flujo, de acuerdo con lo obtenido a partir del modelo.

Posteriormente, se observa el comportamiento del fluido sobre la región de ingreso, donde se observan las magnitudes más grandes para la velocidad una vez transcurrido el tiempo de retención en la unidad de sedimentación primaria; así mismo, se presenta una escala ajustada de 0 a 0,1 m/s (figura 7).

Sobre la región de la ventana de acceso o transición se identifica cómo el flujo inmediatamente empieza a reducir la velocidad inicial, en tanto que las líneas de corriente generan un movimiento ascensional del fluido hasta la región superior de la estructura.

En este punto, la trayectoria de flujo pierde velocidad hasta encontrarse con la región delimitada por el baffle o pantalla deflectora del sedimentador. En esta zona se pueden observar la recirculación del flujo y la conformación de zonas donde se genera la aglomeración de partículas, lo que permite incrementar su diámetro y aumentar la velocidad con la cual se decantan (figura 8).

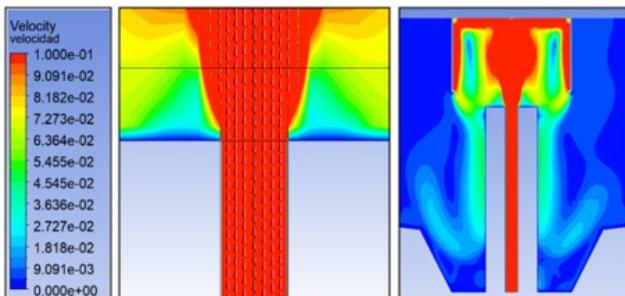


Figura 7. Perfil de flujo región de entrada.

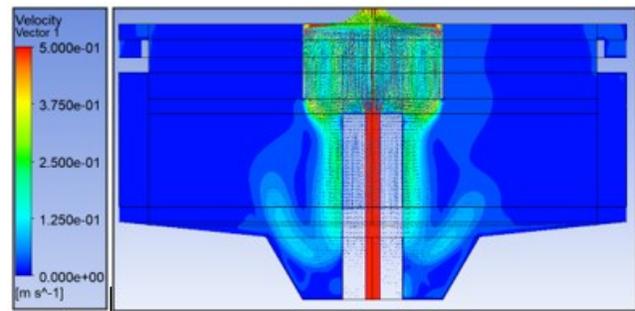


Figura 8. Patrón de flujo sección pantalla.

En la figura siguiente (figura 9) se presentan los perfiles de flujo en la región de entrada para el campo de velocidades.

Para la parte intermedia, o región horizontal de flujo en la estructura de sedimentación primaria, el flujo se comporta de tal manera que las velocidades son muy próximas a cero y las partículas más pesadas, mayores de $50 \mu\text{m}$, tienen a mantenerse decantadas y su resuspensión es casi mínima. Además, se presenta en detalle el comportamiento de las zonas cercanas a las paredes laterales del tanque (figura 10).

Sobre la sección del vertedero de salida, se puede observar un rango de velocidades menores de 0,1 m/s. Como se puede observar (figura 11), las tendencias de flujo sobre la región de salida son determinadas por los esfuerzos cortantes generados sobre las paredes del canal perimetral, donde las velocidades son muy próximas a cero.

En general, las regiones de flujo analizadas en la estructura de sedimentación primaria permiten determinar que a lo largo de la unidad la velocidad de flujo

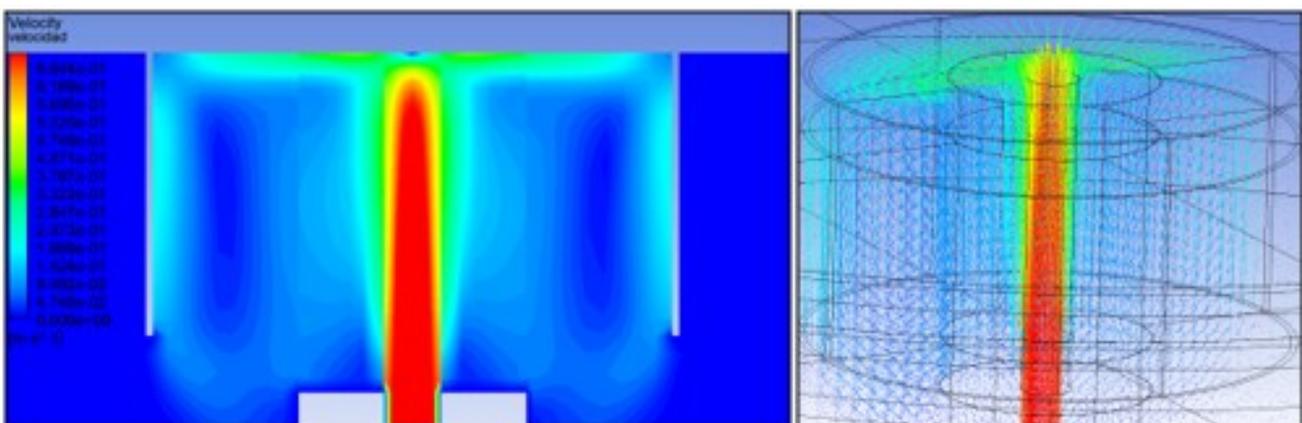


Figura 9. Perfil de flujo región de entrada.

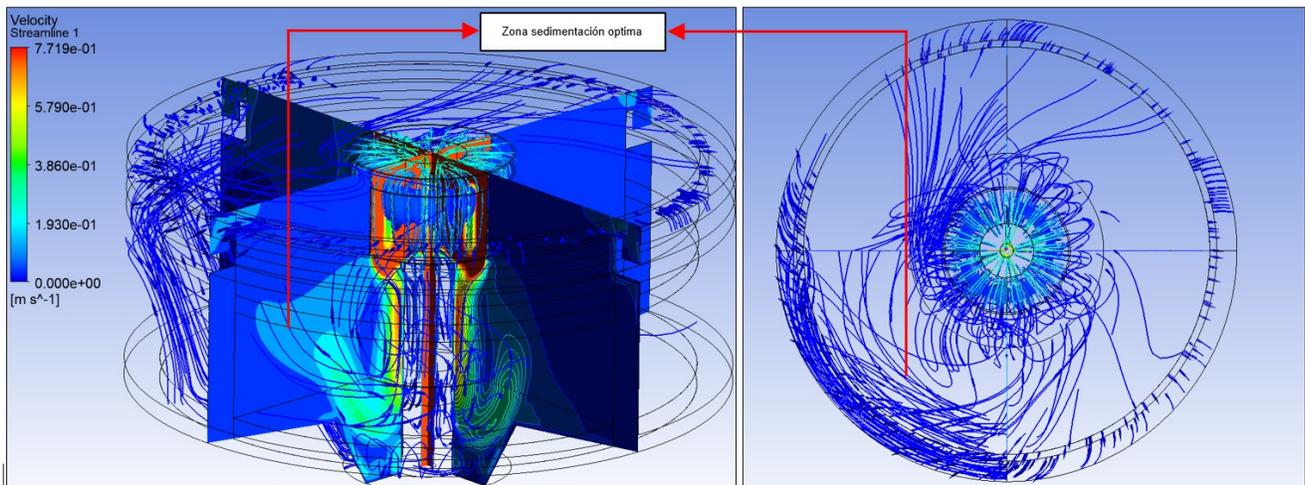


Figura 10. Líneas de corriente en las regiones extremas del tanque.

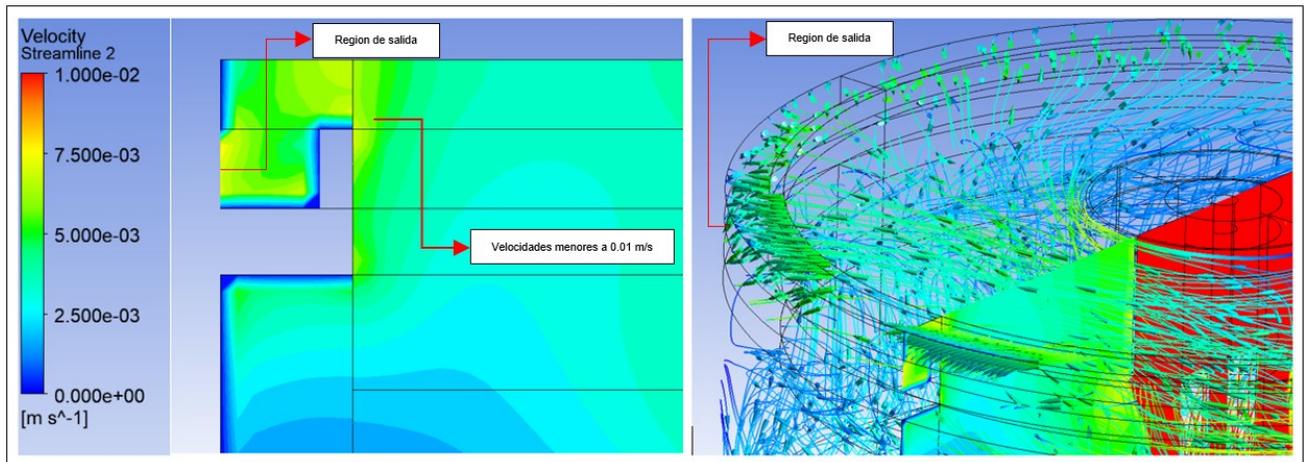


Figura 11. Líneas de corriente en la región de salida.

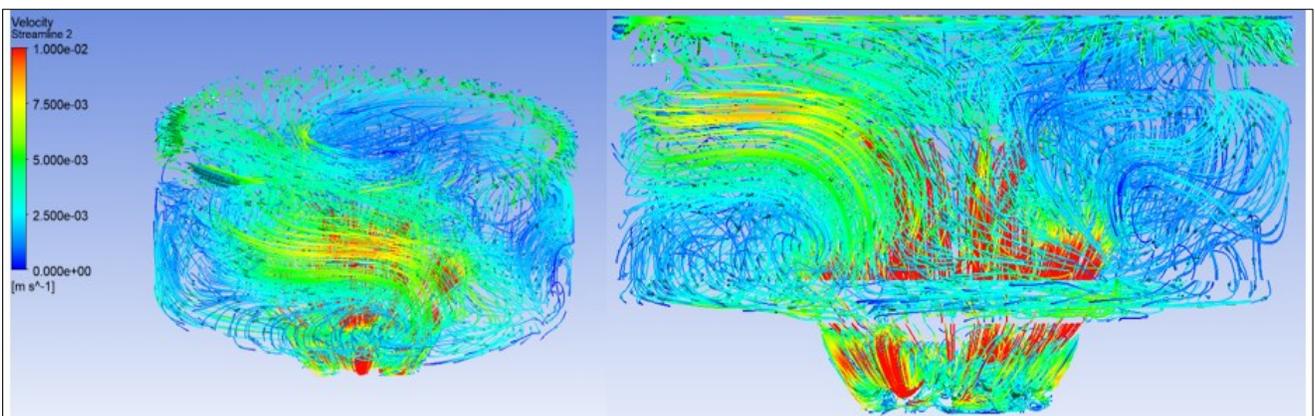


Figura 12. Patrones generales de flujo.

se ve reducida a causa de los elementos de disipación de energía, los giros y patrones de corriente que toma el flujo gracias a la geometría de la unidad, lo cual permite determinar que desde el punto de vista hidrodinámico las partículas reducirán su velocidad, elemento que ayuda a que el sedimentador opere adecuadamente. A continuación se presentan todos los patrones de flujo a lo largo del dominio computacional considerado para la modelación del sedimentador primario (figura 12).

Eficiencia de sedimentación

Para evaluar la eficiencia de sedimentación de las partículas en la estructura, de acuerdo con los valores obtenidos mediante el modelo, se analizó el flujo másico entrante y saliente de la estructura, además de la fracción de volumen y las concentraciones.

Para el análisis de la sedimentabilidad en el tanque se consideran tres diámetros de partículas (10 μm, 50 μm y 80 μm), los cuales permiten determinar el rango de eficiencia de remoción de partículas de diferentes tamaños en la estructura.

Para el análisis se presenta la figura siguiente (figura 13), la cual permite observar qué sucede con la fracción de cada uno de los rangos de partículas evaluados.

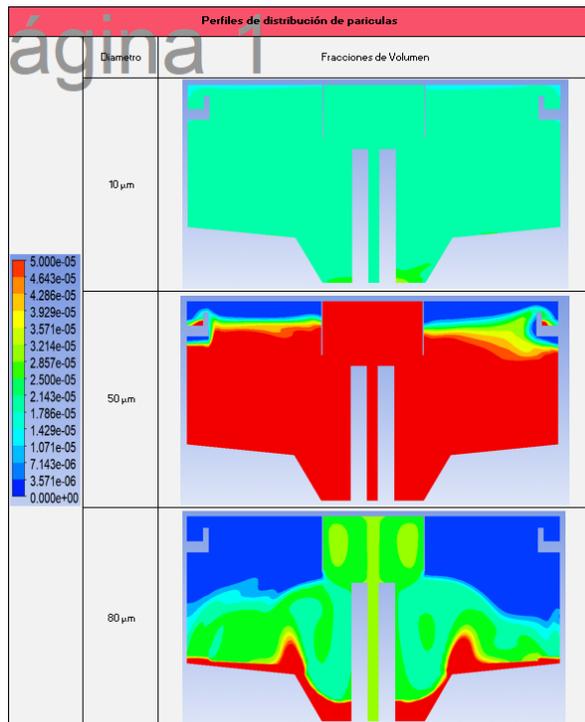


Figura 13. Patrones de fracción de cada uno de los rangos de partículas evaluados.

La distribución de partículas a lo largo del dominio de la estructura de sedimentación varía en función del diámetro de las partículas; define un claro patrón de sedimentación, muy eficiente para las partículas mayores de 80 μm, y se reduce para las de 50 μm, en tanto que mayoría de las partículas de menos de 10 μm no son retenidas en la estructura de sedimentación dimensionada.

Tabla 3

Fracciones de volumen para los diámetros de partículas analizados

Fraciones de volumen outlet			
Sólidos suspendidos totales (SST)/mg/L	65.41		
Nombre de partículas	Diámetros tomados	Fracción de volumen	Densidad de partículas
Suprame	10 μm	0,0000179079	1396,534 kg/m ³
Suprama	50 μm	0,0000284939	1396,534 kg/m ³
Sedimentables	80 μm	0,0000004332	1396,534 kg/m ³

La eficiencia de remoción para cada una de las fases evaluadas está dada en función de su diámetro, mostrando que a mayor diámetro mayor es la eficiencia de remoción en el sedimentador, por lo que el modelo obtenido es totalmente funcional y coherente con lo planteado para la teoría de sedimentación, de acuerdo con Metcalf and Eddy Inc. (2003) (tabla 4).

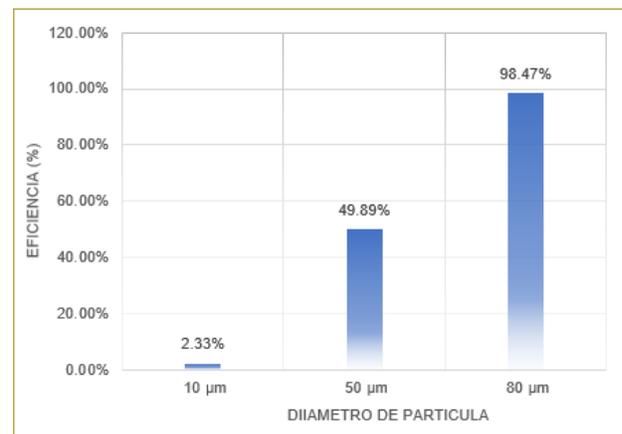


Figura 14. Eficiencia de remoción para los diámetros de partículas evaluados.

Tabla 4

Eficiencia de remoción para las fases particuladas

Eficiencia		
Nombre de partículas	Diámetros tomados	Eficiencia de remoción
Suprame	10 μm	2,33 %
Suprama	50 μm	49,89 %
Sedimentables	80 μm	98,47 %

Para analizar el comportamiento en el fondo del tanque sedimentador se efectuaron gráficos de contorno de las fracciones de volumen en la tolva y en los planos ZX y ZY de la estructura, tomando un rango ajustado para poder comparar los resultados obtenidos para las tres fases. A renglón seguido se presentan los resultados obtenidos (figura 15).

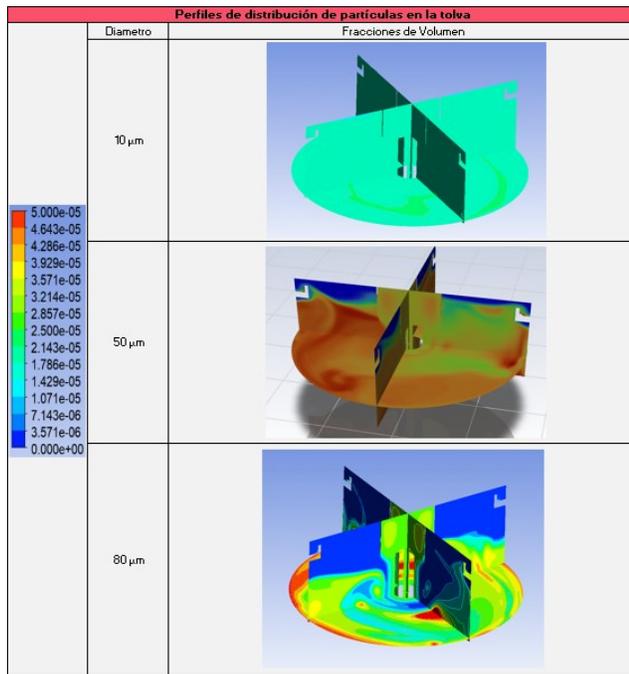


Figura 15. Patrones generales para las fracciones de volumen de 10, 50 y 80 μm .

Al observar la figura siguiente (figura 16), se puede determinar que las partículas denominadas sedimentables (80 μm) tienen una velocidad de sedimentación aceptable debido que en el efluente la concentración es un 98,47 % inferior a la concentración del afluente. La mayor parte de la fracción de volumen se encuentra depositada sobre la región de la tolva.

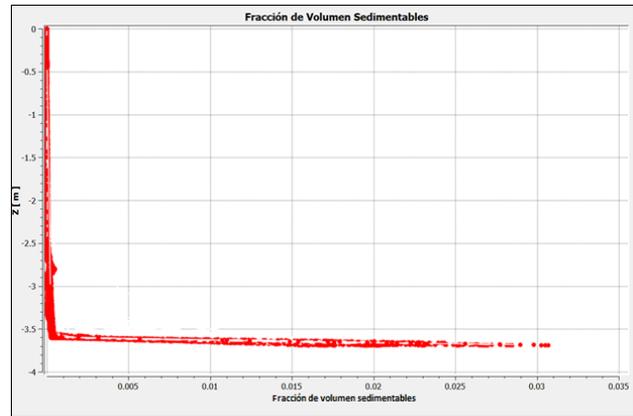


Figura 16. Fracción de volumen de partículas de 80 μm .

Energía cinética turbulenta

Para el análisis de la energía cinética turbulenta, se toman en cuenta la tasa de disipación de energía del modelo de turbulencia y la energía cinética turbulenta en el rango global y un rango ajustado.

Para las zonas cercanas a la pantalla deflectora y la ventana de acceso a la estructura se pueden observar los valores más altos para la energía cinética turbulenta, producidos por la variación en el área de la sección de flujo. Adicionalmente, en las regiones donde el fluido toma una trayectoria en dirección a la tolva del tanque se genera un valor considerable, teniendo en cuenta que no se produce una disipación absoluta e instantánea de la energía cinética del fluido.

Cuando en las estructuras de sedimentación se presentan valores de energía cinética altos, superiores a $0,0025 \text{ m}^2/\text{s}^2$, se considera la generación de zonas de resuspensión de partículas, teniendo en cuenta que en la trayectoria el fluido cuenta con energía suficiente para desplazar las partículas más livianas en el tanque en sentido atencional o fuera del rango de sedimentación, como lo expone Enríquez (2019).

Para aumentar la eficiencia de remoción de las partículas más finas, con diámetros de 10 μm y menores, es necesario considerar la disminución de la energía cinética turbulenta que el fluido tiene durante el recorrido sobre la región de la pantalla disipadora, por lo que es posible considerar la modificación u optimización de los baffles que permiten reducir la energía que el fluido trae al momento de ingresar a la unidad.

Sobre las regiones del manto de lodo o fondo del tanque, hay que tomar en cuenta que la energía y la

recirculación del flujo, promovido por una baja tasa de disipación de energía, provocan problemas en la extracción de los lodos y en la homogeneidad de estos en la estructura, debido a que, para garantizar una alta eficiencia y continuidad en la fase decantada, es necesario garantizar una energía cercana a cero o de cero en el fondo de la estructura.

En la figura siguiente se pueden apreciar los resultados obtenidos para la energía cinética turbulenta en el rango global y en un rango ajustado; adicionalmente, se muestra el comportamiento de la tasa de disipación de energía en el modelo estudiado (figura 17).

Como se puede observar, la tasa de disipación de energía es alta en las regiones donde el flujo se encuentra con la pantalla deflectora del flujo, pero en las zonas donde la tendencia del flujo es totalmente horizontal y vertical, sin elementos complementarios de disipación, se presentan valores cercanos a cero, lo cual permite la resuspensión de los sólidos más livianos.

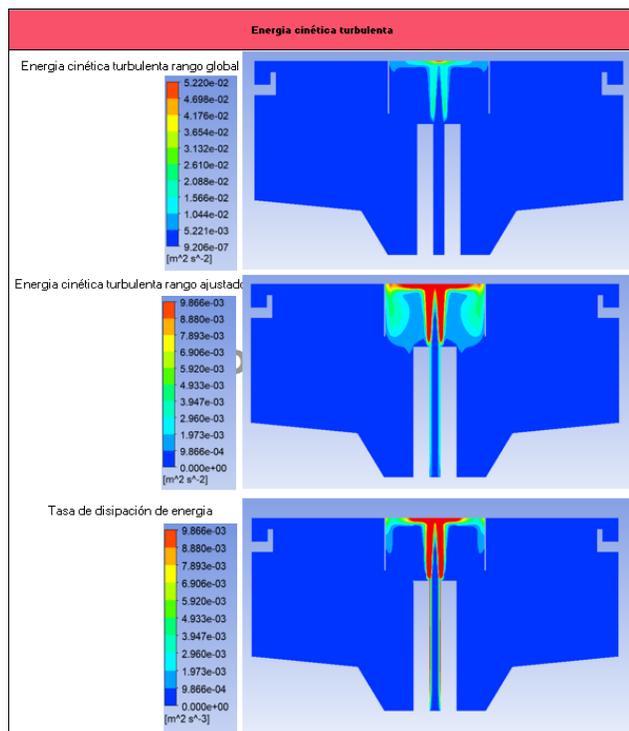


Figura 17. Energía cinética turbulenta y tasa de disipación de energía.

Validación del modelo

El proceso de validación del modelo se centra en efectuar una aproximación para validar el modelo. Se

tomó como unidad de comparación un sedimentador primario ubicado en la región del Tolima (Colombia), empleado para tratar las aguas residuales municipales y con una configuración similar a la del sedimentador diseñado.

Como referencia se tomó la concentración de los sólidos suspendidos totales afluentes al tanque sedimentador primario, y a partir de esta se tomaron las fracciones de volumen que componen cada uno de los diámetros de partículas estudiados.

Si bien el ejercicio propuesto tiene como objetivo dar una aproximación a lo que sucederá con la unidad diseñada una vez puesta en marcha, es necesario identificar otros escenarios de análisis que puedan ayudar a incrementar la eficiencia de remoción de las partículas más livianas en la unidad de tratamiento.

En la tabla siguiente se presentan los valores iniciales tomados para elaborar la modelación con los datos de la unidad existente (tabla 5), y con base en las fracciones de volumen estimadas y presentadas allí, se efectúa la modelación para los datos del sedimentador tomado como unidad de referencia.

Por medio de la modelación se busca evaluar la eficiencia que se obtiene y comparar el resultado con la eficiencia alcanzada mediante la modelación de la unidad diseñada y los datos de referencia obtenidos de la unidad existente.

Adicionalmente, se presentan los resultados obtenidos para el modelo efectuado con los datos de concentración de SST en el afluente al tanque de sedimentación primaria (mg/L) existente (tabla 6), al igual que las eficiencias estimadas con base en los resultados conseguidos (tabla 7).

