

Mejorando la resiliencia de sistemas distribuidos con ingeniería del caos.

Evaluación del consumo energético de un vehículo eléctrico en la ciudad de Bogotá.

Corredores factibles para la implementación de tranvías en la ciudad de Bogotá.

Elaboración de modelos predictivos de accidentalidad para víctimas no fatales en la concesión Devinorte.

Lineamientos para la accesibilidad de la infraestructura peatonal a personas con movilidad reducida y de la tercera edad. Caso de estudio: municipio de Chía, avenida Pradilla entre el parque Ospina y el centro comercial Centro Chía.

Análisis de la correlación entre la accidentalidad vial en puntos críticos y los niveles de servicio, tomando como caso de estudio el corredor de la avenida Boyacá entre la calle 183 y la autopista Sur (AC 45A sur).

Evaluación del efecto del cambio climático en la hidrología superficial de la cuenca hidrográfica del lago de Tota (Boyacá).

Evaluación de la cáscara de plátano (*Musa AAB Simmonds*) como coagulante natural para la clarificación y remoción de hierro en agua.



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

Respetemos los derechos humanos

Jairo Alberto Romero Rojas

7-16

Mejorando la resiliencia de sistemas distribuidos con ingeniería del caos

Luis Felipe Díaz Chica

En este artículo se busca entender cómo la ingeniería del caos ayuda a mejorar la resiliencia de sistemas distribuidos. La ingeniería del caos es una disciplina necesaria cuando se usan sistemas distribuidos. Para concluir, se exploran aquellos nichos en los que la ingeniería del caos todavía es joven y las oportunidades que hay para desarrollarse en nuevas áreas aún no exploradas.

17-23

Evaluación del consumo energético de un vehículo eléctrico en la ciudad de Bogotá

Sebastián Torres Franco - Mónica Marcela Suárez Pradilla - Iván Camilo Durán Tovar - Agustín Rafael Marulanda Guerra

Con el objetivo de contribuir a la caracterización del consumo energético de EV en el contexto local, a lo largo de este artículo se presenta la implementación de un modelo de consumo energético considerando el comportamiento del tránsito en una autopista en la ciudad de Bogotá, D.C.

25-29

Corredores factibles para la implementación de tranvías en la ciudad de Bogotá

Iván Camilo Barabona Rodríguez - Santiago Henao-Pérez

En este estudio se determinaron los corredores de la ciudad por los cuales es factible implementar un sistema de transporte público tipo tranvía, que permita atender la demanda insatisfecha y completar la red de transporte público. El análisis se hizo mediante un modelo de asignación para determinar la demanda de los corredores que se pueden cubrir con este tipo de sistemas.

31-36

Elaboración de modelos predictivos de accidentalidad para víctimas no fatales en la concesión Devinorte

Jairo Francisco Bravo Ramírez - Santiago Henao Pérez

Esta investigación se desarrolla con base en información recopilada de siniestros reportados por la concesión Devinorte en el departamento de Cundinamarca (Colombia) durante los años 2010 a 2016. A su vez, el proyecto permite verificar que es posible la realización de modelos predictivos con RNA cuyo desempeño aporta valores de correlaciones que se pueden considerar relevantes para aplicarlos para bases de datos con registros de siniestros viales.

37-42

Lineamientos para la accesibilidad de la infraestructura peatonal a personas con movilidad reducida y de la tercera edad. Caso de estudio: municipio de Chía, avenida Pradilla entre el parque Ospina y el centro comercial Centro Chía

Jorge Mario Gantiva Garzón - Maritza Cecilia Villamizar Roperó

El trabajo realizado parte de los problemas que afrontan los peatones en el municipio de Chía. Se hizo una revisión bibliográfica con el fin de identificar los aspectos necesarios en el diseño de aceras, andenes y pasos peatonales, y se llevó a cabo un concienzudo trabajo de campo, mediante el cual se recolectó información que luego se procesó para elaborar archivos geográficos que permitieran presentar algunos mapas temáticos con la caracterización del corredor.

43-55

Análisis de la correlación entre la accidentalidad vial en puntos críticos y los niveles de servicio, tomando como caso de estudio el corredor de la avenida Boyacá entre la calle 183 y la autopista Sur (AC 45A sur)

Gabriel Andrés Velandia García - María Teresa Molina Cifuentes

Actualmente, se consideran las condiciones del accidente y su relación con los volúmenes de tránsito, pero no se tienen en cuenta otras variables de la operación vial que están directamente relacionadas con los accidentes. Básicamente, se hace evidente la necesidad de considerar las condiciones de operación, buscando una correspondencia entre la accidentalidad y los niveles de servicio.