Tomando los resultados obtenidos y presentados anteriormente (tablas 5 y 6), se calculan las eficiencias mediante la siguiente estimación, para cada uno de los modelos efectuados.

$$E_{\text{Modelo sedimentador diseñado}} = \frac{144,50 \frac{\text{mg}}{\text{L}} - 65,41 \frac{\text{mg}}{\text{L}}}{144,50 \frac{\text{mg}}{\text{L}}} * 100 \% = 54,74 \%$$

$$E_{\text{Modelo sedimentador existente}} = \frac{107,49 \frac{\text{mg}}{\text{L}} - 49,23 \frac{\text{mg}}{\text{L}}}{107,49 \frac{\text{mg}}{\text{L}}} * 100 \% = 54,20 \%$$

Tabla 5
Fracciones de volumen sedimentador diseñado y datos de validación (entrada)

Fracciones de volumen modelo validación				
Sólidos suspendidos totales (SST) afluente	107.49			
Nombre de partículas	Diámetros tomados	Porcentaje en la fracción	Fracción de volumen	Densidad partículas
Suprame	10 μm	17,71 %	0,0000136316	1396,534 kg/m ³
Suprama	50 μm	54,95 %	0,0000422949	1396,534 kg/m ³
Sedimentables	80 μm	27,34 %	0,0000210429	1396,534 kg/m ³
Fracciones de volumen modelo diseño				
Sólidos suspendidos totales (SST) afluente	144,50			
Nombre de partículas	Diámetros tomados	Porcentaje en la fracción	Fracción de volumen	Densidad de partículas
Suprame	10 μm	17,71 %	0,0000183250	1396,534 kg/m ³
Suprama	50 μm	54,95 %	0,0000568571	1396,534 kg/m ³
Sedimentables	80 μm	27,34 %	0,0000282880	1396,534 kg/m ³

Tabla 6
Fracciones de volumen sedimentador diseñado y datos de validación (salida)

Fracciones de volumen efluente			
Sólidos suspendidos totales (SST) efluente (mg/L)	49.23		
Nombre de partículas	Diámetros tomados	Fracción de volumen	Densidad de partículas
Suprame	10 μm	0,00001337034	1396,534 kg/m ³
Suprama	50 μm	0,00002163456	1396,534 kg/m ³
Sedimentables	80 μm	0,00000024991	1396,534 kg/m ³
Fracciones de volumen outlet			
Sólidos suspendidos totales (SST) efluente (mg/L)	65,41		
Nombre de partículas	Diámetros tomados	Fracción de volumen	Densidad de partículas
Suprame	10 μm	0,0000179079	1396,534 kg/m ³
Suprama	50 μm	0,0000284939	1396,534 kg/m ³
Sedimentables	80 μm	0,0000004332	1396,534 kg/m ³

Tabla 7
Eficiencia de remoción para las fases particulada

Eficiencia		
Nombre de partículas	Diámetros tomados	Eficiencia
Suprame	10 μm	1,92 %
Suprama	50 μm	48,85 %
Sedimentables	80 μm	98,81 %

De acuerdo con las eficiencias estimadas, se presenta en la figura 18 un resumen los valores obtenidos.

Para evaluar de manera cuantitativa los resultados obtenidos en relación con la información operativa del sistema de tratamiento tomado como referencia para el estudio de la eficiencia de remoción, se cuantificaron los siguientes parámetros estadísticos (tablas 8 y 9).

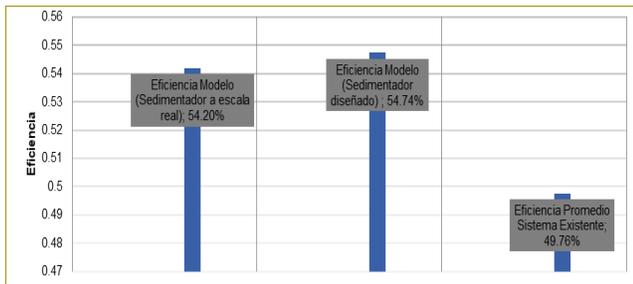


Figura 18. Eficiencia de remoción para los sistemas analizados.

Tabla 8

Error porcentual del modelo de validación con respecto a los datos existentes

Eficiencia modelo	Eficiencia sistema existente	Error porcentual
54,20 %	49,76 %	8,91 %

Tabla 9

Error porcentual del valor modelado con respecto al modelo de validación

Eficiencia modelo	Eficiencia sistema existente	Error porcentual
54,74	54,20 %	1,0 %

De acuerdo con los datos conseguidos mediante las simulaciones efectuadas, se puede afirmar que el modelo desarrollado para el sedimentador primario diseñado se aproxima al comportamiento de una estructura de sedimentación existente, considerando el grado de similitud que tiene en relación con los datos obtenidos de la estructura de sedimentación existente en la región del Tolima.

En la figura anterior se presentan las fracciones de volumen para los modelos elaborados (figura 18).

Identificación de los elementos de mejora y optimización del sedimentador

Con base en el estudio desarrollado es posible determinar que la geometría en la estructura de sedimentación estudiada cumplirá de forma adecuada con su

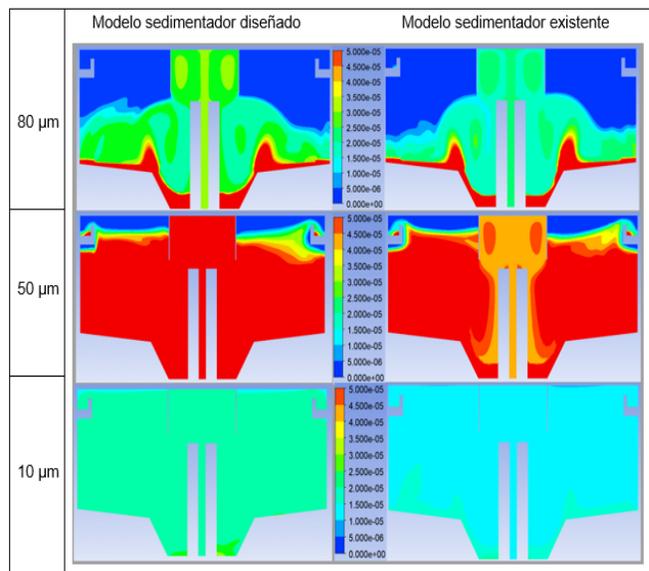


Figura 16. Fracciones de volumen para el modelo de validación y el modelo del sedimentador diseñado en rango ajustado.

función de remoción de sólidos. Sin embargo, hay que considerar que cuando hayan sobrecargas orgánicas, es necesario contemplar la posibilidad de implementar elementos complementarios que ayuden a remover los sólidos más livianos que puedan escaparse del manto de lodos de la estructura y, por ende, reducir la eficiencia del sistema.

Como resultado del modelo se puede inferir que las partículas con diámetros menores de 50 µm saldrán en el efluente del tanque sedimentador en un 50 %, por lo que la eficiencia del sistema estará ligada a la composición granulométrica del agua residual afluente al sedimentador.

Como producto del presente modelo elaborado se plantea la necesidad de efectuar un análisis, mediante modelos físicos en conjunto con CFD, de elementos complementarios que se puedan construir en la estructura con la finalidad de reducir la energía cinética turbulenta en las zonas de recirculación y las zonas de resuspensión de la unidad.

Para esto, en el presente estudio se propone que, con la modificación del baffle deflector de flujo, es posible incrementar la eficiencia de remoción de las partículas menores de 10 µm en la unidad de tratamiento, mediante la creación de un sección acampanada que permita que los sólidos no se sometan a un proceso de resuspensión en sentido lateral al vertedero perimetral de salida.

Otro elemento que se plantea analizar como producto del presente estudio es la construcción de una pantalla adicional, ubicada en forma perimetral antes de la sección del vertedero de salida. Esta permite aumentar la tasa de disipación de la energía cinética turbulenta en la zona final del tanque y evitar que se escapen sólidos livianos, los cuales generan líneas de trayectoria hasta esta sección del dominio de flujo en la unidad.

Finalmente, cabe anotar que la eficiencia de la unidad estará dada en función del control de los procesos de turbulencia generados por la resuspensión y recirculación del flujo y, por tanto, de las partículas en los puntos críticos de la unidad, como la tolva y las paredes superiores del vertedero de salida, donde es necesario proponer alternativas que ayuden a aumentar la disipación de la energía del flujo en la estructura.

CONCLUSIONES

Las poblaciones municipales en Colombia tienen varios retos respecto al saneamiento de sus aguas residuales y la forma en que se diseñan, construyen y operan los sistemas de tratamiento que permiten controlar la contaminación generada sobre los recursos hídricos.

Resulta indispensable abordar los problemas descritos en el país, implementando herramientas de gestión que articulen las fases que estructuran los proyectos de saneamiento municipal.

Con el fin de implementar dichas herramientas de gestión, se requiere emplear la dinámica de fluidos computacional, en el planteamiento de alternativas y diseño de los sistemas de tratamiento de las aguas residuales, para optimizar su eficiencia y su desempeño.

La investigación desarrollada se enfocó en el dimensionamiento de una estructura de sedimentación primaria típica para el tratamiento de las aguas residuales domésticas, tomando como caso de estudio un municipio del departamento del Tolima y comparando los resultados obtenidos con los de un sedimentador primario real en operación con características similares, ubicado en el mismo departamento.

La estructura de sedimentación proyectada y modelada atiende a una población de 3025,5 habitantes para el periodo diseño y un caudal medio diario de 5,52 L/s. Se busca remover los sólidos sedimentables y una fracción de los sólidos supracoloidales, es decir,

los sólidos con diámetro superior a los 100 μm y entre los 10 y 100 μm , respectivamente.

Mediante la modelación efectuada en Ansys Fluent se estudiaron el comportamiento hidrodinámico y las eficiencias de remoción de los sólidos en la unidad de sedimentación primaria diseñada. El modelo se aproxima a la realidad, lo que permitió evaluar cómo operará el sistema diseñado y recomendar mejoras en los componentes de la estructura convencional para incrementar la eficiencia en el proceso.

En atención al objetivo del estudio, se evaluó la influencia de diferentes variables de diseño para determinar su grado de relevancia en el diseño del proceso de sedimentación primaria. Se encontró que la velocidad de flujo en la sección de acceso a la unidad determina los patrones de flujo y trayectoria en el sedimentador, así como también que la tasa de desbordamiento superficial es de gran importancia en el diseño de sedimentadores primarios, puesto que permite determinar la relación entre la profundidad y el área de la unidad, lo cual cumple un papel fundamental en la generación de altas o bajas velocidades de flujo horizontal y vertical en el proceso de sedimentación.

Así mismo, con el modelo desarrollado fue posible estudiar una variable que hidráulicamente no se cuantifica mediante el diseño convencional del proceso de sedimentación, que es la tasa de disipación de energía cinética turbulenta, la cual permite identificar las posibles zonas de resuspensión y recirculación del flujo, que reducen la eficiencia de sedimentación de las partículas coloidales y supracoloidales.

Para la elaboración del modelo se analizaron diferentes densidades de malla y pasos de tiempo de acuerdo con la disponibilidad de recursos computacionales en el desarrollo del presente estudio. El proceso permitió determinar que, para la modelación de sistemas de sedimentación primaria en estado no permanente, es adecuado hacer uso de esquemas numéricos de orden superior y emplear pasos de tiempo pequeños para obtener una mejor aproximación del campo de presión.

De conformidad con la evaluación de las discretizaciones de la geometría se encontró que los tiempos computacionales requeridos dependen fuertemente del número de elementos que la malla posea. La discretización seleccionada permite obtener resultados válidos, de acuerdo con el comportamiento hidrodinámico de los

sólidos en los procesos de sedimentación en tiempos de cálculo razonables.

Para el estudio de la concentración de sólidos y su distribución granulométrica en la unidad de sedimentación se empleó el modelo de mezcla, que ayuda a describir la interacción de las fases discretas y continua en el agua residual doméstica. Se halló que las partículas coloidales representadas por la fase discreta, denominada Suprame, con diámetros de $10 \mu\text{m}$, tienden a mantenerse en suspensión en la mezcla, y la eficiencia de remoción en la unidad de estas es inferior al 2,5 %.

Por otro lado, las partículas denominadas Suprama con diámetros de $50 \mu\text{m}$, tienden a generar patrones de resuspensión y arrastre en el flujo a velocidades inferiores a $0,1 \text{ m/s}$ en la mezcla y una remoción en la unidad de sedimentación de alrededor del 50 %.

Finalmente, las partículas superiores o iguales a los $80 \mu\text{m}$ mostraron una remoción cercana al 100 %, ajustándose en forma adecuada al proceso estudiado por varios autores, como De Clercq (2003) y Enriquez (2019).

Se concluye que el modelo de mezcla se ajusta de manera adecuada al proceso físico de sedimentación. Sin embargo, vale la pena mencionar que el modelo multifásico empleado considera las fases discretas y continua como una mezcla, lo cual implica que utiliza una ecuación de referencia para estimar las fracciones de volumen de las fases discretas, obteniendo una reducción del nivel de complejidad del problema.

De acuerdo con lo anterior, se aconseja desarrollar un modelo que permita analizar cada fase de modo independiente y no como una mezcla, para establecer con mayor detalle el comportamiento de cada componente granulométrico, con el fin de estimar si los resultados conseguidos mediante el modelo de mezcla se aproximan a los posiblemente obtenidos mediante un modelo más robusto, como el euleriano.

En lo que respecta al modelo de turbulencia empleado (k-épsilon estándar) para el desarrollo de la modelación del sedimentador primario, se estima que, a pesar de ser un modelo simplificado para el análisis del efecto del flujo turbulento en el proceso, se obtuvo un grado de aproximación adecuado. En las regiones del dominio computacional, donde se espera que el flujo presente valores de energía cinética turbulenta superiores a $0,01 \text{ m}^2/\text{s}^2$, el modelo estimó valores alrededor de $0,03 \text{ m}^2/\text{s}^2$.

En cuanto a la tasa de disipación de energía obtenida mediante la aplicación del modelo de turbulencia (k-épsilon estándar), tal como se esperaba, en la región superior de simetría y en las zonas cercanas a la pantalla deflectora del flujo se presentarán los valores más altos de disipación. En conclusión, el modelo (k-épsilon estándar) es aplicable para describir el flujo turbulento en la simulación del proceso de sedimentación primaria, siendo económico computacionalmente y con una precisión aceptable.

Según lo descrito en este capítulo, se concluye que mediante la presente investigación fue posible responder al objetivo general del proyecto de evaluar y analizar el comportamiento hidrodinámico y la eficiencia de remoción de los sólidos suspendidos totales en la unidad. Se obtuvo una eficiencia superior al 50 %, empleando el *software* Ansys Fluent.

Finalmente, cabe anotar que la aproximación hecha para validar el modelo y las referencias teóricas muestran un ajuste adecuado al posible comportamiento hidrodinámico y físico de las partículas en el interior del sedimentador primario, en las condiciones definidas en el diseño.

Esta conclusión coincide con los estudios llevados a cabo por varios investigadores en los últimos años en el campo de la dinámica de fluidos computacional, aplicada a los procesos de tratamiento de aguas.

RECOMENDACIONES

Una vez efectuado el estudio, se plantea la necesidad de emplear modelos más robustos, que permitan analizar factores complementarios a los tenidos en cuenta en este estudio, como los efectos de las corrientes de temperatura en el agua residual contenida en una unidad de sedimentación, los efectos de agitación generados por corrientes de viento sobre la superficie de las unidades y los patrones de cambio en las partículas en función de vibraciones externas en las unidades.

Si bien los resultados obtenidos mediante la modelación desarrollada se ajustan a los procesos hidrodinámicos y físicos en el proceso de sedimentación primaria, es recomendable considerar la construcción de un modelo a escala de la unidad diseñada para comparar los datos obtenidos mediante el presente estudio.

En razón de que las plantas de tratamiento de agua residual en su afluente son sometidas a cambios en la

concentración de las partículas suspendidas en el agua durante su operación, es recomendable desarrollar un modelo CFD complementario que permita analizar el funcionamiento de la unidad de sedimentación primaria, diseñada en condiciones críticas de operación.

Se sugiere la elaboración de un estudio que analice el comportamiento de la unidad en condiciones de mayor concentración de partículas en el agua residual, con el fin de analizar su comportamiento en condiciones críticas.

Para la estructura de sedimentación estudiada, se recomienda emplear y modelar un baffle deflector más extenso, que obligue a las partículas más livianas a desplazarse hasta el fondo de la estructura y adherirse al manto de lodos generado por los sólidos sedimentables, para de esta forma incrementar la eficiencia de remoción de los sólidos supracoloidales.

REFERENCIAS

- Ansys (2009, 29 de enero). Ansys Fluent 12.0 User's Guide. Ansys Fluent.
- Ansys (2017). Ansys Fluent Tutorial Guide. Canonsburg, PA 15317: 2600 Ansys Drive.
- Baraya, J. R. (2017). *Comparación teórica entre las metodologías de diseño tradicionales y el uso de alternativas de CFD en el diseño de sedimentadores convencionales*. Bogotá, D.C.: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- Berrio, B. J. (2015). *Simulación en CFD de un tanque de sedimentación secundaria con la implementación de un modelo de balance poblacional (PBM)*. Bogotá, D.C.: Universidad de los Andes, Departamento de Ingeniería Química.
- Betancourt, F., Bürger, R., Diehl, S., & Farås, S. (2014). Modeling and Controlling Clarifier-Thickeners Fed by Suspensions with Time-Dependent Properties. *Minerals Engineering*, 62, 91-01.
- De Clercq, B. (2003). *Computational Fluid Dynamics of Settling Tanks: Development of Experiments and Rheological, Settling, and Scraper Submodels*. Obtenido de http://library.wur.nl/Web-Query/clc/1698226%5Cnhttp://modeleau.fsg.ulaval.ca/fileadmin/modeleau/documents/Publications/PhD_s/declercqbob_sum.pdf.
- Díaz García, M. A. (2022). *Modelación del flujo en 3D en el proceso de sedimentación primaria para el tratamiento de aguas residuales domésticas utilizando Ansys-Fluent*. Bogotá, D.C.: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, maestría en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente.
- Enríquez, L. C. (2019). *Nueva configuración de un clarificador primario para el tratamiento del agua residual doméstica*. Santiago de Cali: Universidad del Valle - Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente.
- Metcalf & Eddy (2003). *Wastewater engineering: treatment, disposal and reuse* (4th ed.). Nueva York: Mc Graw Hill.
- Romero, R. J. (2013). *Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño*. Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.

Diseño de modelos logísticos para transportar muestras de sangre mediante el uso de drones

Logistic model design to transport blood samples using drones

ROLAND RUIZ FAGUA¹ - MARITZA CECILIA VILLAMIZAR ROPERO²

1. Especialista en Diseño, Construcción y Conservación de Vías.

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

roland.ruiz@mail.escuelaing.edu.co - maritza.villamizar@escuelaing.edu.co

Recibido: 28/11/2021 Aceptado: 12/01/2022

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

Resumen

En el ámbito internacional, alrededor de dos mil millones de personas (25 % del total de la población mundial) carecen de acceso a productos médicos esenciales, como sangre o vacunas, por falta de infraestructura o por condiciones topográficas adversas (World Health Organization, 2004). En Colombia, la baja accesibilidad a los servicios de salud se debe, entre otras causas, a la dificultad de movilización hacia los centros de servicio, la cobertura del sistema y las condiciones socioeconómicas de la población.

En el presente artículo se evalúa una operación logística para el transporte de muestras de sangre, con el propósito de aumentar la cobertura y la accesibilidad a las instalaciones de análisis clínico, disminuyendo los tiempos y costos de viaje asociados. Como resultado, se obtiene un modelo de dos etapas, evaluado en los ámbitos estratégico y táctico-operativo, simulado en los departamentos del Guainía y Valle del Cauca, con un costo estimado por muestra de \$46.718 para la movilización de ejemplares en áreas rurales sin infraestructura de servicios ni vial, y un costo por muestra de \$1764 para áreas rurales con un mayor nivel de desarrollo.

Estos indicadores se definieron a partir de la resolución de problemas relacionados con áreas de servicio, localización, asignación y ruteo

de vehículos. Se concluye que hay una disminución de los costos asociados al transporte, el incremento de la accesibilidad, cobertura y viabilidad de implementar las operaciones logísticas con drones a corto o mediano plazo.

Palabras claves: acceso y cobertura a la salud, drones, gestión del tráfico de sistemas de aeronaves no tripuladas (UTM), logística de drones, problema de localización - asignación con drones (UAV), problema de ruteo de vehículos con drones (VRP-D).

Abstract

Around two billion people worldwide (25% of the total population) lack access to essential medical products, such as blood or vaccines, due to a lack of infrastructure or adverse topographical conditions (World Health Organization, 2004). In Colombia, the low accessibility to health services is due, amongst other causes, to the difficulty of mobilization to service centers, the system's coverage, and the population's socioeconomic conditions. This paper evaluates a logistic operation for transporting blood samples to increase the range and accessibility to clinical analysis facilities, decreasing associated travel times and costs. As a result, a 2-stage model is obtained, evaluated at a strategic and tactical-operational level, and simulated in the departments of Guainía

and Valle del Cauca, with an estimated cost per sample of COP \$46,718 for the mobilization of specimens in rural areas without service and road infrastructure, and a cost per sample of COP \$1,764 for rural areas with a higher level of development. These indicators were defined based on the resolution of problems related to service areas, location, allocation, and routing of vehicles. The conclusion is a decrease in the costs associated with transportation, increased accessibility, coverage, and feasibility of implementing logistics operations with drones in the short or medium term.

Keywords: Drone, Drone Logistics, Health Access and Coverage, Location-allocation problem with drones, UAVs, Unmanned Aircraft System Traffic Management UTM, Vehicle routing problem with VRP- D Drones.

INTRODUCCIÓN

En el ámbito internacional, alrededor de dos mil millones de personas (25 % del total de la población mundial) carecen de acceso a productos médicos esenciales, como sangre o vacunas, por falta de infraestructura o por condiciones topográficas adversas (World Health Organization, 2004). En Colombia, la baja accesibilidad a los servicios de salud se debe, entre otras causas, a la dificultad de movilización hacia los centros de servicio, la cobertura del sistema y las condiciones socioeconómicas de la población.

En el presente artículo se plantea un modelo de transporte de muestras de sangre para aumentar la cobertura y la accesibilidad a las instalaciones de análisis clínico, con el propósito de disminuir los tiempos y costos de viaje asociados.

En los últimos diez años, se ha estudiado el transporte de mercancías por medio de drones. Empresas como Amazon, Google, Australia Post, Matternet y Zipline han investigado modelos de operación en los que involucran los vehículos aéreos no tripulados (UAV, por su sigla en inglés) en la entrega de paquetes; por otra parte, en el ámbito gubernamental, la NASA o U-Space trabajan en el desarrollo de un marco regulatorio del espacio aéreo y la estructura de este.

En el área de la salud, (Kim, Lim, Cho, & Côté, 2017) elaboraron un estudio para la entrega y recogida de kits para muestras de sangre con un modelo de operación por medio de drones, en el que se buscó minimizar la cantidad de dinero gastada por una persona que padece una enfermedad crónica y que requiere hacerse controles periódicos. En el año 2019, (Ochieng, et al., 2020) investigaron el transporte de muestras de sangre en el oeste de África, simulando la movilización ejemplar

de análisis para la epidemia del virus del Ébola entre los años 2013 y 2016, comparando la movilización por medio de drones y motocicletas; como resultado de esto, se identificó la demora del transporte de muestras, debido a las malas condiciones de la infraestructura vial y las barreras geográficas.

Estudios adicionales han investigado sobre la calidad de las muestras de sangre al ser transportadas bajo este modelo de operación. En el año 2015, (Amukele, Sokoll, Pepper, Howard, & Street, 2015) realizaron pruebas con 336 muestras, en las que se encontró que no existía una variación significativa entre muestras transportadas por vía aérea y muestras hechas con ejemplares de control, resaltando la importancia del control de las condiciones ambientales en los que se moviliza la muestra, principalmente la temperatura y la presión atmosférica.

En el artículo se analizan e identifican, a partir de las estadísticas colombianas relacionadas con la población, la diabetes como primera enfermedad de estudio, ya que esta representa la sexta causa de muerte en el país, y la malaria, al ser un evento de interés en salud pública. A partir de una evaluación multicriterio, se seleccionan dos departamentos para estudiar la operación de los modelos logísticos que se proponen a continuación.

1.1 Estructura y gestión del espacio aéreo

Análogamente, varios autores han planteado el espacio aéreo que se puede aprovechar para operar los drones, con reglas y principios similares a los de la aviación civil convencional. Para el objeto de este estudio se adoptaron algunos conceptos de la estructura del espacio aéreo propuesta por el equipo de investigación U-Flyte de la Universidad de Maynooth. El modelo se plantea para asegurar una operación de drones eficiente y segura. El primer aspecto hace referencia a la identificación y clasificación de tres zonas de restricción o prohibición de vuelo en función del uso del suelo y elementos existentes, en tanto que el siguiente aspecto tiene que ver con la automatización de las operaciones aéreas; en relación con la red, se parte del enfoque básico de nodos y aristas, adicionando una tercera dimensión vertical y creando múltiples capas de vuelo y capas para solucionar conflictos en las trayectorias. Se plantea una franja de vuelo entre los 50 m y 150 m, con capas de 15 m de altura, intercaladas entre capas de vuelo y

capas de solución de conflictos (Mc Carthy, Pforte, & Burke, 2020).

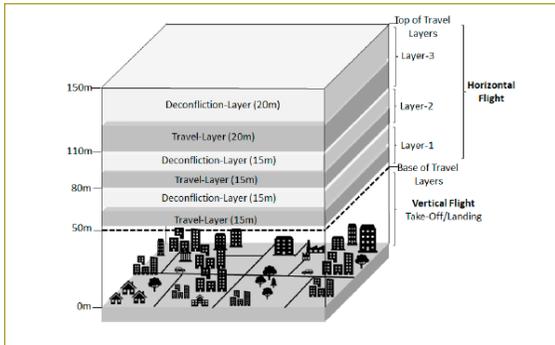


Figura 1. Esquema de la estructura de capas del espacio aéreo.

Nota: Gráficos tomados de (Mc Carthy, Pforte, & Burke, 2020).

Para la gestión del tráfico aéreo se plantean cuatro aspectos claves: creación de una franja espaciotemporal de seguridad, solución de conflictos estratégica, solución de conflictos táctica y manejo de situaciones de emergencia (Mc Carthy, Pforte, & Burke, 2020).

1.2 Tipos de muestras de sangre

Para el control periódico de la diabetes tipo 2, se tiene como parámetro de evaluación la prueba de laboratorio de hemoglobina glicosilada (HbA1c), la cual mide el nivel promedio de glucosa en la sangre; por otra parte, para la detección de la malaria se puede hacer un examen

de gota gruesa. Las dos pruebas de laboratorio mencionadas anteriormente se realizan mediante la toma de muestras de sangre capilar. Vale la pena aclarar que la prueba de HbA1c se les hace a pacientes que presentan un valor de HbA1c en rangos entre el 6,5 % y 9 % (Gerald J, 2017); para valores superiores es necesario practicar otro tipo de exámenes.

RESULTADOS Y CONTRIBUCIÓN

Diagnóstico

La diabetes *mellitus* tipo 2 en Colombia, en términos prácticos, tiene una prevalencia del 7,4 % en hombres y del 8,7 % en mujeres mayores de 30 años; esta enfermedad tiene mayor incidencia en la población urbana que en la rural, lo cual está asociado entre otras causas al estilo de vida y los hábitos que se pueden distinguir entre estos dos grupos (Aschner, 2010). En relación con el registro de muertes ocasionadas por esta enfermedad, para el año 2018 se reconocieron 8018 muertes, que presentan una alta dependencia de la variable población, con un coeficiente de correlación de 0,87. Se registran valores elevados respecto a la estadística nacional en Antioquia, Valle del Cauca y Bogotá.

En cuanto a la malaria en Colombia, se identifica este como un problema crítico en la salud pública, ya que el 85 % del territorio rural del país se encuentra por debajo de los 1600 m y presenta las condiciones climáticas, geográficas y epidemiológicas en las que se puede transmitir la enfermedad (Padilla, Rico, & Usta, 2001).

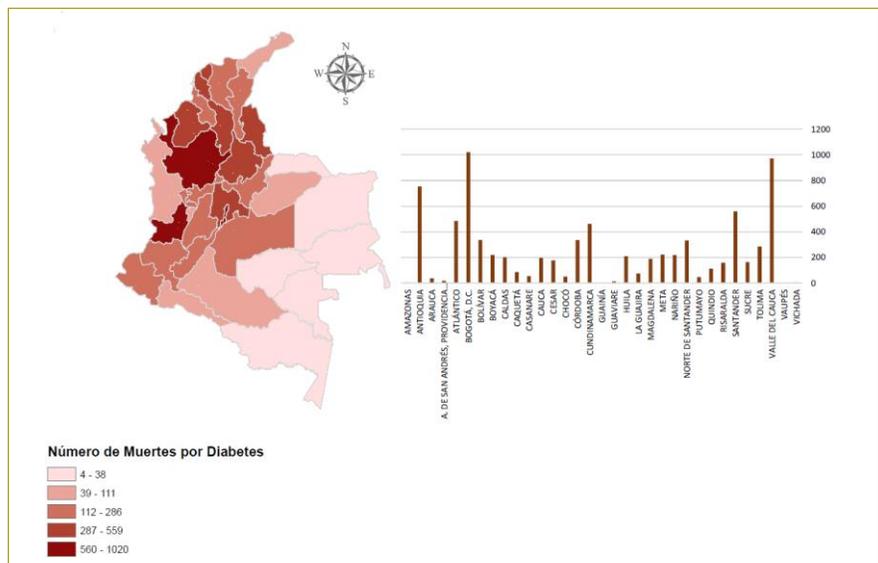


Figura 2. Número de muertes por diabetes mellitus tipo 2.

Nota: Gráficos generados a partir de información del EEVV 2018.

Para el caso de la diabetes tipo 2 se buscó un enfoque individual, con el fin de hacer los exámenes de rutina que se deben practicar cada tres meses a una población determinada que padece de esta enfermedad. En contraste, para la malaria se busca efectuar un control de la enfermedad mediante la detección y el monitoreo de esta a una población en general, aumentando el número de pruebas para detectarla. En consecuencia, los factores de mayor peso para el primer caso serán los indicadores individuales, y para el segundo caso, los indicadores relativos o porcentuales calculados.

En ese orden de ideas, se escogió al Valle del Cauca como el departamento para la modelación de la toma de muestras de sangre para el control de la diabetes tipo 2 y se eligió al departamento del Guainía para la modelación de la toma de muestras para la vigilancia de la malaria.

2.2 Planteamiento de modelos logísticos

Para resolver el problema de transportar muestras de sangre usando drones, se pensó en un modelo logístico de dos etapas, relacionando aspectos técnicos y económicos. Siguiendo el planteamiento de (Kim, Lim, Cho, & Côté, 2017), se propone en primer lugar un modelo estratégico con el objeto de encontrar el menor número de instalaciones (centros de drones) para brindar la cobertura a un área geográfica, y en segundo lugar, un modelo operativo para el ruteo de drones desde los centros de drones hasta los puntos de demanda, el cual se resolvió como un problema de ruteo de vehículos con múltiples depósitos (MDVRP).

En el modelo se plantearon dos problemas de operaciones logísticas que hay que resolver: el primero de ubicación-asignación y el segundo de ruteo de vehículos con múltiples depósitos (MDVRP).

Conceptualmente, con este modelo se buscó aumentar coberturas de servicios y disminuir costos para el envío y recogida de mercancías que se caracterizan por ser de bajo peso, pequeñas, con un alto valor por la información y que requieren ser transportadas de manera prioritaria o con rapidez. Se planteó una logística en la cual la especialización de un servicio permita ofrecer servicios que ayuden a disminuir los costos de transporte, reemplazando los viajes particulares por servicios prestados a domicilio, aumentando la cobertura y la accesibilidad a servicios al no depender de una red

vial. El estudio dirigió el modelo a servicios relacionados con la atención de servicios esenciales, pero este se puede implementar para el transporte de mercancías o la prestación de servicios no esenciales.

El planteamiento del modelo logístico se desarrolló en dos etapas: la primera, desde un enfoque estratégico, buscando dar acceso a servicios en grandes áreas, con poca infraestructura vial, y la segunda etapa, desde un enfoque táctico-operativo, con el objetivo de brindar cobertura en áreas rurales cercanas a una instalación de servicio. El modelo logístico puede tener aplicabilidad como un modelo de dos etapas o como un modelo independiente de una etapa, según las necesidades del problema por resolver.

2.2.1 Etapa 1 estratégica: Acceso a servicios de grandes áreas, con poca infraestructura vial

El modelo tiene como fin aumentar la accesibilidad y la cobertura de los servicios de salud. Así las cosas, se propone un modelo de dos instancias: en la primera, se pretende minimizar las instalaciones o centros de recogida; en la segunda, se busca minimizar las instalaciones y la longitud total recorrida para transportar las muestras desde los centros de intermedios hasta los laboratorios clínicos.

A continuación, se describen los aspectos para desarrollar y evaluar el modelo logístico:

- Identificación de la población que se va a atender.
- Caracterización y agrupación demográfica.
- Identificación de instalaciones de servicio.
- Creación de la red.

2.2.1.1 Instancia 1. Modelo de asignación-localización. Definición de instalaciones (centros intermedios)

Se tiene como propósito asignar los puntos de demanda al menor número de instalaciones, establecer como parámetro de impedancia la longitud y definir el problema de minimizar las instalaciones. El valor límite de la impedancia se determina en función del tipo de dron elegido y las capacidades de cobertura para realizar el transporte.

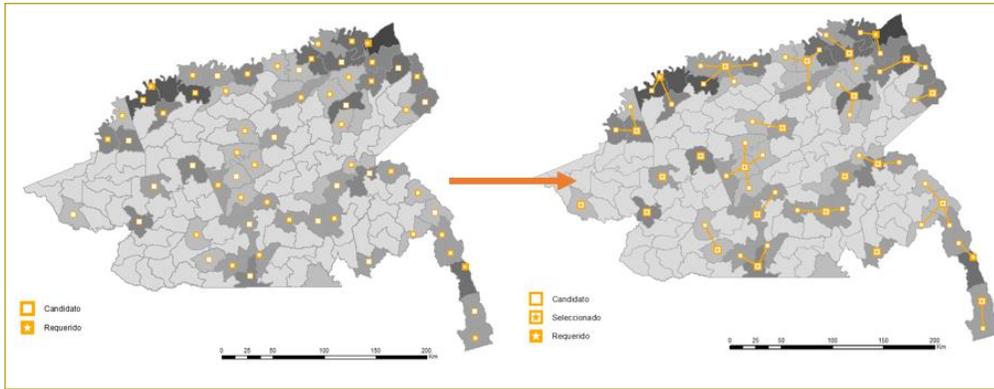


Figura 5. Etapa 1- Instancia 1: modelo de asignación-localización.

2.2.1.2 Instancia 2. Modelo de asignación-localización a instalaciones de servicio

Se tiene como objetivo minimizar la longitud total recorrida desde los centros intermedios hasta las instalaciones de servicio (puntos finales), disminuir a su grado mínimo la impedancia, definir el valor de instalaciones que se van a escoger y el número de instalaciones que presten el servicio.

2.2.2 Etapa 2. Táctica-operativa: cobertura de servicios en áreas rurales

El modelo tiene como propósito brindar la cobertura de servicios en áreas rurales, evitando los desplazamientos de los usuarios a las instalaciones de servicio, ofreciendo servicios de recolección domiciliaria y minimizando la longitud total recorrida, el tiempo y los costos relacionados con el desplazamiento.

En una primera instancia, se asigna una instalación de servicio a la demanda que hay que atender, minimizando la longitud total recorrida. Este proceso se lleva a cabo ejecutando el modelo de un modo estratégico

y minimizando la impedancia, teniendo en cuenta la capacidad instalada existente o como se desarrolla en la etapa 1 (modelo estratégico), en caso de no contar con instalaciones de servicio cercanas. Posteriormente, en la segunda instancia, se soluciona un problema de ruteo de vehículos, con el fin de encontrar las rutas óptimas para recoger y atender la demanda.

A continuación, se describen los aspectos para desarrollar y evaluar el modelo logístico:

- Identificación de la población que se va a atender.
- Caracterización y agrupación demográfica.
- Identificación de instalaciones de servicio (instancia 1).
- Creación de red (instancia 1).

2.2.2.1 Instancia 1. Modelo de asignación-localización. Definición de instalaciones

Se tiene como fin asignar las instalaciones de los puntos de demanda y determinar la longitud como parámetro de impedancia. Se define como tipo de problema minimizar la longitud. Se establece como valor límite de las

Figura 6. Etapa 1- Instancia 2: modelo de asignación-localización a instalaciones de servicio.

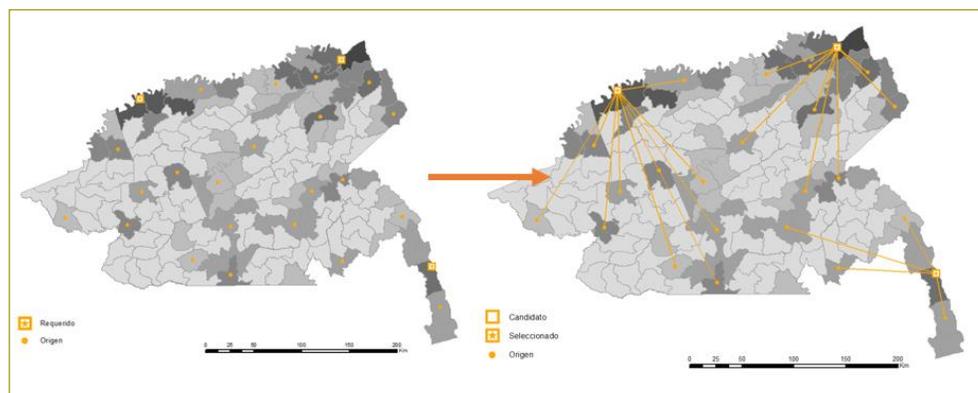
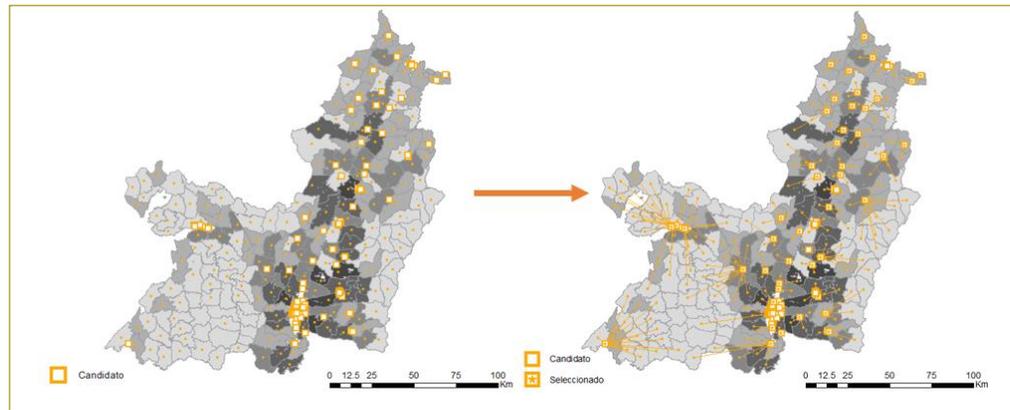


Figura 7. Etapa 2- Instancia 1: modelo de asignación-localización de instalaciones de servicio.

Nota: Gráficos generados a partir de la información analizada para cada departamento.



instalaciones el número total de estas, con el propósito de tomar en cuenta todas las instalaciones disponibles.

2.2.2.2 Instancia 2. Modelo VRP-ruteo de vehículos

Se tiene como fin establecer las rutas para recoger la totalidad de las muestras al menor costo posible.

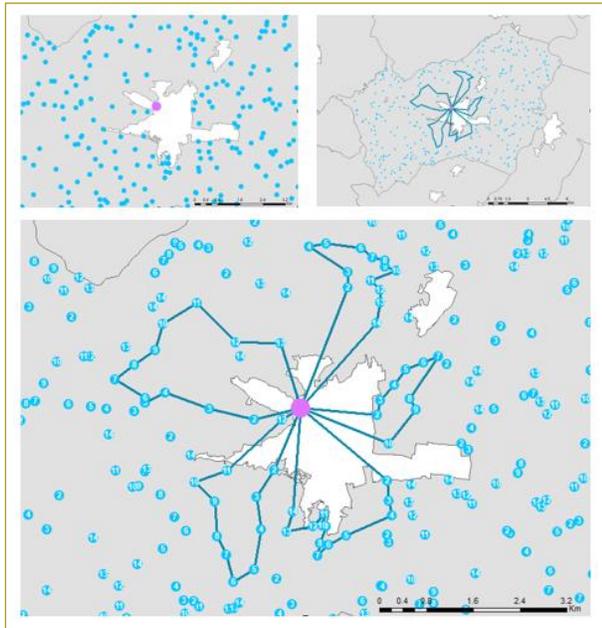


Figura 8. Etapa 2- Instancia 2: modelo de VRP-ruteo de vehículos.

2.3 Análisis de resultados

2.3.1 Modelo etapa 1, evaluado en el departamento del Guainía

En el departamento del Guainía, a partir del modelo, se planteó la posibilidad de aumentar la accesibilidad para la toma y análisis de muestras de sangre requeridas para

detectar la malaria, con una cobertura de la totalidad del departamento. En consecuencia, el modelo resulta como una solución para resolver algunos temas de accesibilidad presentes en la región, ante el déficit de infraestructura vial en el Guainía.

En relación con el tiempo de desplazamiento este se reduce a cero, teniendo en cuenta que se propuso un servicio domiciliario; por otra parte, el tiempo para el análisis de una muestra dependerá de la localización dentro de la red, con la posibilidad de reducirlo únicamente al tiempo de desplazamiento de requerirse un análisis prioritario, aunque los costos de transporte se pueden incrementar al no estar asociado al modelo logístico planteado.

Para la implementación del modelo y una detección o monitoreo de la malaria es importante involucrar el componente epidemiológico, con el propósito de encaminar la toma de muestras que caractericen adecuadamente a la población objetivo. En este estudio se desarrolló una metodología para modelar una aleatoriedad y se presentó una forma de calcular el tamaño de una muestra para que esta sea representativa.

Los escenarios evaluados presentan variabilidad en el tiempo de recolección, por lo que estos se pueden adaptar a un ciclo o un pico de una enfermedad, en función de las instalaciones intermedias que se pueden construir, así como el tipo y número de drones.

Uno de los factores que se destacan es la capacidad de agrupar muestras en instalaciones intermedias, aprovechando las mayores capacidades y dimensiones de los drones para transportar las muestras a las instalaciones finales, lo cual se reflejó en menores distancias y costos asociados.

En los escenarios normalizados y proyectados a cinco años se observa que la distancia total recorrida

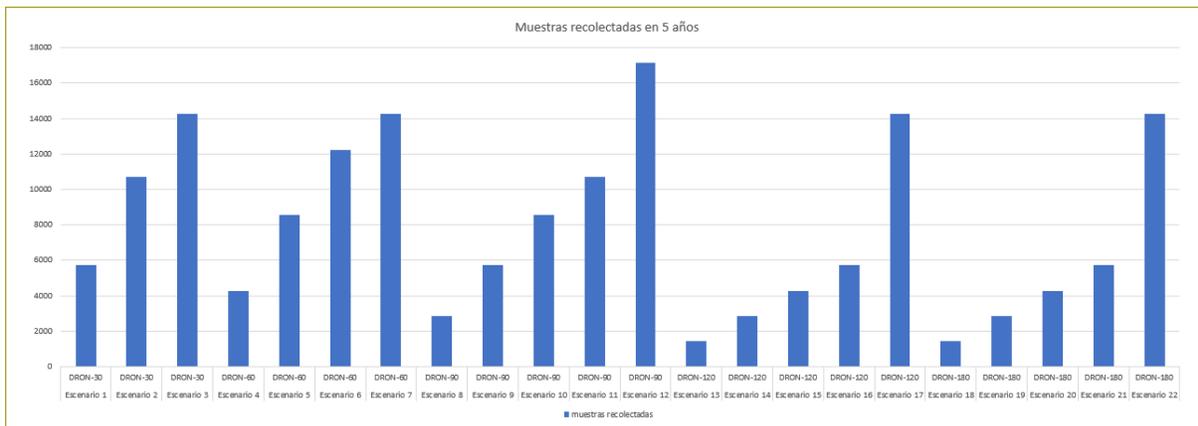


Figura 9. Resultado del total de muestras recolectadas en un periodo de 5 años.

aumentó proporcionalmente con el rango de los drones y con el tamaño de la flota. El aumento del tamaño de la flota incrementó la capacidad de recolección de los modelos, particularmente el escenario 12, el cual plantea tres instalaciones finales, cuatro instalaciones intermedias y un tamaño de flota de seis drones. Fue el escenario con mejores resultados, al recolectar 17.124 muestras en cinco años.

2.3.2 Modelo etapa 2, evaluado en el departamento del Valle del Cauca

El modelo en la etapa 2 permitió evaluar la implementación de un modelo de recolección de muestras de sangre, validando la cobertura utilizando drones y comparando su eficiencia con modos motorizados tradicionales. En primer lugar se observó, independientemente del vehículo utilizado, una disminución de la distancia total recorrida al implementar un modelo de asignación-localización y posteriormente un ruteo de vehículos, resaltando la importancia y las ventajas de la implementación del modelo logístico planteado.

Respecto a las distancias totales recorridas, a partir de los viajes individuales se observó un aumento entre el 34 % y 44 % para los viajes hechos en motocicleta, como resultado de la capacidad de los drones de realizar viajes en tramos rectos y no estar restringidos por una red física, como las vías.

Una vez analizada la distancia total recorrida, en comparación con los viajes efectuados por los pacientes, se obtuvo una reducción de la distancia de entre un 67 % y 71 % al tener motocicletas como vehículo de transporte, y una disminución de la distancia entre el 78 % y 79 % para los escenarios evaluados con drones.

En cuanto a los tiempos de viaje, el número de horas de los escenarios analizados con drones demandaron entre un 15 % y 20 % menos horas; por otra parte, para los ruteos analizados se observó que el mayor porcentaje de tiempo empleado, entre un 96 % y 97 % para los escenarios evaluados con drones y entre un 81 % y 83 % para los escenarios evaluados con motocicletas, corresponde al tiempo de servicio entre cada una de las paradas, por lo que una disminución en los tiempos de recogida, recarga y despacho de la muestra puede me-

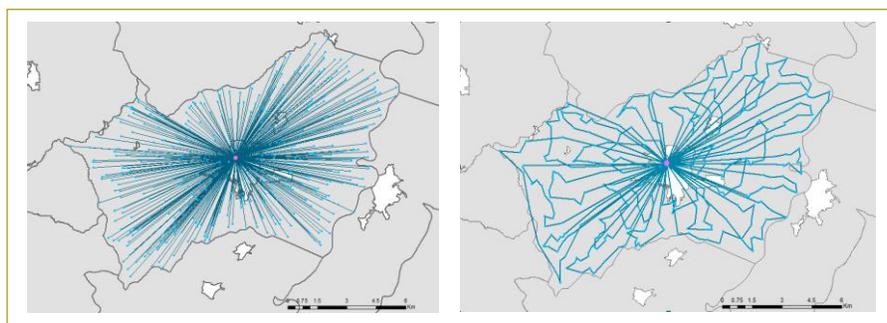


Figura 10. Optimización de los desplazamientos y tiempos de viaje al emplear el modelo logístico.

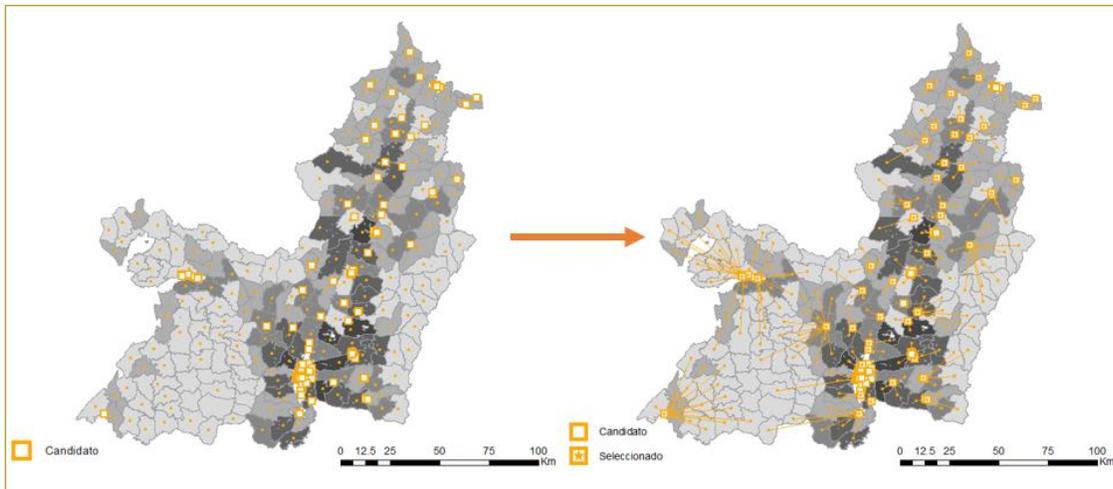


Figura 11.
Agrupación de la demanda y resolución de la etapa 2-instancia 1.

mejorar drásticamente los resultados de las modelaciones, al igual que el desempeño de estos.