57-76

Evaluación del efecto del cambio climático en la hidrología superficial de la cuenca hidrográfica del lago de Tota (Boyacá)

Juan Sebastián Barrera Sarmiento - Germán Eduardo Acero Riveros

La cuenca, considerada de alta montaña, se encuentra rodeada por el complejo de páramos Tota-Bijagual-Mamapacha, un ecosistema estratégico por sus servicios ambientales, especialmente la provisión y regulación hídrica, vulnerable ante la incertidumbre de la afectación que pueda traer el cambio climático a sus servicios ecosistémicos. Frente a este problema, se busca determinar cómo afectaría el calentamiento global la hidrología superficial de los caudales de subcuencas instrumentadas, así como la disponibilidad de recurso hídrico a mediano plazo (2020-2049).

77-86

Evaluación de la cáscara de plátano (*Musa AAB Simmonds*) como coagulante natural para la clarificación y remoción de hierro en agua

Mario Fernando Ortiz Carvajal - María Paulina Villegas De Brigard

El plátano, en sus diversas variedades, se cultiva ampliamente en Colombia por ser un recurso de fácil adquisición y bajo costo; gracias a sus concentraciones de almidón y a las características propias coagulantes reportadas por varios autores, así como también a su amplia zona de siembra y producción, que abarca la casi totalidad del territorio, se tomó la cáscara de este vegetal en la variedad *Musa AAB Simmonds*, que es la más común y comercializada en Colombia, como óptima para la revisión de un posible sustituto o coadyuvante orgánico de los coagulantes tradicionales, en tratamientos de agua, en el territorio colombiano.

87 / ALCANCE Y POLÍTICAS

Editorial

Respetemos los derechos humanos

JAIRO ALBERTO ROMERO ROJAS

Profesor titular de la Escuela Colombiana de Ingeniería

jairo.romero@escuelaing.edu.co

Peligroso argumento aquel que supone que los derechos humanos legalizan la protesta violenta, los destrozos, los desmanes, así como las pérdidas económicas y de vidas.

Desde hace miles de años se protesta contra la corrupción, la violencia, la injusticia social, las desigualdades, la exclusión, el aumento de los impuestos, el hambre, la pobreza, pero no se protesta contra aquellos que ejercen violencia escudándose en el derecho a la protesta, porque los impulsan motivaciones políticas y el odio contra el que tiene más que el que protesta.

Resulta increíble que entre los protestantes más radicales se encuentren estudiantes, profesores y líderes políticos, todos ellos privilegiados por el Estado y con formación intelectual suficiente para distinguir entre el bien y el mal, así como para saber que el cumplimiento del deber es lo único que puede llevar a la satisfacción y el respeto de los derechos humanos.

En los últimos días se han multiplicado los pronunciamientos sobre defensa de los derechos humanos de protestantes y criminales, pero se olvida y se desconoce que el Estado debe cumplir con su deber de usar toda

la represión necesaria para garantizar que los actos violentos, el robo, los destrozos y los atentados contra la propiedad pública y privada, y especialmente contra la vida, no ocurran.

Todo delito se debe controlar y castigar, pues una protesta en la que se violan los derechos de quienes no participan en ella es un delito y no tiene justificación alguna.

Precisamente por esto no se puede seguir calificando como organizaciones sociales a aquellas que piden, contra el interés general, el retiro de la Policía y de las Fuerzas Militares como medios de control de desmanes y atropellos, en particular del Esmad. Los gobiernos tienen el deber y la obligación, por encima de todo interés político o populista, de imponer el orden y la disciplina social.

Por tal razón, traigo a colación dos frases célebres de Marco Tulio Cicerón: “El buen ciudadano es aquel que no puede tolerar en su patria un poder que pretende hacerse superior a las leyes” y “Para ser libres hay que ser esclavos de la ley”.

Mejorando la resiliencia de sistemas distribuidos con ingeniería del caos

Improving distributed systems resilience through chaos engineering

LUIS FELIPE DÍAZ CHICA

Estudiante de la Maestría en Informática de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

luis.diaz-c@mail.escuelaing.edu.co

Recibido: 01/04/2020 Aceptado: 27/06/2020

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

Resumen

En este artículo se busca entender cómo la ingeniería del caos ayuda a mejorar la resiliencia de sistemas distribuidos.

A pesar del riesgo que implica aplicar ingeniería del caos en ambientes productivos, se exponen varios escenarios de éxito en los que se ha apostado a inyectar fallas en los sistemas de manera intencional para ganar más confianza y mejorar la resiliencia. La ingeniería del caos es una práctica muy joven, que está empezando a ser adoptada por la industria y a ser vista como una disciplina necesaria cuando se usan sistemas distribuidos. Para concluir, se exploran aquellos nichos en los que la ingeniería del caos todavía es joven y las oportunidades que hay para desarrollarse en nuevas áreas aún no exploradas.

Palabras claves: ingeniería del caos, pruebas de caos, teoría del caos, inyección de errores, pruebas por inyección de errores, sistemas resilientes.

Abstract

In this article we try to understand how chaos engineering is improving distributed systems resilience.