Respecto a la accesibilidad, el modelo propuesto con drones puede estar en la capacidad de dar una cobertura total al departamento del Valle del Cauca, a diferencia del modelo propuesto con motocicletas, que está limitado a una infraestructura vial. De igual manera, los tiempos de desplazamiento se reducen a cero al prestarse un servicio domiciliario; las muestras se pueden analizar el mismo día, al llegar directamente a instalaciones finales o laboratorios clínicos.

La resolución de problemas con una cantidad de órdenes como la analizada (173.456 muestras) puede presentar problemas de ejecución al intentar procesar las muestras particularmente, debido al tamaño de la red y al crecimiento exponencial de las soluciones posibles; por lo tanto, un primer paso que se resalta de la metodología propuesta es la categorización y agrupación de la demanda, para el posterior desarrollo en dos fases del problema propuesto.

Los modelos efectuados, especialmente el evaluado en la primera instancia, plantean la posibilidad de discretizar el espacio, lo que conduce al diseño de una red, con una arquitectura optimizada y con menor número de nodos, lo que resulta en un análisis, control y operación del espacio más efectivos, pero con rutas menos eficientes al imposibilitar los viajes en un trayecto recto.

En relación con la arquitectura de las redes, la vial puede presentar un mejor procesamiento al estar más discretizada, a diferencia de las planteadas con los drones, ya que se generaron arcos para cada uno de los nodos. Sin embargo, se apreció que la red vial no tiene la posibilidad de llegar hasta el destino, lo cual se vio reflejado en que fue necesario localizar puntos fuera de la red al punto más cercano, con una distancia de hasta 1,5 km.

A partir de los escenarios analizados se observó que, para demandas bajas, pueden ser más efectivos los programas de recolección de muestras mediante

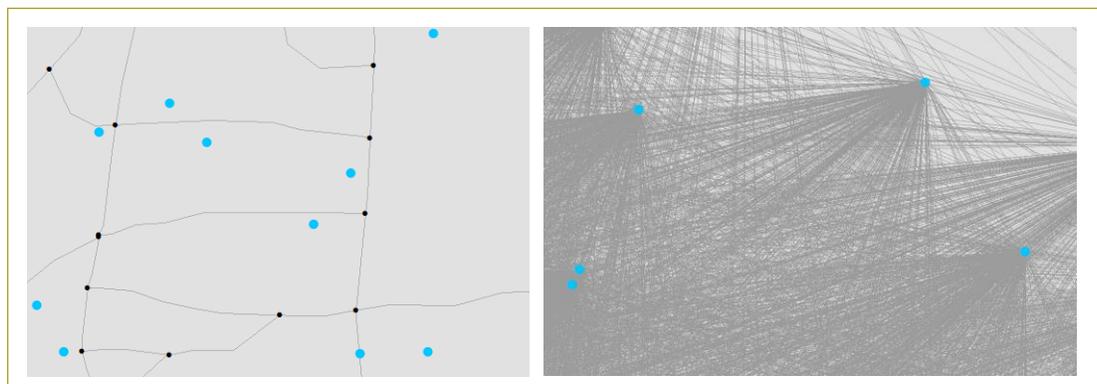


Figura 12.
Comparación de la red vial y la de drones.

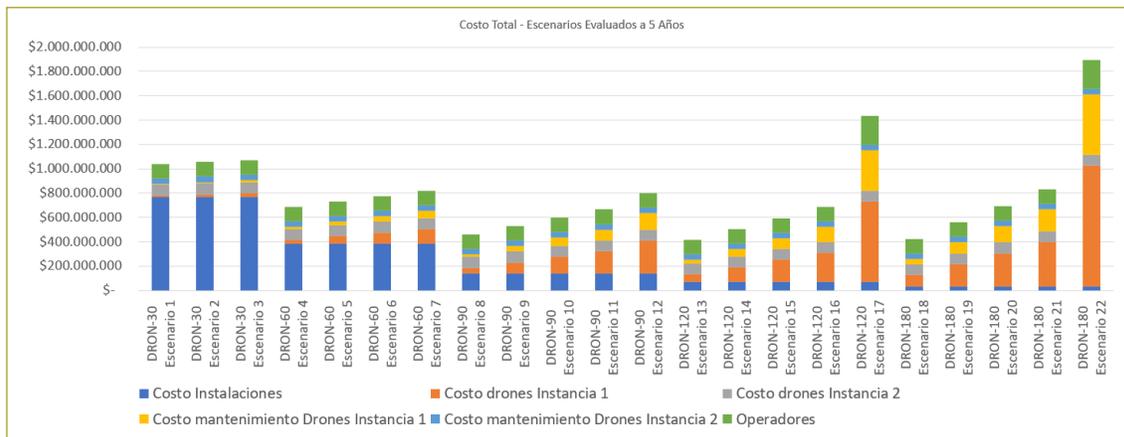


Figura 13. Costo total de los escenarios evaluados a 5 años.

motocicletas, resaltando una mayor ventaja y un mejor desempeño de los modelos evaluados con drones, proporcionales al aumento de la demanda.

2.3.3 Análisis de resultados económicos

2.3.3.1 Modelo etapa 1, evaluado en el departamento del Guainía

Una vez evaluados los escenarios en un periodo de cinco años, hay una tendencia en los costos relacionados con el rango de los drones utilizados en la operación, los cuales variaron entre los \$530.000.000 y \$1.895.000.000. Al comparar los escenarios evaluados inicialmente (una campaña) con los evaluados a cinco años, los escenarios con drones de menor rango registraron una menor variación en el costo total de las operaciones (desde 16 %), mientras que los escenarios evaluados con drones de mayor rango son aquellos que presentaron una mayor variación (hasta un 66 %).

Este comportamiento se debe a que en los primeros escenarios los mayores costos se relacionaban con las instalaciones (costos fijos), mientras que en los últimos escenarios la mayor parte de los costos está relacionada con la flota y la operación (costos variables).

En relación con el costo unitario de las muestras, se aprecia que en un periodo de tiempo de cinco años los costos fijos se distribuyeron entre una mayor cantidad de muestras recolectadas, por lo que el valor unitario fue menor. El menor valor unitario en un periodo a cinco años fue el del escenario 12, con un valor de \$46.718 por muestra.

2.3.3.2 Modelo etapa 2, evaluado en el departamento del Valle del Cauca

Al comparar el costo total de los escenarios base, se apreció que fueron más costosos los escenarios evaluados con drones comparados con los escenarios de

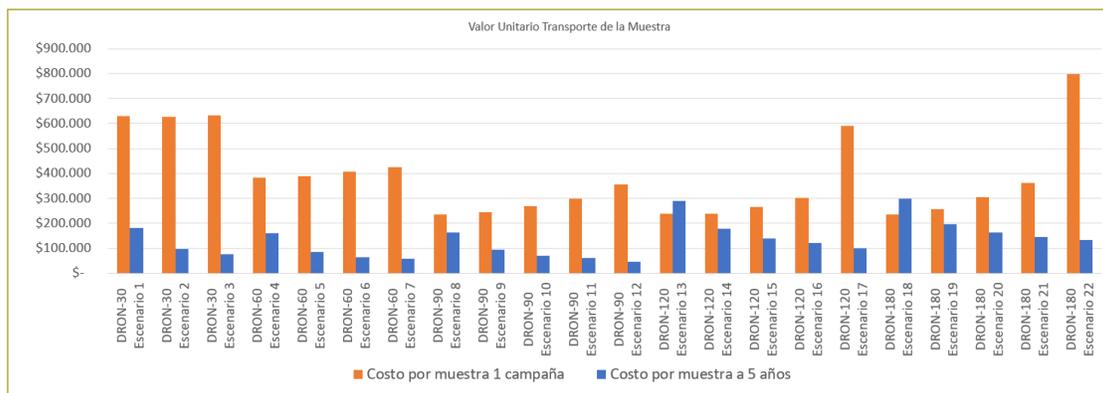


Figura 14. Valor unitario de la muestra.

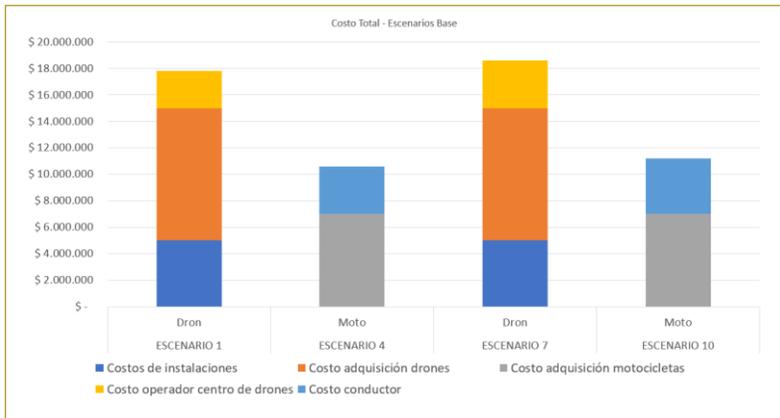


Figura 15. Costo total de los escenarios base evaluados en el Valle del Cauca.

motocicletas, diferencia que se presentó, principalmente, por los costos relacionados con la adquisición de los vehículos.

Por otra parte, se observó un valor similar entre los escenarios base que se evaluaron con el mismo tipo de vehículo, por lo que en principio los escenarios que se extrapolaron de estos pueden mostrar un panorama general de la recolección de muestras para todo el departamento; sin embargo, se puede obtener un mejor acercamiento modelando la operación logística para la totalidad del departamento.

En los escenarios evaluados con el objetivo de recolectar las 43.364 muestras (una muestra por paciente anual) y 173.456 muestras (cuatro muestras por paciente anual), se observa que los escenarios con un menor costo fueron los ejecutados con drones, con un valor de \$188.000.000 para la recolección de 43.364 muestras anuales y de \$694.000.000 para la recolección de 173.456 muestras anuales; en contraste, los escenarios de recolección con motocicletas tuvieron un costo que oscila entre \$496.000.000 y \$1.891.000.000, lo que representa un incremento que va del 164 % al 172 % entre los modelos evaluados.

Finalmente, se observó que la principal diferencia en los costos se relacionó con los operadores de los vehículos. Se destaca la capacidad de los modelos con drones, en los cuales un solo operador se puede encargar de varios vehículos al tiempo.

En los escenarios evaluados a cinco años se observó una mayor diferencia en los costos totales de los escenarios evaluados con drones y motocicletas, con un costo total que varió entre los 445.000.000 y los \$1.530.000.000 en los escenarios con drones, y entre \$2.088.000.000 y 7.960.500.000 para los escenarios con

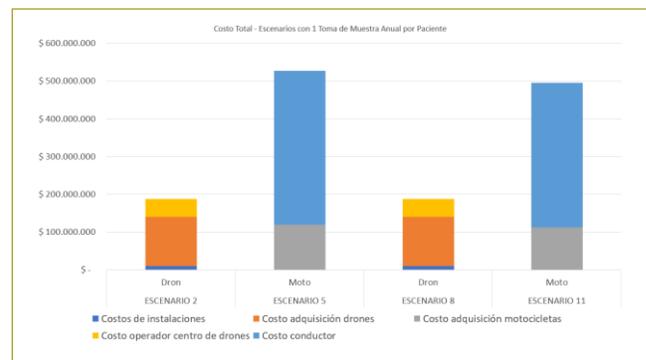


Figura 16. Costo total de los escenarios planteando la recolección de una muestra anual por paciente.

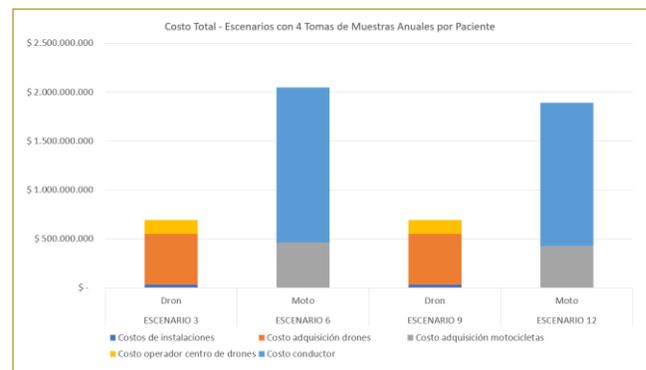


Figura 17. Costo total de los escenarios planteando la recolección de cuatro muestras anuales por paciente.

motocicletas, lo que representa una diferencia entre el 369 % y 420 %. Comparando los escenarios anuales y los evaluados a cinco años se presentó un incremento hasta del 137 % para los escenarios evaluados con drones y del 321 % para los escenarios evaluados con motocicletas.

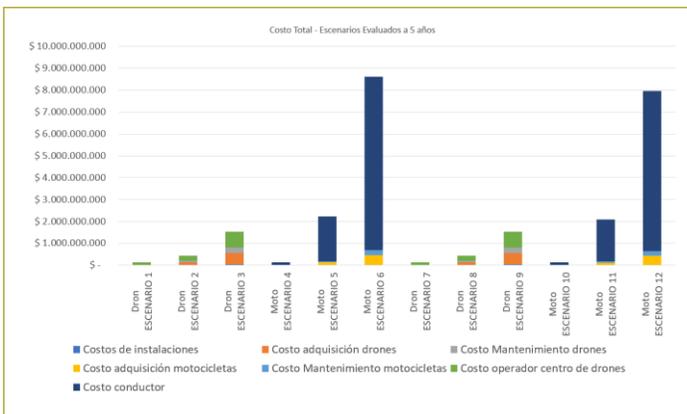


Figura 18. Costo total de los escenarios evaluados a 5 años en el Valle del Cauca.

Respecto al costo unitario por muestra en los escenarios evaluados a cinco años, se presenta una reducción en el costo unitario por muestra, tanto en los escenarios evaluados con drones como en los escenarios evaluados con motocicletas; para el caso de los drones, se estimó un costo unitario de \$1.764, mientras que para las motocicletas se calculó un costo unitario de \$9.179, lo que equivale a una diferencia del 420 %.

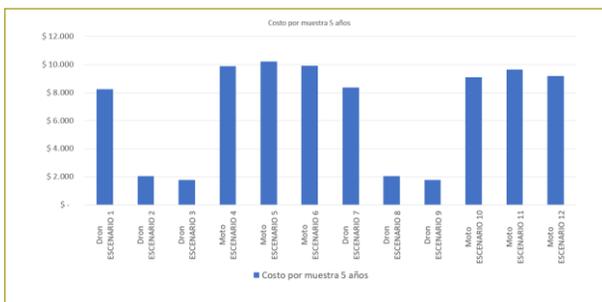


Figura 19. Valor unitario del transporte de una muestra en el departamento del Valle del Cauca, evaluado a 5 años.

CONCLUSIONES

Se planteó un modelo de transporte de muestras de sangre por medio de drones, el cual se dividió en dos etapas: estratégica y táctica-operativa. Las operaciones logísticas propuestas se desarrollaron en un entorno de operación, el cual se ejecutó bajo un marco regulatorio nacional que permite los vuelos de drones a una altura inferior a los 120 m, si bien la normativa se encuentra en una etapa de maduración y con varios aspectos por definir. Respecto a la estructura del espacio aéreo se adoptó la propuesta de (Mc Carthy, Pforte, & Burke,

2020), en la que se toman en cuenta tres aspectos fundamentales, relacionados con la identificación y clasificación del espacio aéreo, la automatización de las operaciones aéreas y la creación de una red capaz de solucionar posibles conflictos en las trayectorias.

Se hizo un diagnóstico cuantitativo y cualitativo en el ámbito departamental al estudiar estadísticas poblacionales, de salud y de la infraestructura vial colombiana; además, se identificaron los departamentos con menor cobertura y acceso a los servicios de toma de muestras de laboratorio clínico. Para las enfermedades de malaria y diabetes tipo 2, las regiones con indicadores más bajos fueron Guainía y Valle del Cauca.

En la etapa estratégica se planteó un modelo, con el propósito de aumentar la accesibilidad y la cobertura de los servicios de salud; este se desarrolló en dos instancias: la primera, con el objetivo de minimizar las instalaciones o centros de recogida; la segunda, con el fin de reducir las instalaciones y la longitud total recorrida para transportar las muestras desde los centros de intermedios hasta los laboratorios clínicos.

A su vez, en la etapa táctica-operativa se planteó un modelo para brindar la cobertura de servicios en áreas rurales y evitar así los desplazamientos de los usuarios a las instalaciones de servicio, ofreciendo servicios de recolección domiciliaria, minimizando la longitud total recorrida, reduciendo el tiempo y los costos y optimizando la recolección de muestras mediante la programación de rutas para los vehículos que recogieron los ejemplares.

Se demostró que, independientemente de los vehículos que se van a implementar en las operaciones, la planeación de un modelo logístico de asignación, localización y programación de rutas presenta una ventaja y reducción de costos al ofrecer un servicio domiciliario especializado, comparado con la movilización de los usuarios a las instalaciones de servicios.

Los modelos propuestos se realizaron teniendo en cuenta cuatro variables principales: la localización, la demanda, el tiempo y la longitud de los recorridos. En estudios futuros, con un nivel de detalle especializado en la operación, es importante considerar la opción de incluir variables adicionales relacionadas con los drones, como la energía y el método de refrigeración, y aspectos referentes al entorno, como la topografía, las condiciones climáticas y las redes de comunicación, al igual que la arquitectura del espacio aéreo.

Con el primer modelo, evaluado en el departamento del Guainía, se buscó recolectar 1429 muestras en diferentes ventanas de tiempo. Ese modelo sirvió para validar la optimización de la recolección al agrupar las muestras en instalaciones intermedias y luego transportarlas a las instalaciones finales. Se evaluaron 22 escenarios y se concluyó que aquellos con drones de menor rango garantizan un número mayor de operaciones diarias, lo cual puede ofrecer una operación más flexible en cuanto a los tiempos de planeación y recolección de muestras; por esto, algún retraso o alguna reprogramación de rutas tiene una menor incidencia.

Por otra parte, los escenarios evaluados con drones de menor rango suponen la facilidad de la construcción de instalaciones intermedias, en tanto que los escenarios evaluados con drones de mayor rango suponen la dificultad de la construcción de estas. En cuanto a la distancia total recorrida, la mayor proporción de distancia se recorrió en la recolección de muestras a instalaciones intermedias, mientras que los modelos con drones de menor rango recorrieron menos distancia que modelos evaluados con drones de mayor rango. Así mismo, el aumento del número de drones representó una disminución en la distancia total recorrida debido a la agrupación de muestras.

Entre los escenarios evaluados, el escenario 12 presentó un mejor comportamiento, al recolectar 17.124 muestras en 5 años; este planteó 3 instalaciones finales, 4 instalaciones intermedias y un tamaño de flota de 6 drones. El costo calculado de implementación de este modelo fue de \$810.000.000, con un valor unitario por muestra de \$46.718.

En el segundo modelo, que se evaluó en el departamento del Valle del Cauca, se implementó una operación de recolección de muestras de sangre; se validó la cobertura utilizando drones y comparando su eficiencia con modos motorizados tradicionales. Respecto a las distancias totales recorridas, a partir de los viajes individuales se observó un incremento que oscilaba entre el 34 % y 44 % para los viajes efectuados en motocicleta.

A su vez, con la motocicleta como vehículo de transporte se consiguió una reducción de la distancia entre un 67 % y 71 %, mientras que para los escenarios evaluados con drones se logró una disminución de la distancia entre el 78 % y 79 %. En los escenarios evaluados con el objetivo de recolectar 43.364 muestras (una muestra por paciente anual) y 173.456 muestras

(cuatro muestras por paciente anual), se halló que los escenarios con un menor costo fueron los ejecutados con drones, con un valor de \$188.000.000 para la recolección de 43.364 muestras anuales y de \$694.000.000 para la recolección de 173.456 muestras anuales, así como un valor unitario del transporte de ejemplares de \$4.001 y \$1.764, respectivamente.

Diversos entornos de operación en los que se han implementado estos modelos de transporte están asociados a áreas rurales, donde, al tener una menor densidad de transporte aéreo convencional y una baja densidad de operaciones, se requieren una menor investigación y arquitectura del espacio aéreo; en estos entornos los riesgos terrestres y aéreos asociados a la operación son menores, dado que no se involucran tantos actores, en comparación con entornos urbanos o de mayor desarrollo.

En las arquitecturas de la gestión de tráfico aéreo de drones se destacaron la importancia y la priorización que tienen los viajes relacionados con la salud, siendo este uno de los primeros temas abordados y en desarrollo en materia regulatoria, lo cual plantea una posibilidad y una viabilidad para este tipo de servicios; en este sentido, sobresalen los temas relacionados con el bienestar por su impacto social.

Por otra parte, los drones adaptados para las operaciones logísticas necesitan sistemas redundantes de energía, propulsión, *hardware* y comunicaciones para garantizar la seguridad durante el vuelo, minimizando los riesgos y aumentando la fiabilidad del transporte.

Los modelos analizados se validaron para operaciones exclusivas, relacionadas con transporte de muestras de sangre; sin embargo, se observó una mejora potencial, que consiste en la posibilidad de emplear los servicios de ida hasta el punto de demanda, ofreciendo otros servicios de transporte, que pueden estar relacionados o no con temas de salud, con el fin de brindar accesibilidad a otro tipo de servicios o mercancías y disminuyendo la subutilización de los equipos, lo que permitirá reducir la tarifa asociada a un solo servicio.

REFERENCIAS

Amukele, T. K., Sokoll, L. J., Pepper, D., Howard, D. P., & Street, J. (2015). Can unmanned aerial systems (drones) be used for the routine transport of chemistry, hematology, and coagulation laboratory specimens? *PLoS ONE*.

- Aschner, P. (2010). Epidemiología de la diabetes en Colombia. *Avances en Diabetología*, 95-100.
- Gerald, J. K. (2017). Diabetes spatial care paths, leading edge HbA1c testing, facilitation thresholds, proactive-preemptive strategic intelligence, and unmanned aerial vehicles in limited-resource countries. *Point of Care*.
- Instituto Nacional de Salud (2018). *Informe del Evento. Malaria*. Colombia.
- Kim, S. J., Lim, G. J., Cho, J., & Côté, M. J. (2017). Drone-aided healthcare services for patients with chronic diseases in rural areas. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*.
- McCarthy, T., Pforte, L., & Burke, R. (2020). Fundamental elements of an urban UTM. *Aerospace*.
- Ochieng, W. O., Ye, T., Scheel, C., Lor, A., Saindon, J., Lin, S., . . . Karem, K. (2020). Uncrewed aircraft systems versus motorcycles to deliver laboratory samples in West Africa: a comparative economic study. *Lancet Glob Health*, e143-e151.
- Padilla, J., Rico, A., & Usta, C. (2001). Malaria en Córdoba: situación epidemiológica y medidas de prevención. *Informe Quincenal Epidemiológico Nacional*, 49-55.
- World Health Organization (2004). *Medicines strategy: countries at the core, 2004-2007*.

Última milla: articulación intermodal del transporte informal como alimentador del sistema de transporte público masivo de la ciudad de Bogotá (Transmilenio)

Last mile: Intermodal articulation of informal transportation as a feeder for mass public transportation system of the city of Bogotá - Transmilenio

SEBASTIÁN PARADA CELIS¹ - MARITZA CECILIA VILLAMIZAR ROPERO²

1. Magíster en Ingeniería Civil de la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

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

sebastian.parada@mail.escuelaing.edu.co - maritza.villamizar@escuelaing.edu.co

Recibido: 06/12/2021 Aceptado: 20/01/2022

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

Resumen

En este artículo se habla sobre el funcionamiento polémico del transporte de la ciudad de Bogotá, evaluado desde su falta de cobertura y alcance, justificado por el surgimiento de transportes públicos informales. Se presenta una investigación que aísla el funcionamiento y las condiciones del transporte público y se enfoca en la cobertura de este, donde el surgimiento de transportes informales, nacientes ante las necesidades de transporte de los usuarios, justifica la falta de alcance del sistema masivo en los viajes complementarios del transporte.

Mediante la evaluación de un caso de estudio se demuestra que en el sector de estudio la cobertura de transporte formal es insuficiente, se evalúan la existencia y la articulación intermodal de sistemas de transporte público formal e informal, dadas a partir de la falta de cobertura del sistema de transporte público formal.

Se realiza la investigación a partir de la evaluación de un caso de estudio correspondiente al área de influencia de la estación de Toberín, donde se caracteriza la zona, se evalúan la cobertura, la existencia de modos de transporte informales y la interacción de estos con el sistema de transporte formal, así como también la percepción de los usuarios ante el servicio informal presentado.

Ante esto, se evidencia la articulación modal entre modos de transporte formales e informales, naciente ante las necesidades de movilización

de los usuarios, teniendo en cuenta la informalidad como servicio complementario al transporte formal, enfocado en el transporte de usuarios en etapas complementarias del transporte.

Palabras claves: transporte público, última milla, transporte informal, bicitaxi, etapas del transporte, cobertura de transporte público.

Abstract

The controversial operation of transportation in the city of Bogotá evaluated from the lack of coverage and reach is justified from the emergence of informal public transport. A research is presented that isolates the operation and conditions of public transport and focuses on its coverage, where the emergence of informal transport, born to the transportation needs of users justifies the lack of reach of the mass system in complementary transport trips. Through the evaluation of a case study, it is demonstrated that in this field, transport coverage is insufficient. The existence and intermodal articulation of formal and informal public transport systems is evaluated due to the lack of coverage of the formal public transport system. The research is based on the evaluation of a case study corresponding to the area of influence of Toberín station, where the area is characterized. Its coverage, the existence of informal transportation modes, and their interaction with the formal transportation system are assessed, as well

as the users' perception of the informal service presented. In view of this, the modal articulation between formal and informal modes of transport is evidenced, brought about in response to the mobilization needs of users, considering informality as a complementary service to formal transport, which is focused on the transport of users in complementary stages of transport.

Keywords: public transport, last mile, informal transport, bicycle cab, transport stages, public transport coverage.

INTRODUCCIÓN

A lo largo de este artículo se analiza el transporte público de la ciudad de Bogotá, D.C., como tema de investigación, donde la implementación de sistemas de transporte masivo tipo BRT y la articulación intermodal entre medios de transporte no satisfacen las necesidades de los usuarios. Por esto, se imponen modos informales emergentes presentados por el ciudadano y para el ciudadano, satisfaciendo necesidades que no son resueltas en su totalidad por el sistema de Transmilenio, enmarcadas principalmente por la falta de cobertura de transporte para la última o primera milla del usuario.

Se enmarca el uso del transporte público como uno de los principales promotores de desarrollo, al tratarse de un sistema colectivo que satisface las necesidades de grupos de personas que requieren la movilización, y que permite a sus usuarios desplazarse de manera rápida, económica y sostenible (Namara, 2020).

Aunque en la ciudad existen redes estratégicamente distribuidas mediante rutas de buses interurbanos, sistemas de metro o sistemas BRT, el viaje no empieza o termina exactamente al subir a un bus o al bajar de este, sino que tiene etapas complementarias, que en este caso se denominan “primera o última milla”, correspondientes a los trayectos que tiene que recorrer un usuario desde su origen hacia el transporte público o

del transporte público hacia el destino, respectivamente; esto indica que la dificultad de recorrido de las etapas depende de las condiciones del territorio. Por otro lado, se resalta la palabra *intermodalidad* como parte de las etapas del viaje, correspondiente a la articulación de diferentes modos de transporte para hacer un recorrido.

Si bien se concibe el transporte público como la movilización en vehículos de un punto a otro, se debe resaltar el concepto de etapas del transporte, ya que comúnmente se piensa el viaje en transporte público como un solo recorrido en un vehículo, sin tener en cuenta que para la culminación de dicho viaje existen etapas. Se parte de la premisa de que las líneas de transporte público transitan por las principales avenidas de las ciudades y barrios, es decir, que son rutas cercanas a puntos de origen/destino a las que usuarios se aproximan para acceder al sistema. Por tal razón, para el acercamiento previo al acceso hay que hacer recorridos fuera del vehículo o en otro tipo de vehículo, lo que se puede denominar etapas complementarias del transporte público. El concepto viaje en transporte público corresponde a un conjunto de recorridos conformado por un viaje principal en vehículo de transporte de pasajeros, complementado por recorridos desde punto de origen hasta paraderos (primera milla), tiempos de espera, transbordos si es necesario y recorridos desde el paradero hasta el destino (última milla), como se ilustra a continuación (figura 1) (Garnica Quiroga, 2020).

Aunque en el transporte público de pasajeros en Bogotá es el Estado el que lleva las riendas del funcionamiento por intermedio de entidades como Transmilenio y el SITP, que buscan “integrar” el transporte, este no satisface todas las necesidades de los usuarios; por esto se ven niveles de servicio deficientes, a causa de factores como la alta demanda, falta de infraestructura, nume-

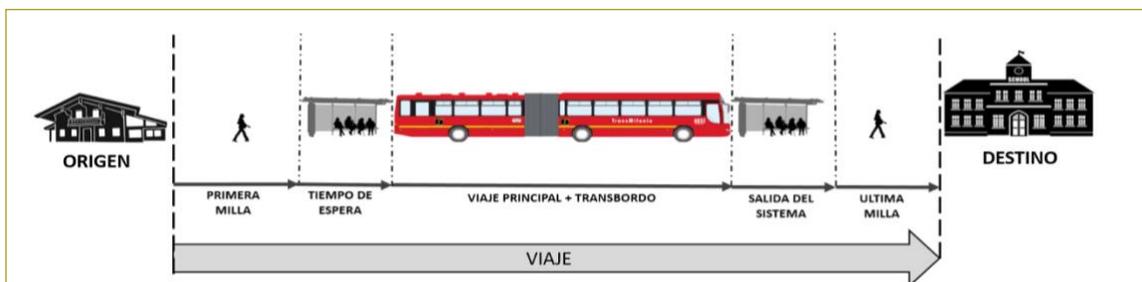


Figura 1. Esquema de etapas de un viaje en transporte público.

Fuente: Elaboración propia.

rosos viajes generados desde y hacia el mismo punto, y mala planeación territorial, sumados a la cobertura insuficiente para la última y primera milla. Un punto que cabe mencionar es que se dejan muchos sectores sin acceso digno al sistema de transporte o con largas distancias para el acceso a este, obligando a los usuarios a crear soluciones propias para estas etapas.

Ante las falencias de transporte de la ciudad, además de otros aspectos socioeconómicos, nace la informalidad en el transporte público, en respuesta a las necesidades de transporte insatisfechas, propuesta por el ciudadano como un modo de transporte alternativo, y adaptativo ante la ausencia de transporte formal, en especial para la etapa de última milla. Esta es una opción de apoyo al transporte público, que si bien se mueve en la informalidad y no trabaja en conjunto con el sistema de transporte formal, opera en condiciones organizacionales establecidas, con el objetivo de contribuir al transporte, donde, aparte de presentar modos de transporte, se benefician tanto el movimiento de la economía como la generación de empleos.

El transporte informal es un servicio que se presta con la finalidad de complementar las rutas por donde aún no se generan transportes colectivos o individuales, como salir de una vía terciaria o llegar a esta, pero desconociendo las normas de tránsito o prestando el servicio en condiciones inseguras o con poca calidad para el usuario final.

En el caso de Colombia, se cuenta con el Estatuto General de Transporte (Ley 336 de 1996) y el Decreto 1079 de 2015 (actualizado en mayo de 2021), del cual se define el servicio de transporte informal como aquel transporte público colectivo prestado por vehículos particulares que no están afiliados a empresas legalmente constituidas y que, por ende, no prestan su servicio en condiciones óptimas y seguras para el usuario.

En materia de transporte informal, uno de los transportes públicos informales más vistos en la ciudad de Bogotá es al bicitaxi (triciclo de pedaleo, pedaleo asistido con motor eléctrico o de combustión y similares), que nace ante la falta de cobertura de transportes como Transmilenio y SITP en sectores marginados o de difícil acceso, y se presenta como un transporte de preferencia para viajes cortos, eficaz para los recorridos de última milla.

La prestación del servicio de bicitaxis en la ciudad de Bogotá se remonta al año 1997, cuando nace como

un modo alternativo de transporte público, a causa de la aglomeración poblacional que se presentaba, principalmente, en las estaciones de Transmilenio, en las que se ofrecía un servicio de transporte que comunicaba al usuario con su destino final, debido a la ausencia de un transporte público que supliera sus necesidades de manera eficiente y con el confort que el usuario esperaba obtener en su viaje (Corte Constitucional de Colombia, 2013).

Los bicitaxis son un modo informal de transporte destinado a fines de desplazamiento en la ciudad de Bogotá. Aunque se organizan mediante gremios, hoy en día trabajan de manera independiente y no existe ningún control sobre su funcionamiento. En la actualidad, el bicitaxi se presenta como uno de los transportes informales de mayor uso en la ciudad, con un crecimiento en la última década del 52 %, con un aproximado de 4646 vehículos para el año 2019, según datos de mediciones presentados por la Secretaría de Movilidad Distrital en un balance general en cuanto a la articulación del bicitaxi a la movilidad urbana (figura 2).

El bicitaxi, al igual que otros transportes informales, busca mantenerse en pie en una sociedad en la que no es aceptado por dirigentes y gremios del transporte; parcialmente regulado, lucha por la articulación y formalización del servicio, justificando su importancia al ser funcional para etapas de transporte como última/primera milla, presentando además beneficios a la población, como ser una fuente de empleo y movimiento financiero.



Figura 2. Bicitaxis en la ciudad de Bogotá en el año 2019.

Fuente: Secretaría Distrital de Movilidad, 2019a.

El propósito de la investigación es dar por demostrado, a través de un caso de estudio, la falta de cobertura del transporte público como oportunidad de articulación de transporte mediante el surgimiento de modos de transporte informales que se enfocan en dar cobertura a las etapas no atendidas en la formalidad, teniendo en cuenta que como respuesta ante la falta de cobertura se presenta un servicio adaptativo a las condiciones de cada sector, se brindan al usuario alternativas de transporte y se presenta hacia las zonas sin cobertura.

CARACTERIZACIÓN Y ELABORACIÓN DE ESTUDIOS

La estación Toberín forma parte del sistema Transmilenio. Ubicada sobre la troncal de la autopista norte, ofrece rutas de transporte que llegan a conectar con el Portal del Norte y con las otras troncales de Transmilenio. Está localizada en la autopista Norte entre calles 163 y 167, entre las localidades de Suba y Usaquén, y se accede a esta mediante un puente peatonal.

Se da la elección de la estación, ya que se encuentra ubicada en medio de dos localidades con variedad en uso de suelos y estratificación socioeconómica. Considerando que la cuenca de servicio de esta abarca por el occidente desde el sector de Colina Campestre sobre la avenida Boyacá, por el oriente hacia el sector del Toberín sobre la avenida carrera séptima, por el norte presenta captación hasta la avenida calle 170 y por el sur hacia la calle 163, teniendo en cuenta que para los sectores mencionados la estación más cercana es Toberín. Se realiza la identificación de uso de suelos del sector con el fin de tener diversidad en materia de usuarios, en busca de abarcar sectores residenciales, de industria y comercio; además, hay diferencia de estratos socioeconómicos, puesto que es un sector de estratos 3, 4, 5 y 6.

Se hace una definición preliminar de la cuenca poniendo unos límites, partiendo de la disposición geográfica del sector y de las ofertas de transporte en la zona; para esto, se delimita la cuenca con las estaciones de Transmilenio más cercanas de este modo. Hacia el costado sur la estación más cercana corresponde a la estación Calle 161, para lo cual se delimita la mitad de la distancia como separación de las cuencas de las estaciones; por otro lado, hacia el costado norte, se encuentra el Portal del Norte, pero con la particularidad

de la existencia en una avenida que delimita las cuencas. En este caso, se hace uso de la avenida calle 170 como delimitación hacia el costado norte de la cuenca de la estación Toberín.

Teniendo clara la definición de cobertura entre los sentidos norte y sur de la cuenca, dada la delimitación por estaciones y calles cercanas, hay que considerar que para los costados oriental y occidental no existen estaciones de Transmilenio que puedan llegar a delimitar las cuencas. Para realizar la delimitación de la cuenca en los costados oriental y occidental, se parte de la información de los recorridos hechos en campo; se delimita a partir de la presencia de modos de transporte informales que llevan usuarios a la estación, para lo cual se hace el seguimiento a estos vehículos para evidenciar la cobertura que brindan y así poder delimitar hacia los sentidos oriental y occidental.

Los recorridos, el acercamiento y el seguimiento hechos al transporte informal en la cuenca denotan una organización estratégica creada por quienes ofertan el transporte, que facilita el transporte de pasajeros y da cubrimiento a zonas aledañas a la estación.

Se identifica la oferta de transportes alternativos informales, como bicitaxi, triciclos con pedaleo asistido por motor de combustión y microbuses particulares “piratas” hacia las cercanías de la estación, teniendo en cuenta la existencia de formación y organización de grupos de vehículos informales a las afueras de la estación en cada costado dispuestos de manera organizada, esperando el turno para llevar a los pasajeros; así mismo, se evidencia en cada costado una persona que cumple la función de organizar rutas, llamar clientes y asignar los vehículos a los usuarios.

Al entrar a un acercamiento con el transporte informal para delimitar la cuenca de la estación se logra conocer el alcance de esta a partir de los recorridos máximos que realiza el transporte informal, teniendo en cuenta que los grupos de bicitaxistas han dispuesto paraderos alrededor de la cuenca de la estación, donde llevan y recogen usuarios; además, plantean rutas y alcance máximo, partiendo de que ellos tienen cierta delimitación de recorridos máximos y la ofrecen mediante una tabla con sus alcances máximos.

Se delimita la zona hacia el oriente con base en el alcance máximo que dan los “carros piratas”, los cuales parten de la estación Toberín y hacen recorridos hacia la zona comúnmente conocida como La Mariposa.

Los conductores afirman hacer recorridos hasta la zona donde dejan a los pasajeros en una zona central del barrio.

Se delimita la zona hacia el occidente partiendo del alcance máximo, donde el cubrimiento se da de igual manera por los carros “piratas” y los bicitaxis, que parten de la estación Toberín hasta la avenida Boyacá, donde recogen pasajeros que se acercan desde el sector comprendido entre la avenida Boyacá y la carrera 74, teniendo en cuenta que allí se delimita la zona urbana con el cerro.

Para la comprensión del transporte en la zona de estudio, se evalúan los servicios ofrecidos, tanto formales como informales; se parte de la existencia de zonas de análisis de tránsito (ZAT), en las que se monitorean, se estudia y se hacen encuestas relacionadas con transporte y movilidad en sectores de la ciudad. Teniendo en cuenta esto, según las encuestas de movilidad de 2019 y la información tabulada en los anexos de matrices de viajes de orígenes y destinos, para las ZAT, comprendidas en la delimitación de la cuenca, en el año 2019 se efectuaron 71.484 viajes diarios desde la zona y 72.948 viajes diarios hacia la zona, teniendo una totalidad de viajes de 144.430 en movimiento diario, que requieren atención. Todo esto genera demanda elevada de cobertura en la última y primera milla de transporte, ya que que se tendrían que recorrer distancias de hasta 6 km para el acceso al transporte.

Así mismo, en los recorridos hechos en la zona se identifica la presencia de organizaciones que ofrecen el servicio de transporte para trayectos dentro de la zona o lugares cercanos, con la particularidad de que son informales.

Hacia la salida de la estación Toberín, en ambos costados, se concentran grupos de bicitaxis (mototaxi y bicitaxis) y se observa la presencia de microbuses que no pertenecen al SITP y que operan en la informalidad, ofreciendo transporte dentro del área de influencia de la estación.

Una vez hecho un acercamiento es posible evidenciar que existen estructuras organizacionales establecidas, al ver grupos de vehículos organizados por color en varios lugares. Además, hay comportamientos diferentes en cada costado de la estación, así como en la calle 166 con carrera 46; en la parte trasera de la salida del puente peatonal hay un grupo de microbuses, dispuestos sobre la calzada, con una fila de siete vehículos, los cuales

inician su viaje hasta completar un cupo aproximado de ocho personas.

En la cuenca de servicio de la estación Toberín existen aproximadamente 230 bicitaxis que prestan el servicio de transporte de pasajeros desde la estación a diferentes puntos o desde determinadas paradas hacia la estación, teniendo en cuenta que hay un servicio estandarizado y organizado mediante microorganizaciones que llevan un orden y las riendas de la prestación de servicio en busca de prestar un buen servicio a la comunidad y evitar la denominada “guerra del centavo”.

Los bicitaxis del sector de Toberín trabajan en una organización liderada por los denominados “pioneros”, líderes del sector con quienes empezó el servicio de transporte de pasajeros en triciclo. Ellos son los encargados de la organización de factores como horarios, rutas, tipo de conductores, paradas, tarifas y demás, teniendo en cuenta que los operadores de bicitaxi afirman que son los “pioneros” los que permiten el trabajo en el sector y ponen los estándares para que el vehículo pueda trabajar, así como el precio de los cupos para la circulación.

Los horarios de trabajo son de 5:00 a.m. a 11:00 p.m., pero se disponen dos días de pico y placa a los vehículos, cuando es día de restricción, solamente pueden trabajar de 6:00 a.m. a 6:00 p.m. y en el caso de que sean vistos laborando fuera de la hora son sancionados.

Vale la pena anotar que en la zona hay tres tipos de vehículos operando: bicitaxis con motor eléctrico, con motor de gasolina y de pedaleo. Cada uno tiene condiciones particulares en cuanto a rendimiento, contaminación y consumo.

Los vehículos son, en su mayoría, alquilados. El alquiler se paga por día, dependiendo del tipo de vehículo: de motor eléctrico, \$50.000; de motor de gasolina, \$35.000, y de pedaleo, \$25.000.

En la cuenca de servicio de la estación Toberín existen cinco grupos de bicitaxis, organizados por colores y con un nombre específico, que además de tener rutas y paraderos se caracterizan por organizar a sus operadores dependiendo de la nacionalidad, en este caso colombianos y venezolanos. Cabe destacar que las oportunidades de trabajo son iguales para ambos grupos y existe una persona que intercala uno por uno los servicios para los operadores de cada nacionalidad. Los grupos organizados en el sector se clasifican por el

costado de la autopista en que trabajan y por el color de los vehículos, pero todos los grupos tienen las mismas tarifas, con unos valores predeterminados.

Como resultado de esto se presenta un plano de caracterización general que permite ilustrar las condiciones de transporte y la cobertura de la cuenca de servicio, considerando que dicha cobertura es bastante amplia y las distancias de caminata para acceso superan los 6 km, haciendo que el sistema sea poco accesible para todos los usuarios. Aunque existen sistemas de transporte y rutas del SITP en la zona y se presentan rutas que dan la cobertura, son escasos para la alta demanda de viajes en el sector y hacia el sector, sumados a la incomodidad al no haber buenas condiciones de espacio público y paraderos.

El surgimiento de transportes informales se da en busca de cubrir la demanda insatisfecha y cumplir el papel de alimentar a la estación y ser el modo de transporte preferente para última milla, ya que está a la mano, es económico y más rápido que tomar bus, teniendo en cuenta que según datos de la Secretaría de Movilidad, tomados de las ZAT, en la cuenca de servicio de la estación de Transmilenio Toberín se generan en promedio 144.430 viajes diarios en el transporte público, para los cuales los usuarios recorren distancias de primera y última milla, utilizando modos de transporte informales ofertados en el sector.

Al hacer una evaluación al sistema en general de bicitaxis se podría llegar a decir que es un modo de transporte con gran aceptación, que cumple el papel de generar conectividad en los sectores en los que es difícil acceder al transporte público, o simplemente para recortar la brecha entre orígenes/destinos y paraderos de transporte público, siendo eficiente en los recorridos propuestos.

Se conoce la condición de informalidad del modo de transporte, así como la baja aceptación por entidades estatales, situación que genera baja regulación ante el servicio prestado, partiendo de condiciones laborales inadecuadas, explotación laboral, malas condiciones de vehículos, altos índices de contaminación y ruido y accidentalidad vial (sobre todo en los bicitaxis con motor); sin embargo, ya hay ciertos parámetros identificados para resolver este problema con una posible reglamentación del servicio. Con todo, en términos generales, este sistema cumple con el propósito de transportar usuarios; además, hasta el momento ha servido para

complementar y alimentar los sistemas de transporte, y aunque no esté articulado, hace que el transporte de la ciudad tenga más cobertura.

Otro de los servicios de transporte identificados son los microbuses, que se presentan como alternativa para transporte de usuarios en sus etapas de última y primera milla, puesto que corresponde a un grupo reducido de vehículos que ofrecen el servicio de transporte. Hay que tener presente que por las condiciones de los vehículos la ubicación de estos no es tan estratégica ni atractiva para los usuarios, aparte de que no es tan reconocido para servicios de última o primera milla, por lo que no llega a ser tan popular en relación con modos de transporte como el bicitaxi.

Los servicios de bicitaxi y microbuses, aunque no trabajan en conjunto, se complementan al generar alternativas de transporte dentro de la cuenca de servicio, donde el transporte público no llega o es de difícil acceso. Estos dos modos de transporte mencionados anteriormente se adaptan a las necesidades de los usuarios, ya que se ofrecen servicios rápidos y para todo tipo de condiciones, como zonas planas o montañosas; además, se destaca su disponibilidad en todo momento y el fácil acceso a estos.

Por otro lado, al revisar la percepción de los usuarios y la aceptación del sistema se evidencia que el transporte público de pasajeros evaluado en las etapas complementarias de un viaje, es un tema que ante la percepción de los usuarios presenta algunas fallas; se identifica la falta de cobertura de los sistemas de transporte, ya que, debido a condiciones como falta de planeación, altas demandas y crecimiento poblacional, no se cubre la demanda generada en su totalidad o se cubre parcialmente, dejando las etapas complementarias sin mucha atención y con altas necesidades.

Un alto porcentaje de los encuestados afirma que el sistema de transporte no tiene la cobertura adecuada y presenta varias falencias.

Como lo demuestran los resultados a los cuestionamientos, el 52,96 % de los usuarios piensa que es una distancia aceptable para acceder caminando, pero la cantidad restante corresponde a usuarios que deben superar los mínimos aceptables para acceder a la estación, considerando que un poco menos de la mitad de los usuarios tienen viajes extensos de acceso a las estaciones, con recorridos superiores a un kilómetro, distancias que se pueden cubrir caminando, pero cam-

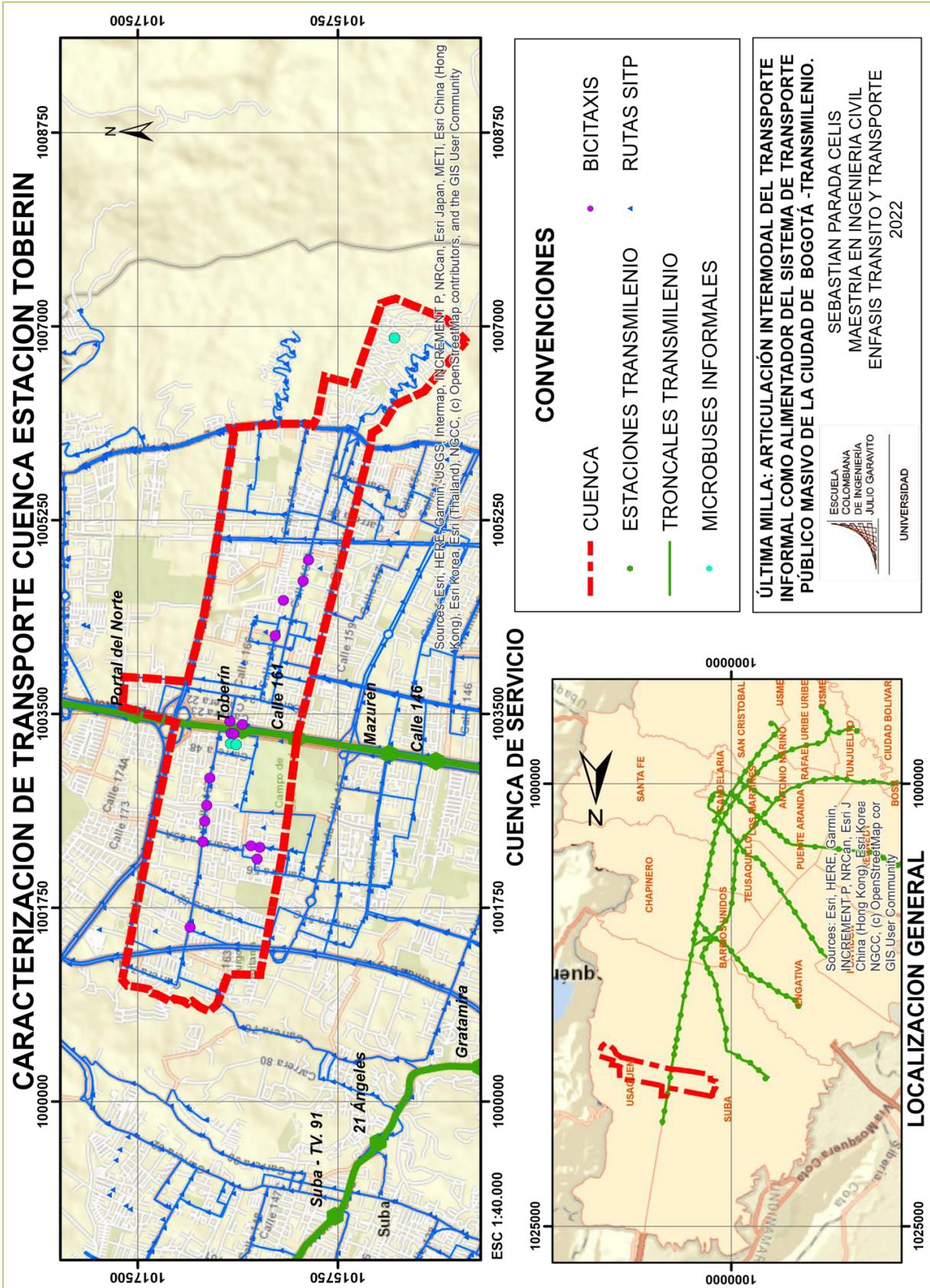


Figura 3. Plano de caracterización de transporte en la cuenca de servicio estación Toberín.
Fuente: Elaboración propia.

bien la percepción hacia el servicio prestado al público y se empieza a ver como un transporte falto de cobertura.

A las largas distancias que hay que recorrer para acceder al transporte público se suma la inseguridad de la ciudad, donde algunos usuarios afirmaron que se toman transportes informales como modos alternativos para no estar expuestos ante la delincuencia.

Otro de los indicadores de la cobertura del transporte público para las etapas de última y primera milla corresponde a los tiempos de recorrido desde o hacia las estaciones, teniendo en cuenta que los tiempos de caminata difieren entre las velocidades de caminata de cada peatón. Por ejemplo, un 38 % de los encuestados tardan más de quince minutos en acceder a una estación o paradero, es decir, recorren distancias superiores a los mil metros; si bien un porcentaje inferior a la mitad de los encuestados, es un gran número de usuarios a los que no se les facilita o no tienen el alcance a las estaciones, dando una percepción desfavorable de la cobertura del sistema de transporte público.

Así mismo, como se mencionaba anteriormente, un viaje está compuesto por diferentes etapas, entre las cuales sobresalen la última milla, la primera milla, la espera en estaciones y el viaje principal, los cuales suman un tiempo total de viaje y permiten percibir la conectividad y efectividad del transporte de la ciudad. Con las respuestas a la pregunta hecha es posible evidenciar que se tiene un estándar de tiempos promedio de recorridos complementarios al viaje de quince minutos por recorrido, lo que indica que para hacer un viaje, aparte del viaje principal, se debe contar como mínimo con media hora para los recorridos complementarios, considerando que a este se suman el tiempo de espera y el tiempo de viaje principal, generando amplios tiempos de viajes.

Los transportes informales emergentes nacen y se popularizan a partir de las necesidades de transporte de los usuarios, que si bien no compiten con los modos de transporte, sí buscan complementarlos y alimentarlos, como el caso del bicitaxi. Así lo manifiestan los usuarios, que lo utilizan ante la ausencia de transporte formal, en sus actividades de cotidianidad, e incluso para acceder al transporte formal.

La brecha entre puntos de origen y estaciones de Transmilenio hace que los tiempos de recorrido sean amplios, aumentando la percepción de insatisfacción de los usuarios ante el modo de transporte formal de la ciudad, sumado a los tiempos de espera, que en ge-

neral demuestran que las etapas complementarias no son atendidas y que el sistema general de transporte tenga una mala percepción entre los usuarios, así su viaje principal funcione.

Modos de transporte como el bicitaxi se presentan como una alternativa que tiene gran rango de aceptación entre los usuarios. Se parte de que las tendencias de uso son crecientes, dado el gran número de bicitaxis que circulan en la ciudad, además de que se puede llegar a relacionar la incidencia en las respuestas, en las que la población joven es similar al porcentaje de usuarios que consideran que el servicio es bueno o puede mejorar, teniendo en cuenta que al crecer con poblaciones jóvenes es posible que estas hagan que crezca y sea más aceptado con el tiempo.

Igualmente, se destacan su eficiencia, disponibilidad y bajo costo para ser utilizado en las actividades de cotidianidad, en recorridos internos de barrios y sobre todo en etapas de última y primera milla, en razón de que las tarifas que este ofrece se adaptan a las necesidades y son tarifas accesibles para los usuarios.

Es importante mencionar que, al ser un modo de transporte informal, presenta falencias debidas a falta de regulación, situaciones que preocupan a usuarios y que requieren atención. La percepción general de los usuarios del modo de transporte es buena, pero coinciden en que se debe regular para mejorar la calidad de la prestación del servicio.

El uso del bicitaxi, alternativa de transporte que se está presentando como un modo preferente para recorridos cortos, ha logrado establecerse formalmente en muchos países, donde los sistemas de transporte lo articulan como alimentador y modo empleado en etapas complementarias como última y primera milla, en ciudades como Ciudad de México, Londres, Nueva York y Barcelona. Estos sistemas de transporte presentan planes de control y regulación de flotas, rutas de recorridos, control técnico, mecánico y de seguridad vial, margen tarifario regulado e integración modal mediante plataformas de conexión con sistemas de metro, tren y bus (Mercado Velandia, 2012).

La articulación del bicitaxi al sistema integrado de transporte de la ciudad de Bogotá ha sido evaluada por Mellado Aranzalez & Morales Pérez (2018), quienes presentan una investigación con el fin de conocer el entorno, el usuario y el servicio prestado en un punto álgido de la movilidad de Bogotá. Ellos evalúan los

resultados para poder articularlo y presentar estrategias de mejora, pero estos arrojan grandes falencias en el funcionamiento del modo, enfocadas hacia la falta de espacios óptimos para la circulación del vehículo y para mejorar las condiciones de funcionamiento de los vehículos, destacándose la falta de cumplimiento en materia de condiciones mínimas de seguridad.

La evaluación se hace con base en la normativa de calidad NTC3661, en la que la calificación para el promedio evaluado es de 31,5 % para seguridad del vehículo y de 58,2 % para diseño de los vehículos, siendo un transporte de mala calidad, que presenta condiciones inseguras para transporte de pasajeros. A esto se suman la falta de vías en buenas condiciones y el alto flujo vehicular en la zona evaluada.

La seguridad vial del bicitaxi toma un papel muy importante en la movilidad de una ciudad como Bogotá. Silva (2015) analiza el bicitaxi y su interacción con la infraestructura vial en la que transita y fácilmente determina que no existe un espacio adecuado para el tránsito de estos, teniendo en cuenta que esto conduce a la circulación por autopistas o sobre espacios públicos, que para el caso de Bogotá apenas cumplen con los requerimientos mínimos para la circulación peatonal. Esto deja como principal conclusión la falta de espacios óptimos para circulación de este tipo de vehículos, así como también la falta de señalización y espacios para intercambio modal. Si bien es un servicio útil, la mayoría de los encuestados demostraron preocupación por las condiciones de seguridad vial, condiciones laborales y atención de usuarios, situaciones que se deben atender con urgencia.

Colmenares et al. (2018) afirman que un factor clave en la relación entre el bicitaxi y la seguridad vial corresponde a las condiciones de seguridad y salud de los operadores del servicio, quienes al tener que producir cuotas mínimas para pagarles a los propietarios de los vehículos, además de la guerra del centavo, se ven obligados a trabajar en jornadas extensas, expuestos a todo tipo de condiciones climáticas y sin tiempo disponible ni siquiera para la alimentación, lo que genera condiciones críticas para la salud de los operadores y, por ende, tiene repercusiones en la seguridad vial.

CONCLUSIONES

Se hace una evaluación integral del transporte y su incidencia en el transporte informal para la articulación

intermodal con sistemas de transporte público masivo en la última milla, donde a partir de la evaluación de los modos de transporte de la zona de estudio es posible inicialmente identificar la amplitud de la cuenca de servicio de la estación Toberín, teniendo en cuenta que el área de servicio es de 6,81 km² y hay unas distancias máximas de recorrido de hasta 6 km para acceder a la estación. Aunque se ofrecen rutas del SITP, muchos de los usuarios requieren acceder al servicio de Transmilenio, pero para lograrlo deben utilizar medios de transporte alternativo como caminata, bicicleta o servicios informales ofertados en el sector.

La alta oferta de servicios de transporte informal se justifica dada la alta demanda de usuarios que requieren movimientos en las etapas de última y primera milla, ya que según se pudo evidenciar en las encuestas de percepción de usuarios, el 70,1 % de los encuestados manifiesta que el servicio de transporte en dicha etapa de transporte es insuficiente, sumado a los amplios tiempos de espera en paraderos, que para el 66,3 % de los usuarios es superior de quince minutos, situación que hace que se deba acudir a las alternativas de transporte informal en la zona.

Queda demostrado que la cobertura en la cuenca de servicio del transporte público formal es insuficiente y que existen distancias para última o primera milla que superan lo que está dispuesto un usuario a caminar, para lo cual el bicitaxi cumple la función de suplir la falta de cobertura del transporte público.

Con la investigación se evidencia que existe una articulación entre modos de transporte, la cual nace a partir de la falta de cobertura de los modos de transporte formales, como se mencionó anteriormente. Se crea entonces un sistema en el cual los modos de transporte informal se presentan como alimentadores y recolectores de usuarios dentro de los barrios donde no hay acceso al transporte público, al tiempo que se encargan de ser el emisario final que da alcance a la totalidad de la cuenca de servicio, transportando usuarios desde la estación hacia los destinos.

Por otro lado, se observa la existencia de plataformas de articulación intermodal; aunque algunos de los modos son informales, adoptan lugares para realizar intercambio modal, además de que está normalizado por los usuarios y la ciudadanía el hecho de adoptar estos espacios para la ubicación de embarque y desembarque de usuarios del bicitaxi y microbuses, que cambian de

modos de transporte para complementar sus viajes. En estos espacios se da la disponibilidad del servicio constante para quien lo requiera, y son una ubicación estratégica al alimentar la estación de Transmilenio.

Hacer el acercamiento a los usuarios permite identificar la percepción de estos ante la cobertura del sistema de transporte público en etapas complementarias, donde, como se venía mencionando, el 70,1 % de los usuarios afirman que el servicio no les brinda cobertura, aparte de que el 64,8 % está de acuerdo con que las estaciones y paraderos son lejanos a su punto de partida; dicha percepción de los usuarios indica la falta de cobertura del sistema y la necesidad de apoyo al transporte público en la primera y última milla.

Conocer los modos de transporte informales a partir de acercamiento y utilización de los modos como usuario permitió identificar la existencia de organizaciones y gremios internos que, de algún modo, mantienen regulado el sistema y buscan la manera de prestar un servicio óptimo; además, hay que reconocer su intención de organizarse, aumentar la tecnología y regirse por parámetros de funcionamiento, debido a que se presentan oportunidades de dar una reglamentación y un acercamiento al Estado, ya que son conscientes de la situación, de las falencias y de la contribución que realizan al transporte público.

Adicionalmente, el acercamiento permitió evaluar los modos de transporte informal en el área de influencia de la estación caso de estudio, mediante matrices DOFA, con el fin de valorar su importancia. La principal conclusión es que modos de transporte como el bicitaxi son eficaces, pero urge reglamentarlos. Las matrices de evaluación de los vehículos permiten evidenciar el potencial del modo de transporte, pero deben entrar a evaluarse aspectos técnicos, de seguridad vial, mecánicos, ambientales, laborales y de seguridad y salud, entre otros, para que sea un servicio eficiente y que brinde buenas condiciones. La evaluación de estos aspectos es clave para ofrecer un servicio de calidad, que cumpla con los estándares requeridos para el transporte de pasajeros.

Hacia la aceptación del sistema, se pudo evidenciar que es un sistema eficiente pero con muchas necesidades de regulación y organización, si bien se presenta cierta preocupación por los modos de transporte encaminados hacia la seguridad vial y las condiciones de los vehículos. Se utiliza por la necesidad no satisfecha por los modos de transporte, teniendo en cuenta que una de

las ocasiones de mayor uso del sistema es para realizar las actividades cotidianas, como dirigirse a tomar el transporte público e ir a trabajar o estudiar, resaltando que, de los encuestados, solamente el 11,4 % afirma no haber empleado el modo, siendo este un modo de transporte de uso ascendente, dadas las edades de las personas que acceden a él. En las encuestas se ilustra su aceptación por la población joven, que crece haciendo uso del modo y normaliza su utilización.

En conclusión, existe una articulación intermodal entre modos de transporte formales e informales en la cuenca de servicio, teniendo en cuenta que esta es dada por la falta de cobertura de los sistemas de transporte público. Los sistemas informales cumplen la tarea de atender las necesidades de las etapas complementarias, que si bien cumplen la labor de generar conectividad, a la fecha requieren mucha atención y regulación por parte de las entidades estatales, para que se haga seguimiento a las condiciones de los modos de transporte, tales como condiciones técnicas, laborales, ambientales y administración de los gremios, teniendo en cuenta que presentan muchas falencias para prestarles un servicio eficiente a los usuarios.

Los modos de transporte emergentes se presentan como una alternativa sostenible de transporte, ya que, si bien nacen en respuesta a las necesidades de una comunidad, son además una fuente de trabajo amigable con el medioambiente, puesto que parte de la flota de vehículos son eléctricos.

La idea de implementar el bicitaxi en el tránsito como alimentador y sistema preferente para última milla es acertada, pero para esto tendría que hacerse una evaluación integral de otros aspectos que implican ramas del conocimiento como mecánica, planeación del transporte, seguridad vial, seguridad y salud en el trabajo, que manejados integralmente podrían generar un muy buen complemento al sistema de transporte de la ciudad de Bogotá, evitando de este modo aumento de la flota de buses y las rutas circulantes entre barrios; además, es un sistema que ofrece mayor cobertura en todos los puntos de la ciudad.

La existencia y éxito de modos de transporte que se mueven en la informalidad se deben a la necesidad del transporte y la inconformidad con las condiciones de transporte público formal existente, teniendo en cuenta que los informales han complementado el SITP y el sistema Transmilenio. Es un modo de transporte

alternativo que complementa muy bien el sistema de transporte, como lo demostraron las encuestas de preferencias, en las que los usuarios destacan en modos de transporte como el bicitaxi la disponibilidad, rapidez en trayectos, bajo costo y la facilidad de movilización dentro de un sector.

Así mismo, lo han evidenciado proyectos de ley lanzados como el proyecto de la concejala Ana Teresa Beltrán mencionado anteriormente, en el que se encamina la reglamentación hacia la prestación de un servicio óptimo y como una oportunidad para la ciudad de generar crecimiento, organización y solución ante problemas ambientales, de movilidad y de economía.

Aun después de los planteamientos aquí presentes, se propone la realización y reproducción de estudios en diferentes zonas de la ciudad que ratifiquen la articulación modal entre transportes formales e informales, teniendo en cuenta que a estos estudios se les debe dar un alcance multidisciplinar en el que se traten aspectos como la seguridad vial, condiciones técnicas, mecánicas, operacionales, socioeconómicas y ambientales, que entre otros aspectos permitan dar un panorama de la importancia del uso del bicitaxi y de los transportes informales ofertados a la ciudadanía.

REFERENCIAS

- Alcaldía de Bogotá (2022). Documentos para transporte público terrestre mixto: reglamentación. Recuperado de <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/listados/tematica2.jsp?subtema=28425>.
- Alonso Ramos, A., Monzón de Cáceres, A., & López-lambas, M. (2015). *A vueltas con la última milla*.
- BBC Mundo (2017, February 10). *¿Cuáles son las ciudades con mejor y peor transporte público en América Latina?* Recuperado de <https://www.bbc.com/mundo/noticias-america-latina-38927134>.
- Carmona Rojas, M. Y. (2020). Problemas y enfoques de la investigación sobre el transporte informal en América Latina. *Transporte y Territorio*, 23, 159–181. <https://doi.org/10.34096/rtt.i23.9661>.
- Carvalho, D. (2020). *El camino de Medellín hacia un transporte público intermodal*. Recuperado de <https://www.carvalho.com.co/post/el-camino-de-medellin-hacia-un-transporte-publico-intermodal>.
- Castillo, C. V. (2022, mayo). *Bogota.gob*. Obtenido de <https://bogota.gov.co/mi-ciudad/movilidad/bogota-tendra-su-sistema-de-bicis-publicas-compartidas-300-estaciones>.
- Colmenares, S. L. C., Flechas, H. F. A. & Osorio, S. J. A. (2018). *Propuesta de intervención de la accidentalidad en bicitaxistas en los sectores de El Prado y Toberín* (Corporación Universitaria Minuto de Dios). Recuperado de [http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-420070-8.00002-7%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.ab.2015.03.024%0Ahttps://doi.org/10.1080/07352689.2018.1441103%0Ahttp://www.chile.bmw-motorrad.cl/sync/showroom/lam/es/](http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-59379-1%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-420070-8.00002-7%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.ab.2015.03.024%0Ahttps://doi.org/10.1080/07352689.2018.1441103%0Ahttp://www.chile.bmw-motorrad.cl/sync/showroom/lam/es/).
- Concejo de Bogotá (2019, enero). *Reglamentación del bicitaxismo en Bogotá, D.C.: retos y oportunidades*. Recuperado de <https://concejodebogota.gov.co/reglamentacion-del-bicitaxismo-en-bogota-d-c-retos-y-oportunidades/cbogota/2019-01-24/123110.php>.
- Contrial (2016, marzo). *Contrial*. Obtenido de <https://contrial.co/mapa-de-upzs-de-bogota-y-listado-de-barrios-para-consulta-en-foros-control-social-encuentre-a-surepresentante/>.
- Cortés Salinas, A., & Figueroa Martínez, C. (2013). Actividades en el espacio-tiempo del intercambio modal: oportunidades para el usuario en un sistema de transporte público inconcluso. *Cuaderno Urbano*, 15(Espacio, Cultura, Sociedad), 27-48.
- De la Peña, B., & Albright, R. (2013). *Catalyzing the New Mobility in Cities*. Rockefeller Foundation, 20.
- El Tiempo* (2020, enero). *Desde este sábado, camperos de ladera se integrarán al MIO*. Recuperado de <https://www.eltiempo.com/columbia/cali/las-gualas-se-integraran-al-sistema-de-transporte-masivo-en-cali-450562>.
- Fondo de Prevención Vial (2013). *Caracterización de la prestación del servicio de transporte en motocicleta (mototaxismo) en Colombia*.
- García-Schilardi, M. E. (2014). Transporte público colectivo: su rol en los procesos de inclusión social. *Bitácora*, 24(1), 35-42.
- Garnica Quiroga, V. (2020). El impacto y la percepción de los usuarios acerca del servicio del TransMicable en Bogotá, D.C., como modo de última y primera milla. *Territorios* (44), 1–14. <https://doi.org/10.12804/revistas.urosario.edu.co/territorios/a.8456>.
- Guerrero, J. F. (2012). *Beneficios socioeconómicos y ambientales de la operatividad de los bicitaxis en la movilidad sostenible de Bogotá*. Universidad Piloto de Colombia.
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (2019, agosto). *Gobierno de México*. Obtenido de <https://www.gob.mx/imta/articulos/que-es-una-cuenca-211369#:~:text=Una%20cuenca%20hidrogr%C3%A1fica%20es%20una,un%20mismo%20punto%20de%20salida>.
- Lagos, M. (2019). *Trabajadores para ejercer el oficio y las*. Universidad Externado de Colombia.
- Martínez Aguas, J. C., & Rodríguez Delgado, W. G. (n.d.). *Estudio y análisis del transporte informal en la ciudad de Bucaramanga*. Universidad Industrial de Santander.
- Mellado Aranzalez, Wi. G., & Morales Pérez, R. W. (2018). Bicitaxismo: transporte alternativo como propuesta para su articulación al sistema de transporte público de Bogotá. *Ingenio Magno*, 9, 110–122.
- Mercado Velandia, C. J. (2012). *Viabilidad técnica y financiera de la utilización del bicitaxi como medio de transporte público en el marco del Sistema Integrado de Transporte Público en Bogotá D.C*. Universidad Nacional de Colombia.
- Molina Cifuentes, M. T. (2012). *Análisis de ciclorrutas*.
- Namara, A. de J. (2020). Importancia de transporte público de última milla amigable con el medioambiente. Caso: Zumpango, estado de México. *Open Journal System*, 009, 2–9. Recuperado de <https://www.meioambientebrasil.com.br/index.php/MABRA/article/view/86>.
- Ochica Chaparro, J. M., & Saavedra Herrera, D. S. (2019). *Análisis del comportamiento y heterogeneidad en las elecciones de los usuarios de bicitaxi en Bogotá*. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
- Olarte Jiménez, T. F., Carvajal García, A. M., & Villamizar Silva, O. C. (2015). Estudio del comportamiento de los usuarios de

- medios de transporte informales en la ciudad de Bucaramanga. *Revista Ensayos*, 8, 86–100.
- Portafolio (2022, julio). Esta es la posición de Claudia López sobre los bicitaxis.
- Peña Rodríguez, J. A. (2020). *Análisis de las repercusiones del transporte informal en el sistema de transporte público de la localidad de Suba*. Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (2015). *Objetivos de desarrollo sostenible*. PNUD.
- Robles Cruz, C. V. (2020). *¿Desarrollo orientado al transporte? Medición de la calidad física del espacio público en Suba y la relación de los desarrollos recientes con el portal de Transmilenio*. Pontificia Universidad Javeriana.
- Romero-Torres, J. (2018). *El transporte público de pasajeros de autobuses, un acercamiento desde la política pública*, 57-72.
- Secretaría Distrital de Movilidad (2019). *Encuesta de Movilidad 2019*. Secretaría Distrital de Movilidad (2019a). *Secretaría Distrital de Movilidad entrega resultados de la primera caracterización del bicitaxismo en Bogotá*. Recuperado de https://www.movilidadbogota.gov.co/web/Noticia/secretaria_distrital_de_movilidad_entrega_resultados_de_la_primera_caracterizacion_del_bicitaxismo_en_bogota.
- Secretaría Distrital de Movilidad @SectorMovilidad. (2019b). NUEVO POT. Retrieved from <https://twitter.com/sectormovilidad/status/1176879435703865344?lang=it>.
- Secretaría Distrital de Planeación (2019). *Estratificación socioeconómica de la localidad 11, Suba*. Pub. L. No. Decreto 551 del 12 de septiembre de 2019.
- Secretaría Distrital de Planeación (2019). *Estratificación socioeconómica urbana, localidad 1, Usaquén*. Pub. L. No. Decreto 551 del 12 de septiembre de 2019.
- Silva, A. (2015). *Análisis de seguridad de la infraestructura vial de los bicitaxis en los barrios de la Alquería, Venecia y Guaca* (Universidad Santo Tomás). Recuperado de http://porticus.usantotomas.edu.co/bitstream/11634/394/1/analisis_de_seguridad_en_la_infraestructura_vial_de_los_bicitaxis_en_los_barrios_de_la_alqueria_venecia_y_guaca.pdf.
- Spooner, D. (2019). *Bus de tránsito rápido (BRT) y la formalización del transporte público informal*. Recuperado de <https://www.itfglobal.org/es/sector/urban-transport/sistema-de-bus-de-transito-rapido-brt>.
- Torrijos Zuluaga, G., & Londoño, J. (2022, agosto). Pedalean por los bicitaxistas de Bogotá y radican proyecto para su reglamentación. *El Espectador*.
- Transmilenio (2022). Mapa interactivo de Transmilenio. Recuperado de <https://www.transmilenio.gov.co/publicaciones/150402/publicacionesmapa-interactivo-de-transmilenio/>.

Análisis y diseño comparativo de losas nervadas para edificaciones de distintos niveles en la ciudad de Bogotá, empleando dos tipos de sistema de reforzamiento: reforzamiento convencional longitudinal y reforzamiento a base de elementos postensados

Comparative design and analysis of ribbed slabs for edifications of different levels in Bogotá, using two types of reinforcement system: conventional longitudinal and post-tensioned-elements-based reinforcement

ÓSCAR JULIÁN RAMÍREZ ARIAS¹ - JAIME ERASMO GARZÓN MORENO²

1. Magíster en Ingeniería civil de la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería.

2. Profesor titular de la maestría en Ingeniería Civil con énfasis en Ingeniería Estructural de la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Bogotá, D.C., Colombia..

oscar.ramirez-a@mail.escuelaing.edu.co - jaime.garzon@escuelaing.edu.co

Recibido: 02/01/2022 Aceptado: 02/02/2022

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

Resumen

Históricamente, el material predilecto por excelencia para la construcción de edificaciones en la ciudad de Bogotá y en el país ha sido el concreto estructural reforzado con elementos longitudinales de acero, bien sea losas macizas, losas nervadas, losas aligeradas o las conocidas metaldeck. Dicha predilección se debe a su facilidad de manejo en obra, la ductilidad que aporta el acero y la alta resistencia de los materiales. Pero dichos métodos limitan mucho las luces libres que se puedan considerar entre ejes de columnas, y resultan problemáticos a la hora de construir edificios que requieran áreas abiertas en sus plantas.

En naciones altamente desarrolladas, como Estados Unidos y Alemania, el uso de losas presforzadas es mucho más aplicado de lo que se puede llegar a creer para la construcción de losas en edificaciones, y permite hacer construcciones más eficientes.

En Colombia, su uso es limitado casi de una manera exclusiva para la construcción de puentes, desaprovechándose así las grandes bondades de esta alternativa al momento de construir obras verticales. Esta técnica aporta grandes beneficios a la hora de la construcción de losas en edificios con luces importantes, ya que ayuda a reducir el volumen de concreto necesario y las cuantías de acero empleadas son menores, al ser más delgadas las secciones; esto permite una disminución en el

peso y altura total de la edificación mejorando su desempeño sísmico, que es directamente proporcional a la reducción de los tiempos de ejecución, todo con respecto a los métodos convencionales de construcción de losas en el país. “Aunque en Colombia hay una tendencia creciente a usar sistemas postensados en puentes, por alguna razón en edificaciones es poco usado” (Otero, 2009). El problema radica en que por la falta de conocimiento y experiencia local en la aplicabilidad de los presforzados para losas de edificaciones no se utiliza con frecuencia esta técnica. Otra razón puede ser la latente creencia de que debido a que se requieren elementos de construcción especializados, esto dispararía los costos de construcción.

“Existen causas que han disminuido el uso de losas postensadas de forma masiva, porque sus principales beneficios no son bien aprovechados” (Varga, 2013). Para comparar de una manera gráfica las bondades que ofrece el postensado en losas de edificaciones, se decidió realizar el diseño de una edificación de uso residencial, de grandes luces, reproduciendo la misma edificación en varias ocasiones haciendo variación en su altura, para analizar así el comportamiento estructural en cada uno de los casos. De este modo se puede entender mucho mejor que se trata de demostrar, clarificar y cualificar las grandes virtudes que se están desaprovechando de los elementos postensados

a la hora de la construcción de edificaciones tanto en la disminución en el uso de materiales como el ahorro en tiempo. Todo se realizará para fomentar en el país el uso del concreto postensado a la hora de construir edificaciones mucho más esbeltas, dado que la flexibilidad del sistema ofrece mejores posibilidades creativas arquitectónicas para el diseño, permite mayores luces, plantas libres de obstrucciones visuales y hace que en el mercado de la construcción sea mucho más atractivo y beneficioso para el cliente.

Palabras claves: concreto presforzado, losas nervadas en una dirección, torón, balanceo de cargas gravitacionales y diseño de entresijos.

Abstract

Historically, reinforced structural concrete with longitudinal steel elements, whether it is solid slabs, ribbed slabs, lightweight slabs, or the well-known metal decks have been the preferred material par excellence for the construction of buildings in the city of Bogota and in the country. This preference is due to its ease of handling on-site, the ductility provided by steel, and the high strength of the materials. However, these methods greatly limit the clear spans that can be considered between column axes, which becomes problematic when constructing buildings that require open areas on their floors.

In highly developed nations such as the United States, Germany, and Panama, the use of prestressed slabs is much more prevalent than presumed for the construction of slabs in buildings, allowing for more efficient constructions. In Colombia, their use is limited almost exclusively to the construction of bridges, neglecting the great advantages of this alternative for vertical structures. This technique offers significant benefits when constructing slabs in buildings with large spans since it allows for a decrease in the volume of necessary concrete and reduces the amount of steel used. Thinner sections result in a decrease in weight and overall height of the building, improving its seismic performance. Additionally, faster and earlier formwork removal is directly proportional to the reduction in construction time, compared to conventional slab construction methods in the country. "Although there is a growing trend in Colombia to use post-tensioned systems in bridges, for some reason, it is rarely used in buildings" (Otero, p, 2009). The problem lies in the lack of local knowledge and experience in the applicability of prestressed elements for building slabs, which hinders the frequent use of this technique. Another reason could be the prevalent belief that specialized construction elements would drive up construction costs.

"There are causes that have decreased the use of post-tensioned slabs massively because their main benefits are not being properly utilized" (Varga, 2013). To graphically compare the advantages offered by post-tensioning in building slabs, it has been decided to design a residential building with large spans, replicating the same building multiple times with variations in height. This approach aims to analyze the structural behavior in each case, better understanding what is being demonstrated, clarified, and qualified in terms of the significant virtues being underutilized in post-tensioned elements when constructing buildings, including the reduction in material usage and time savings. The purpose is to promote the use of prestressed concrete in the country when constructing much slenderer buildings, as the flexibility of the system offers better architectural creative possibilities for design, allows for larger spans, unobstructed floor plans, and thus makes the construction market much more attractive and beneficial for clients.

Keywords: prestressed concrete, one-way ribbed slabs, toron, gravitational loads balancing, mezzanines.

INTRODUCCIÓN

Durante el trabajo de investigación, se hicieron y analizaron seis modelos independientes de una estructura habitacional en la ciudad de Bogotá, con alturas variables de entre 4, 7 y 12 niveles. Cada par de modelos tendrán el mismo número de niveles, pero con una variación entre una losa nervada armada en una dirección y una losa postensada en otra dirección. El objetivo principal era comparar y analizar el comportamiento estructural de los edificios bajo efectos sísmicos cuando se hace utilizan distintas alternativas de reforzamiento en sus losas, comparando las técnicas tradicionales de reforzamiento respecto al uso de técnicas de elementos postensados.

Con la investigación se buscó establecer e identificar los beneficios que ofrece una alternativa de reforzamiento versus le otra en el caso de las losas nervadas armadas en una dirección, teniendo como parámetros que entraron a comparación el comportamiento bajo los efectos sísmicos, el peso total de las losas que afectan directamente el diseño de fundaciones, la vulnerabilidad sísmica y las cuantías de diseño, con el propósito de fomentar en la ciudad y en el país inclusión de los postensados en los edificios.

Al tratarse de una metodología de reforzamiento que difiere de la aplicada al reforzamiento por medio de barras de acero corrugado, fue importante establecer las características físicas y de comportamiento mecánico de los elementos que intervienen en el presforzado de concretos. El concreto u hormigón es un material muy presente en la construcción de viviendas y edificaciones, el cual se elabora a partir de la mezcla de un aglomerante; se emplean principalmente cemento, áridos gruesos y finos, agua, y en ocasiones se le suele agregar un aditivo que mejora sus propiedades. Este material se puede utilizar para la fabricación de distintos elementos constructivos, ya sea vigas, columnas o losas, pero las losas son el elemento constructivo que interesa en este proyecto. Tanto en la elaboración de losas como en el resto de los elementos, el hormigón se puede presentar de distintas formas: hormigón simple, hormigón armado y hormigón presforzado.

Este último puede clasificarse en dos métodos: el pretensado y el postensado. Cuando hablamos de concreto pretensado se puede definir como un sistema estructural en el cual se introducen esfuerzos internos previos con una magnitud y sentido, tal que equilibran los esfuerzos resultantes de las cargas externas. El proce-

dimiento de pretensado consiste en tensar previamente las armaduras de acero antes de realizar el colado del hormigón. La tensión aplicada debe estar dentro del campo elástico, para que luego de producirse el endurecimiento del hormigón y se liberen las armaduras traccionadas, estas transmitan esfuerzos de compresión a la pieza de hormigón.

Por su parte, el hormigón postensado difiere del pretensado en el sentido de que la armadura de acero se tensa después del fraguado y endurecimiento del hormigón. Las losas de hormigón postensado son un sistema estructural relativamente moderno, que empezaron a emplear arquitectos e ingenieros de todo el mundo a partir del año 1966 (González Fernández & Herbozo Girón, 2019). Consisten en losas sólidas, como las tradicionales, pero con la utilización de cables postensados de alta resistencia.

Estudios realizados en Estados Unidos, más precisamente por el Instituto Americano del Concreto (ACI), determinaron que las losas postensadas pueden trabajar en conjunto con los elementos estructurales verticales para resistir las cargas laterales causadas por los sismos, con el fin de obtener edificios y estructuras sismorresistentes. La fabricación de esta clase de losas comienza con la instalación del encofrado y posteriormente se ponen en simultáneo la armadura tradicional y los cables de postensado. Luego se procede a verter el hormigón en el encofrado, y una vez que este haya alcanzado la resistencia necesaria, a partir del tercer día comienzan a tensar los cables de acero. Después que la losa esté tensada se retira el encofrado, se cortan los cables y se llena la cavidad con mortero. Para el armado de las losas, los cables se pueden distribuir de distintas maneras, por ejemplo en dos direcciones. Aquí, los tendones o torones de acero se distribuyen equitativamente en ambas direcciones, logrando reducir las deformaciones producidas por las cargas aplicadas a la losa. Tiene la desventaja de requerir el uso de una canasta formada por los torones para evitar la superposición de estos en un mismo punto.

Para realizar y poner a prueba la hipótesis, se concluyó que la mejor forma era mediante un ejemplo práctico que pusiera a prueba cada uno de los aspectos que entraban en juego, como los pesos totales, esbeltez de los elementos, cuantías de refuerzo, comportamiento, estabilidad y respuesta a fuerzas sísmicas. Dicho esto, se presentan las características del modelo que se tomó en

consideración, aplicando intencionalmente problemas de torsión en planta y luces considerables.

En el proyecto se analizó y diseñó un edificio habitacional con una altura variable, con el propósito de cumplir con el alcance del estudio, que consiste en analizar el comportamiento sísmico de la estructura a distintos niveles. Las dimensiones de la edificación serán de 25 m de ancho y 25,70 m de profundidad, con una vista en planta de forma irregular. La estructura de la edificación se resolverá mediante pórticos de concreto, con entrepisos que consisten en losas postensadas aligeradas, con casetones que tienen una dimensión de 100 x 300 cm, una capa de concreto de 5 cm de espesor y nervaduras postensadas en un solo sentido con dimensiones de 20 x 21 cm, las cuales se encontrarán apoyadas sobre vigas de carga. El acero de refuerzo usado por medio de cables, fue de $F_{sr} = 19\ 000\ \text{kg/cm}^2$.

Con el fin de hacer un adecuado análisis del proyecto fue necesario describir los tipos de materiales principales considerados para la construcción estructural del conjunto habitacional. Primero tenemos a el concreto u hormigón utilizado para la elaboración de los elementos estructurales, como vigas, columnas y losas, con una resistencia a la compresión de 4000 MPa. Luego está el acero de refuerzo pasivo, que cuenta con tensiones de $2530\ \text{kg/cm}^2$ para barras de acero N.º 2, y aceros de $4200\ \text{kg/cm}^2$ para barras del N.º 3 en adelante. Y, por último, pero más relevante, el acero de presforzado, compuesto de los cables de acero que se usaron en el análisis y diseño, los cuales son de baja relajación y tienen un diámetro de 0,5 pulgadas, con un f_{sr} igual a $19000\ \text{kg/cm}^2$. Para el postensado se utilizaron nervaduras tensadas, con un diámetro y fuerzas de tensión que se determinarán durante el proceso de diseño de las losas postensadas.

Las cargas más importantes que se tomaron en cuenta a la hora de diseñar la estructura son las siguientes: cargas muertas (D), que son aquellas cargas relacionadas con el peso propio de cada uno de los elementos componentes de la estructura; cargas vivas (L), que son aquellas que se producen debido al uso y ocupación de la edificación futura, y conocidas también como sobrecargas, empujes de tierra y presión hidrostática; las cargas producidas por las fuerzas del viento, y las cargas laterales producidas por efectos sísmicos.

La fuerza sísmica que se usó en los análisis para la obtención de las combinaciones de carga del proyecto es el efecto de los movimientos sísmicos de diseño (F_s) que se encuentra descrito en el título A del reglamento, dividido por el coeficiente de capacidad de energía (R). De esta manera: $E = F_s/R$. Para poder determinar el valor de carga sísmica E , primero se debe establecer la zona de amenaza sísmica para la región o ciudad donde se encuentra ubicada la futura edificación, y de este modo determinar los coeficientes A_a y A_v , que representan la aceleración y la velocidad pico efectiva para diseño, respectivamente. Esto se puede establecer mediante la tabla A.2.3-2 del reglamento, y con un análisis elástico dinámico, determinar las fuerzas actuantes en cada uno de los elementos que componen el sistema de resistencia sísmica.

Con los valores obtenidos a través de ese análisis dinámico para cada uno de los seis modelos independientes, se pudieron verificar los predimensionamientos previos de los elementos estructurales, y proseguir al análisis de cargas de cada uno de los tipos de losa, de acuerdo con su tipología de reforzamiento.

Para realizar el modelo estructural de cada uno de los tipos de losa, primero se ingresaron todos los datos en el programa de análisis, que corresponden a las secciones de cada material utilizado y los valores de carga correspondientes. Posteriormente se plasmó la estructura del edificio en el *software*, verificando que el procedimiento sea el adecuado, de manera tal que los resultados obtenidos sean correctos y representativos del proyecto. Ya con el modelo en el programa, se cargaron todas las secciones correspondientes, teniendo definidos con anterioridad los valores y las combinaciones de carga respectivos. Para poder realizar la comparativa es idóneo hacer la cuantificación de cargas que aporta el sistema de placa con respecto al peso propio; para cada uno de los casos se presenta el análisis de carga respectivo: para el caso de las losas con reforzamiento convencional se consideraron las nervaduras elementos monolíticos, elementos que no aportan a la rigidez lateral general de la estructura y su función es la transición de cargas. Bajo esta premisa, se consideran elementos simplemente apoyados según la tabla C.9.5 de la NSR-10; por otro lado, en las losas con reforzamiento postensado se consideró la misma premisa de su NO aportación de rigidez lateral, pero su predimensionamiento se guió conforme a los pa-

rámetros establecidos por el Instituto del Postensado y del ACI 318.

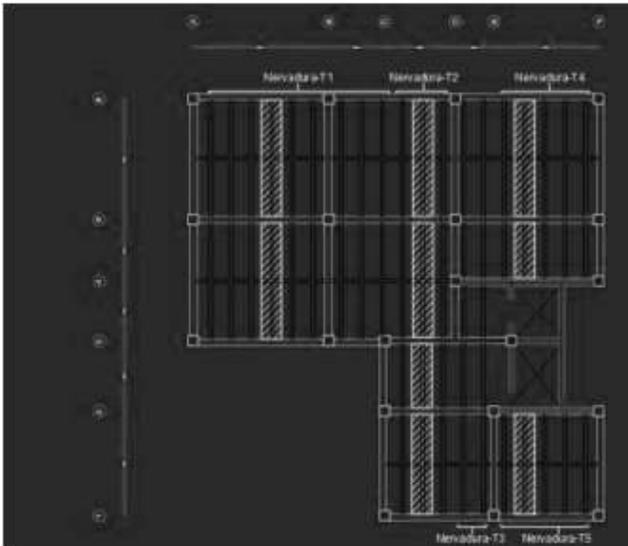
Se ejecutó una comprobación para cada uno de los elementos estructurales de ambos modelos, se verificó la revisión de secciones en lo que se refiere a la solicitación de esfuerzos axiales, de corte, de flexión y momentos flectores en vigas y columnas. Para cada uno de los modelos se hicieron las comprobaciones de límites de esfuerzos y control de deflexiones para revisión, con miras a poder establecer las secciones finales que compondrían cada uno de los casos.

Cabe destacar que no se dio alcance a la revisión estructural de los muros de corte, debido a que en primer lugar no está contemplado dentro del propósito central de la tesis, y en segundo lugar, para cada uno de los modelos se conservó la misma sección transversal de muros, con el afán de mantener un criterio de comparación y centrar toda la atención en la revisión sísmica de los elementos que componen el pórtico especial.



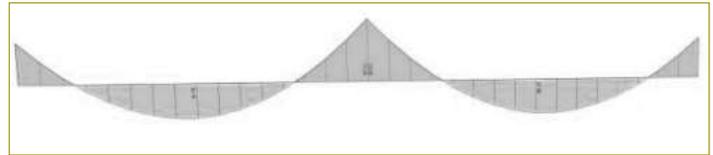
Una vez que se analizaron los modelos propuestos bajo las cargas tomadas en consideración, dependiendo del sistema de losa que se estudie, es propio hacer una comparación en el diseño de los elementos con los esfuerzos internos que presenten. En primer lugar, están las condiciones de losa reforzada convencionalmente, y

como elemento comparativo se tiene la misma configuración en planta de la losa, haciendo las modificaciones de los nervios por elementos postensados. En estos elementos existen fuerzas internas remanentes o pasivas que se deben compensar con la inclusión de elementos de refuerzo convencional, además de los cables de acero. Para realizar el análisis de la losa independiente al tipo de reforzamiento utilizado, se hace la asignación sobre luces y la longitud de estas.



Para el caso de las losas convencionalmente reforzadas se usó el *software* Etabs, versión 19. Se realizó el modelo de la losa tipo. Cabe destacar que, debido a las variaciones de cargas, se hizo un modelo independiente para la losa tipo de entrepiso y la losa de cubierta social. Para el caso de la losa de entrepiso, se modeló el grupo de columnas de los pisos inmediatamente inferior y superior, con el propósito de generar las condiciones aproximadas reales de esfuerzos,

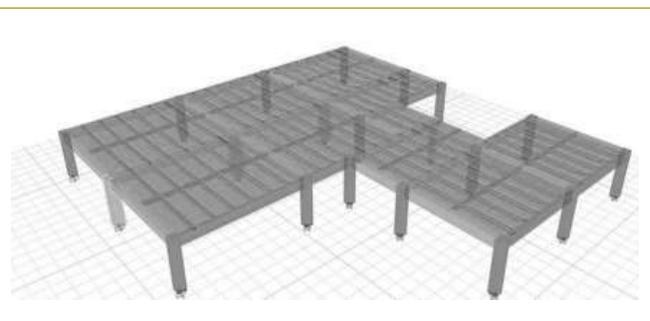
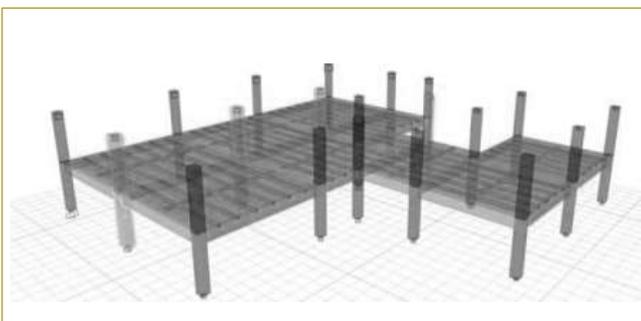
Con el análisis de cargas realizado, haciendo la discriminación del tipo de losa, según sea de entrepiso o de cubierta, con la ayuda del *software* se obtuvieron los momentos internos de diseño de las nervaduras, de acuerdo con los cuatro tipos que se establecieron, obteniendo momentos internos por este estilo:



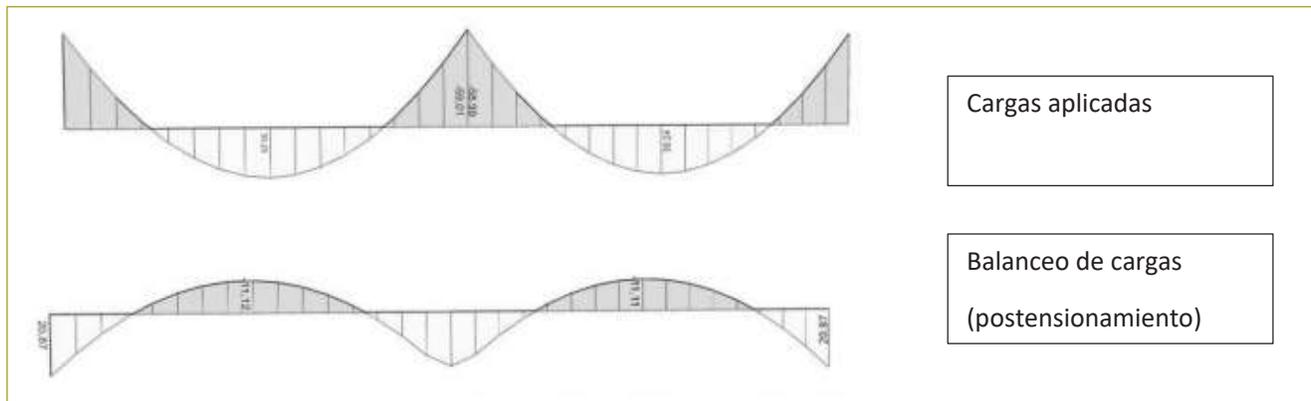
Una vez obtenidos los momentos últimos de diseño para la nervadura, se procedió al diseño del reforzamiento necesario, según los lineamientos del capítulo C.21 de la norma sismorresistente colombiana (NSR-10, 2010).

Para el caso del análisis de las losas reforzadas mediante uso de cables postensados, se tuvieron como punto de partida los modelos generados para los casos de losa convencional, se realizó un cambio en las dimensiones de los nervios y mediante un análisis de balanceo de cargas, se agregaron al modelo las cargas resultantes del postensionamiento. Después del análisis y balanceo de cargas de cada uno de los tipos de nervaduras, se logró obtener la carga necesaria que se debe aplicar, así como las excentricidades en cada uno de los casos.

NERVADURA TIPO	LUZ	Momento psfzo (KN*m)	Carga de presfuerzo (KN)	Excentricidad (cm)
NE-01	6 A 5	33	230	14,3
	5 A 3	33	230	14,3
NE-02	6 A 5	33	230	14,3
	5 A 3	33	230	14,3
	3 A 2	10,5	230	4,6
NE-03	2 A 1	24,7	230	11
	6 A 5	33	230	14,3
NE-04	5 A 4	8,2	230	3,6
	2 A 1	24,78	230	11



Así, se obtienen estados de esfuerzos internos a flexión por este estilo:



RESULTADOS

Una vez hecho todo lo que estaba contemplado inicialmente para entrar en la actividad de comparación de metodologías de reforzamiento de losas nervadas armadas en una dirección, tomando también como variables la altura de la edificación, puede evidenciarse de manera cuantitativa la hipótesis inicial de las ven-

tajas del uso de elementos postensados en el diseño y construcción de losas nervadas para edificaciones. Se presentan a continuación los resultados de desempeño sísmico, peso de la edificación, dimensiones de los elementos estructurales y cantidad de reforzamiento convencional.

MODELO A (4 niveles)	Peso (KN)	Maxima deriva en x %	Maxima deriva en y %	Cortante Basal KN
losa convencional	17916,73	0,32	0,96	12698
losa postensada	16322,47	0,3	0,92	11569
diferencia porcentual	8,90	6,25	4,17	8,89
MODELO B (7 niveles)	Peso (KN)	Maxima deriva en x %	Maxima deriva en y %	Cortante Basal KN
losa convencional	35092,98	0,362	0,34	27635
losa postensada	32023	0,38	0,361	25218
diferencia porcentual	8,75	-4,97	-6,18	8,75
MODELO C (12 niveles)	Peso (KN)	Maxima deriva en x %	Maxima deriva en y %	Cortante Basal KN
losa convencional	65267,85	0,9826	0,5281	46258
losa postensada	60618,95	0,94	0,4849	42963
diferencia porcentual	7,12	4,34	8,18	7,12

En la anterior tabla resumen se pueden ver el peso de la edificación con respecto al tipo de reforzamiento de losa y la altura de la estructura. Adicionalmente, se incluyen las derivas porcentuales máximas. Visto lo anterior, es posible evidenciar la reducción considerable en cuanto al peso total, en una magnitud de 7 a 10 % entre los modelos tipo A y modelos tipo B; dicha reducción tiene una gran incidencia en el diseño de cimentaciones, pues al disminuir las cargas de servicios, habrá una reducción en costos de diseño y construcción de estas.

A lo largo de la investigación se hizo el análisis discriminado de cada una de las losas correspondientes al modelo A y al modelo B, y se pudo establecer el reforzamiento necesario para cada tipo de nervadura. En el caso de las losas convencionalmente reforzadas se estableció el acero principal que soportaba los esfuerzos de flexión, mientras que para las losas postensadas se estableció el acero, que era el resultado de los esfuerzos de momentos flectores secundarios que resultaron después del tensionamiento de los elementos.

NERVADURA TIPO 1 ENTREPISO						
		6(apoyo)	luz 6-5	5(apoyo)	luz 5-3	3(apoyo)
Postensado	As necesario (mm2)	207,39	75,13	249,00	75,13	207,23
Convencional	As necesario (mm2)	201,37	174,02	310,42	173,88	198,99
NERVADURA TIPO 1 CUBIERTA						
Postensado	As necesario (mm2)	495,577644	211,236269	584,77412	211,236269	495,00993
Convencional	As necesario (mm2)	313,053607	259,184273	492,107843	258,975105	310,915236

A pesar de que los elementos tipo nervadura en las losas postensadas tienen menos robustez, se evidenció para los momentos positivos una disminución en la cuantía necesaria para controlar los esfuerzos flectores, diferencias que oscilaban en el orden del 20 %, y al considerar la carga de costos que tiene el acero de refuerzo, es una gran reducción en los costos de construcción.

Debido a los puntos de inflexión en los apoyos por parte de los cables, se pudo notar un incremento en cuanto al acero de refuerzo para momentos negativos en los apoyos, y cuanto más grande fuera el claro conti-

guo al apoyo, más era el incremento. Este fenómeno se evidenció solo para las nervaduras de la losa de cubierta. Por otro lado, este reforzamiento solo es necesario en dichos puntos y no afecta a la cuantía en el resto de la nervadura, y como se mencionó anteriormente, se logró una disminución en la cuantía de momentos negativos al balancear estas diferencias.

Se hizo un análisis de cantidades de concreto muy superficial para cada uno de los modelos y tipos de losas, para poder tener en consideración este rubro en la elección entre uno y otro sistema de losa.

Modelo de doce niveles con losa convencional

Concreto						
Elemento	Sección	Área (m2)	longitud total (m)	cantidad x piso (m3)	Cantidad total (m3)	
vigas de carga	0,40x0,60	0,24	101,00	24,24	290,88	
Vigas de rigidez	0,35x0,60	0,24	76,50	18,36	220,32	
Loseta de entrepiso	NA	463,00	0,05	23,15	277,80	
Nervaduras	0,15x0,45	0,07	332,30	22,43	269,16	
Riostras	0,10x0,45	0,045	58,75	2,64	31,73	
Columnas	0,7x0,7	0,49	64,00	31,36	376,32	
Muros de corte	NA	116,8	0,25	29,20	350,40	
TOTAL					1816,61	

Acero corrugado G60				
Elemento	Longitud tota	Peso (kg/m)	Peso x piso (kg)	Peso total (Kg)
Varilla 1/2"	1078,51	0,99	1072,04	12864,50
Varilla 5/8"	520,15	1,55	807,27	9687,27
Varilla 6/8"	131,84	2,24	294,66	3535,95
Varilla 1"	791,04	3,973	3142,80	37713,62
TOTAL				63801,35

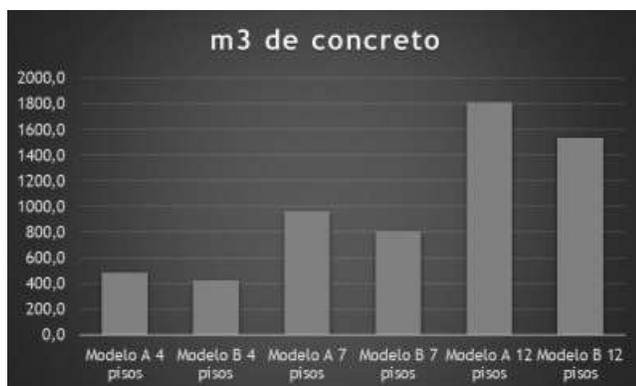
Modelo de doce niveles con losa postensada

Concreto					
Elemento	Sección	Área (m2)	longitud total (m)	cantidad x piso (m3)	Cantidad total (m3)
vigas de carga	0,40x0,60	0,24	101,00	24,24	290,88
Vigas de rigidez	0,35x0,60	0,24	76,50	18,36	220,32
Loseta de entrepiso	NA	463,00	0,05	23,15	277,80
Nervaduras	0,15x0,17	0,03	332,30	8,47	101,68
Riostras	0,15x0,17	0,0255	58,75	1,50	17,98
Columnas	0,6x0,6	0,36	64,00	23,04	276,48
Muros de corte	NA	116,8	0,25	29,20	350,40
TOTAL					1535,54

Acero corrugado G60				
Elemento	Longitud total	Peso (kg/m)	Peso x piso (kg)	Peso total (Kg)
Varilla 3/8"	684,54	0,56	383,34	4600,10
Varilla 1/2"	393,98	0,99	391,61	4699,33
Varilla 5/8"	520,15	1,55	807,27	9687,27
Varilla 1"	791,04	3,973	3142,80	37713,62
				56700,33
POSTENSADO				
cable 0,5" (ML)	797,52	NA	NA	9570,24

CONCLUSIONES

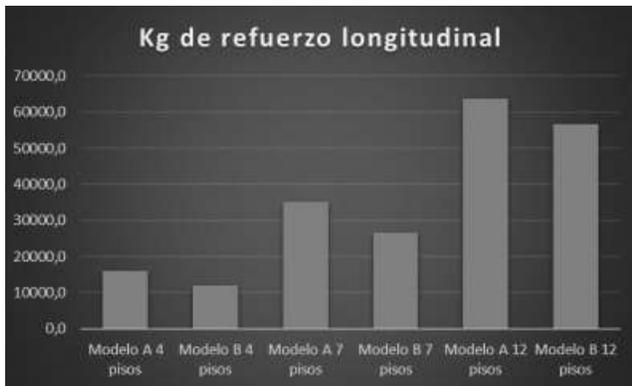
Cuando se planteó el problema de este trabajo de grado, se buscaba cumplir el objetivo de comparar dos modelos para un mismo sistema estructural de pórticos con muros de corte para el control de derivas: uno de los modelos con una losa en concreto reforzado, nervada y armada en una sola dirección, y otro con el mismo sistema de losas, pero proponiendo su reforzamiento de nervaduras con elementos postensados. Para ampliar un poco más el umbral de análisis, se propuso un aumento progresivo en los números de piso y, por consiguiente, en la altura total de la edificación para cada uno de estos modelos.



Los resultados obtenidos en torno al peso total de las edificaciones, los desplazamientos relativos de piso, los periodos fundamentales de las estructuras, el tipo y las cuantías de reforzamiento de las losas en cada uno de los casos propuestos, son reflejo de los objetivos que se buscaban con esta investigación, y que se ponen a disposición del lector para ayudarlo a comprender el comportamiento estructural para las configuraciones descritas en el proyecto.

A lo largo del tiempo se muestran tablas representativas de las cantidades aproximadas con respecto al concreto, el reforzamiento longitudinal y los elementos tipo cables, correspondientes a las losas postensadas; con estos valores podemos hacernos una idea de la disminución de rubros de esta clase, necesarios en la construcción de un modelo con respecto al otro. Estas disminuciones se deben principalmente a la reducción del espesor del sistema de losas, la disminución de la sección transversal de columnas y, por ende, a la reducción del peso total de la estructura.

Es de vital importancia aclarar la limitación del presente proyecto en la toma de la decisión de escoger una metodología de reforzamiento. Para esta decisión es clave evaluar aspectos como costos totales finales,



tiempos de ejecución de la obra, facilidades de obtención de mano de obra calificada y materiales especiales.

Dicho esto, se invita al profesional que desee continuar con la investigación a que evalúe las alternativas con todas estas variables ya mencionadas, con la finalidad de que a medida que se vaya despertando más interés en el país con respecto a los elementos postensados para losas se pueda ir obteniendo un documento final, realizado con un complemento total de proyectos que se puedan hacer a partir de este. A su vez, el presente proyecto tenía una limitante con respecto a solo evaluar el reforzamiento longitudinal, por lo que se hace la invitación a continuar la investigación evaluando los aspectos del reforzamiento transversal encarga del cortante en los diversos elementos, teniendo presentes las ventajas que trae el precomprimir los elementos de concreto, reduciendo dichos esfuerzos de cortante.

Como forma aclaratoria, se dispuso que la ubicación del edificio a modo de ejemplo que se planteó para el proyecto fuera en la ciudad de Bogotá, una zona de amenaza sísmica intermedia, según los estudios reflejados en la norma sismorresistente del país. Después se siguieron los lineamientos para las revisiones de la

resistencia sísmica de cada uno de los modelos bajo los coeficientes de disipación de energía sísmica mostrados anteriormente.

Se puede llegar a malinterpretar basándose en la hipótesis planteada en el proyecto, que consistía en demostrar las ventajas del uso de concreto postensado en la construcción de losas de entrepiso para edificaciones en Bogotá, y pensar que entre el concreto postensado y el concreto reforzado se contraponen, pero por el contrario, se complementan uno al otro. Y es que, como se evidenció, a pesar de hacer reducciones de sección en los nervios, aun es necesario acudir a las propiedades de los reforzamientos tradicionales para garantizar el correcto funcionamiento de los elementos, generando soluciones que requieren menos rubros con respecto a las cantidad de materiales, mano de obra y tiempos de ejecución.

En relación con los objetivos secundarios, también se logró el cometido, lo que consistía en crear una base documentada de la comparación técnica de dos tipos de reforzamiento para losas nervadas armadas en una dirección, y de este modo fomentar en el país el diseño y la construcción de este tipo de estructuras dejando evidencia para que entren en discusión las ventajas y desventajas que tenía un tipo de modelo respecto al otro.

Cabe destacar la limitación que tuvo el presente proyecto al estudio de elementos postensados, ya que no se incluyeron análisis para elementos prefabricados pretensados, otra posible variable para tener en cuenta en futuras investigaciones. En el sector de la construcción es más común ver el uso de elementos pretensados para la construcción de losas, pero la finalidad de la presente investigación es incentivar el empleo de elementos postensados para el mismo fin en la ciudad y en el país, aprovechando las ventajas de ser elementos con mayor resistencia mecánica con respecto a los pretensados y también la oportunidad de hacer cambio de uso de los entrepisos debido a la posibilidad de realizar re-tensionamientos a la tipología de cables no adheridos.

Así las cosas, es muy pertinente dejar en claro las limitaciones del estudio en cuestión. El enfoque principal era analizar los elementos estructurales en conjunto, por lo que no se realizaron estudios de costos o de tiempos de ejecución, rubros importantes en las decisiones de alternativas de construcción. El proyecto se centró solo en el estudio de un tipo de losa, y no se tomaron en cuenta las variaciones si se analizaban, por ejemplo, losas

planas o losa compuesta tipo lámina colaborante. Los materiales de diseño se delimitaron para una correcta comparación, pero tampoco se consideraron las variaciones si se modificaban estos materiales.

Las limitaciones se listan con el único propósito de que colegas y futuros colegas se interesen en tomar este documento como un punto de partida, analizando las variaciones nombradas, y aumentar en el país el interés por el uso de concreto postensado para edificaciones verticales. Como recomendación final, hay que tener en cuenta las luces de trabajo que se van a evaluar y disponer un límite mínimo de estas luces, debido al mal trabajo que hace más visibles los elementos presforzados para luces inferiores a los 6 m.

Evaluación de la planta de tratamiento de agua potable del municipio de Cumaral (Meta)

Evaluation of the water treatment plant of the municipality Cumaral (Meta)

MIGUEL ÁNGEL BETANCUR CRUZ¹ – JAIRO ALBERTO ROMERO ROJAS²

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

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

miguel.betancur-c@mail.escuelaing.edu.co - jairo.romero@escuelaing.edu.co

Recibido: 08/12/2021 Aceptado: 15/01/2022

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

Resumen

En este artículo se presentan la descripción, diagnóstico hidráulico y rendimiento operacional de la planta de tratamiento de agua potable (PTAP) del municipio de Cumaral (Meta), con base en el análisis de sus componentes y de los resultados obtenidos en la caracterización fisicoquímica y microbiológica del agua cruda y del agua tratada¹.

Palabras claves: tratamiento de aguas, agua potable.

Abstract

This article shows the description, hydraulic diagnosis, and results of the operation of the WTP, according with the analysis of its components and results of the physicochemical and microbiological characterization of the raw and treated water¹.

Keywords: water treatment, potable water.

INTRODUCCIÓN

El tratamiento para agua potable tiene como finalidad adaptar los valores de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos naturales de una fuente de abastecimiento superficial o subterránea a los valores de referencia establecidos en la norma legal vigente: Resolución 2115 de 2007 del Ministerio de Protección Social.

El comportamiento hidráulico y operacional de los sistemas de tratamiento de agua potable es fundamental para el cumplimiento de los valores de referencia establecidos en la norma legal aplicable y en la bibliografía especializada en este campo.

METODOLOGÍA

Se analizaron los estudios y diseños iniciales con los que se construyó el sistema existente, compuesto por cámara de aquietamiento de 1,3 m de ancho, 1,3 m de largo y 1,0 m de profundidad; aforo y mezcla rápida con canaleta Parshall de 12"; dos unidades de floculación tipo Alabama, cada una con diez cámaras de 2,4 m de largo, 0,65 m de ancho y 1,93 m de profundidad; dos

unidades de sedimentación de tasa alta de 4,92 m de ancho, 3,95 m de longitud y 4 m de profundidad, con paneles hexagonales de sedimentación acelerada, y 4 filtros de 1,9 m de longitud, 2,31 m de ancho y 4,5 m de profundidad, con lecho filtrante de arena y antracita.

Se hizo el diagnóstico hidráulico de cada componente para los caudales de diseño proyectado: 50 y 75 L/s, de acuerdo con los lineamientos establecidos en el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico, RAS 2000³; en el título C del Reglamento de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS 2010⁴ y en la Resolución 0330 de 2017⁵. Para determinar la eficiencia del sistema se analizaron color, turbiedad, hierro, *E. coli* y coliformes totales comparados con los límites permisibles establecidos en la Resolución 2115 de 2017, del Ministerio de Protección Social⁶.

RESULTADOS

Los resultados del diagnóstico hecho se incluyen más adelante (tablas 1 a 7).

Tabla 1
Diagnóstico de cámara de aquietamiento

Parámetro	Unidad	Valor	Referencia ²	Cumplimiento
Velocidad ascensional Q= 50 L/s	m/s	0,03	0,04 - 0,1	No
Velocidad ascensional Q= 75 L/s	m/s	0,044	0,04 - 0,1	Sí
Tiempo de retención Q= 50 L/s	s	29,73	30 - 60	No
Tiempo de retención Q= 75 L/s	s	20,38	30 - 60	No

Tabla 2
Diagnóstico de mezcla rápida (canaleta Parshall)

Parámetro	Unidad	Valor	Referencia ^{3,4,5}	Cumplimiento
Velocidad en la garganta Q= 50 L/s	m/s	0,42	>2	No
Velocidad del efluente Q= 50 L/s	m/s	0,62	>0,75	No
Número de Froude Q= 50 L/s		3,39	1,7- 2,5 o 4,5 - 9	No
Relación h_p/W , Q= 50 L/s		0,58	0,4-0,8	Si
Tiempo de retención, Q= 50 L/s	s	1,53	<1	No
Gradiente de velocidad, Q= 50 L/s	s ⁻¹	996	1000 - 2000	Sí
Relación h_p/W , Q= 75 L/s		0,76	0,4-0,8	Sí
Velocidad en la garganta, Q= 75 L/s	m/s	0,48	>2	No
Velocidad del efluente. Q= 75 L/s	m/s	0,68	>0.75	No
Número de Froude, Q= 75 L/s		2,86	1,7- 2,5 o 4,5 - 9	No
Tiempo de retención, Q= 75 L/s	s	1,35	<1	No
Gradiente de velocidad, Q= 75 L/s	s ⁻¹	1.049	1000 - 2000	Sí

En la cámara de quietamiento, solamente se satisface el valor de referencia para velocidad ascensional con el caudal de 75 L/s. Sin embargo, pueden considerarse aceptables los valores observados para ambos caudales.

En la canaleta Parshall no se satisfacen los valores de referencia para velocidad en la garganta, velocidad del efluente y tiempo de retención, aunque se cumple con los valores recomendados de gradiente de velocidad para mezcla rápida.

Tabla 3
Diagnóstico floculador Alabama Q= 50 L/s

Parámetro	Unidad	Valor	Referencia ^{3,4,5}	Cumplimiento
Velocidad en el codo, zona A	m/s	0,43	0,2-0,4	No
Velocidad en el codo, zona B	m/s	0,40	0,2-0,4	Sí
Velocidad en el codo, zona C	m/s	0,37	0,2-0,4	Sí
Velocidad en el codo, zona D	m/s	0,34	0,2-0,4	Sí
Velocidad en el codo, zona E	m/s	0,32	0,2-0,4	Sí
Tiempo de retención	min	17,47	20-40	No
Gradiente, zona A	s ⁻¹	59,54	10-70	Sí
Gradiente, zona B	s ⁻¹	54	10-70	Sí
Gradiente, zona C	s ⁻¹	49,15	10-70	Sí
Gradiente, zona D	s ⁻¹	44,89	10-70	Sí
Gradiente, zona E	s ⁻¹	41,13	10-70	Sí
Carga superficial por cámara, zona A	L/s*m ²	17,08	25-50	No
Carga superficial por cámara, zona B	L/s*m ²	16,53	25-50	No
Carga superficial por cámara, zona C	L/s*m ²	16,03	25-50	No
Carga superficial por cámara, zona D	L/s*m ²	15,55	25-50	No
Carga superficial por cámara, zona E	L/s*m ²	15,10	25-50	No

Para el caudal de 50 L/s, los valores de velocidad en los codos y de gradiente son aceptables, pero no se satisfacen los criterios para carga superficial y tiempo de retención.

Tabla 4
Diagnóstico floculador Alabama Q= 75 L/s

Parámetro	Unidad	Valor	Referencia ^{3,4,5}	Cumplimiento
Velocidad en el codo, zona A	m/s	0,65	0,2-0,4	No
Velocidad en el codo, zona B	m/s	0,60	0,2-0,4	No
Velocidad en el codo, zona C	m/s	0,55	0,2-0,4	No
Velocidad en el codo, zona D	m/s	0,51	0,2-0,4	No
Velocidad en el codo, zona E	m/s	0,48	0,2-0,4	No
Tiempo de retención	min	11,65	20-40	No
Gradiente, zona A	s ⁻¹	109,39	10-70	No
Gradiente, zona B	s ⁻¹	99,20	10-70	No
Gradiente, zona C	s ⁻¹	90,29	10-70	No
Gradiente, zona D	s ⁻¹	82,47	10-70	No
Gradiente, zona E	s ⁻¹	75,57	10-70	No
Carga superficial por cámara, zona A	L/s*m ²	25,61	25-50	Sí
Carga superficial por cámara, zona B	L/s*m ²	24,80	25-50	No
Carga superficial por cámara, zona C	L/s*m ²	24,04	25-50	No
Carga superficial por cámara, zona D	L/s*m ²	23,32	25-50	No
Carga superficial por cámara, zona E	L/s*m ²	22,64	25-50	No

Para el caudal de 75 L/s, el floculador no cumple con los criterios para velocidad en los codos, tiempo de retención ni carga superficial.

Tabla 5
Diagnóstico del sedimentador

Parámetro	Unidad	Valor	Referencia ^(3,4,5)	Cumplimiento
Velocidad de flujo Q= 50 L/s	cm/s	0,18	<1	Sí
Carga superficial Q= 50 L/s	m/d	131	120 - 185	Sí
Velocidad crítica de sedimentación Q= 50 L/s	cm/s	0,043	15 - 30	Sí
Tiempo de retención del tanque Q= 50 L/s	h	0,86	2 - 4	No
Tiempo de retención de celdas Q= 50 L/s	min	12	10 - 20	Sí
Carga superficial Q= 75 L/s	m/d	197	120 - 185	No
Velocidad de flujo Q= 75 L/s	cm/s	0,26	<1	Sí
Velocidad crítica de sedimentación Q= 75 L/s	cm/s	0,073	15 - 30	Sí
Tiempo de retención tanque Q= 75 L/s	h	0,57	2 - 4	No
Tiempo de retención celdas Q= 75 L/s	min	8	10 - 20	No

El sedimentador satisface los criterios de diseño de sedimentadores de tasa alta para velocidad de flujo y velocidad crítica de sedimentación. El tiempo de retención en las celdas se cumple solamente para 50 L/s.

Tabla 6
Diagnóstico de filtros

Parámetro	Unidad	Valor	Referencia ^(3,4,5)	Cumplimiento
Tasa de filtración Q= 50 L/s	m/d	246	180-350	Sí
Tasa de filtración Q= 75 L/s	m/d	374	180-350	No

Para el caudal de 75 L/s, la tasa de filtración supera el valor de referencia.

Tabla 7
Eficiencia PTAP

Parámetro	Unidad	Agua cruda	Agua tratada	Eficiencia, %
Color	UPC	373	5	99
Turbiedad	UNT	78,2	0,37	100
Hierro	mg/L	0,94	0,1	89
<i>E. coli</i>	UFC/100 mL	17	0	100
Coliformes totales	UFC/100 mL	48	0	100

La remoción de turbiedad, *E. coli* y coliformes totales es del 100 %, la de color del 99 % y la de hierro de 89 %, cumpliendo con los límites establecidos en la Resolución 2115 de 2007 para agua potable.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Una de las recomendaciones, producto de este estudio es construir una nueva cámara de quietamiento, con compuerta con tubería de desagüe y vertedero de control para caudal de excesos.

Para la distribución de agua floculada a los sedimentadores, se aconseja adoptar una pared permeable con orificios que distribuyan uniformemente el agua en toda la sección del sedimentador

Los paneles de sedimentación acelerada y las canaletas de agua sedimentada requieren mantenimiento: remplazo por paneles hexagonales de sedimentación acelerada, fabricados en ABS, calibre 40, color negro, resistentes a los rayos ultravioleta, cubiertos con pintura epóxica para prevenir corrosión y nuevas canaletas rectangulares, con vertederos triangulares laterales.

Para tratar 75 L/s, se recomienda incrementar el número de filtros, reponer el lecho filtrante, así como las compuertas, ya que se observaron fugas de agua.

Se sugiere implementar un sistema de tratamiento de lodos: tanque de igualamiento, tanque de espesamiento y lechos de secado. Los análisis de calidad del agua realizados indican que la PTAP satisface los requerimientos de la norma para agua potable.

REFERENCIAS

- Betancur, C. M. A. (2020). *Evaluación de la planta de tratamiento de agua potable del municipio de Cumaral (Meta)*. Trabajo de grado para la maestría en Ingeniería Civil. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- Lozano, R. y Lozano, B. (2015). *Potabilización del agua*. Bogotá: Universidad Piloto de Colombia.
- Ministerio de Desarrollo Económico. Colombia (2000). Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico, RAS 2000.
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. Colombia (2010). Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico, RAS. Título C. Sistemas de potabilización.
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, Colombia (2017). Resolución 0330 del 8 de junio de 2017. Reglamento técnico para el sector de agua potable y saneamiento básico, RAS.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Colombia (2007). Resolución 2115 del 22 de junio de 2007. Calidad del agua para consumo humano.

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, 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 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