Despite its risks in productive environments, a big group of companies are applying chaos engineering to gain more trust in their systems. Chaos engineering is a practice that is required for those organizations that own distributed systems. At the end of this article, we explore new places where to apply chaos engineering and opportunities where this practice has not even arrived.

Keywords: chaos engineering, chaos testing, chaos theory, failure injection, testing by failure injection, resilient systems.

INTRODUCCIÓN

Los servicios que entregan valor a los usuarios hoy en día se ejecutan completamente por internet.

Estos servicios se están implementando de manera distribuida, en otras palabras, en la forma de una colección de componentes autónomos que colaboran y hacen parecer al usuario un sistema único. A la escala con la que los sistemas distribuidos se incrementan, así mismo aumenta la forma con la que éstos pueden fallar; no solamente pueden fallar los componentes individuales del sistema, sino también éstos al intentar interactuar con otros componentes. Lo anterior hace que la importancia de asegurar la estabilidad del sistema sea crítica [1].

Grandes compañías podrían verse muy afectadas por fallos mínimos. Se calcula que si amazon.com se cayera un minuto podría perder alrededor de US\$220.000 [2]. A pesar de la dificultad de poder evaluar qué tan bien responde un sistema distribuido ante eventos inesperados, existen prácticas como matrices de pruebas, los Gameday o la ingeniería de caos.

La ingeniería del caos tiene como propósito proveer evidencia de las debilidades de un sistema, así de simple.

Esto se hace por medio de experimentos en producción que inyectan fallas en forma automatizada para evidenciar debilidades y proveer un análisis de cómo el sistema responde a escenarios turbulentos [31]. La resiliencia de un sistema es la capacidad que éste tiene de reaccionar y recuperarse de fallos inesperados, con el menor impacto posible.

En este artículo se busca conocer cómo la ingeniería del caos ayuda a robustecer la resiliencia de un sistema distribuido [3].

Las siguientes secciones se dividen en tres partes. En la primera parte se incluye una sección para definir la ingeniería del caos, los sistemas distribuidos y la resiliencia. En la segunda parte se explora cómo se aplica la ingeniería del caos para mejorar la resiliencia en sistemas distribuidos, junto con algunos experimentos hechos por universidades y organizaciones. En la tercera parte se exponen las herramientas actuales para realizar ingeniería del caos, las ventajas y desventajas de su aplicación y algunos trabajos para el futuro. Todo este contenido se hace sobre una revisión de la bibliografía existente acerca del tema.

DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA

Se realizó una búsqueda bibliográfica usando los buscadores IEEE, Google Scholar y Springer, considerando solamente artículos publicados entre los años 2010 y 2020. Los términos de búsqueda utilizados fueron “Chaos Engineering”, “Chaos Testing”, “Chaos Theory”, “Error Injection”, “Manual Injection Testing”, “Sistemas Resilientes”. De los artículos encontrados se tomaron definiciones de ingeniería del caos, casos de éxito, herramientas que se han construido, críticas y puntos de vista sobre los resultados de aplicar ingeniería del caos en sistemas distribuidos.

Estos artículos se utilizaron como fuentes de investigación para conocer la historia, el estado actual y trabajo para el futuro de la ingeniería del caos.

SISTEMAS DISTRIBUIDOS

Existen muchas definiciones para un sistema distribuido en la bibliografía. Maarten van Steen define un sistema distribuido como “Una colección de elementos de computación autónomos, que se muestran al usuario como un solo sistema coherente” [4].

Un sistema distribuido debe esconder el hecho de que sus procesos y recursos están físicamente distribuidos entre múltiples computadores, lo que debería ser invisible o transparente al usuario final [4]; un ejemplo de esto es mostrar el mismo objeto a un usuario, sin importar qué servidor del sistema está enviando el objeto al usuario; en otras palabras, replicación de datos.

Igualmente, un sistema distribuido se debe poder integrar con otros sistemas a través de interfaces o contratos definidos por protocolos de comunicación estándar, como HTTP, gRPC y MQTT. Así mismo, la escalabilidad es un objetivo de diseño muy importante; normalmente, estos sistemas atienden grandes volúmenes de usuarios al día.

Para la construcción de un sistema distribuido hay que tener en cuenta escenarios como fallos en la red, comunicación insegura, cambios en la topología de la red, la latencia nunca será cero y no hay ancho de banda infinito.

Este tipo de cosas hacen que la construcción de los sistemas distribuidos no sea una tarea trivial, el diseño debe contemplar muchos escenarios, puesto que la responsabilidad del sistema está completamente distri-

buida y los canales de comunicación entre los elementos puede fallar [4].

La arquitectura de un sistema distribuido nos indica cómo están organizados sus componentes y la forma en la que se comportan. Existen varios tipos de arquitectura en la actualidad:

- Arquitectura por niveles.
- Arquitectura basada en objetos.
- Arquitectura centrada en recursos.
- Arquitectura basada en eventos (figura 1).

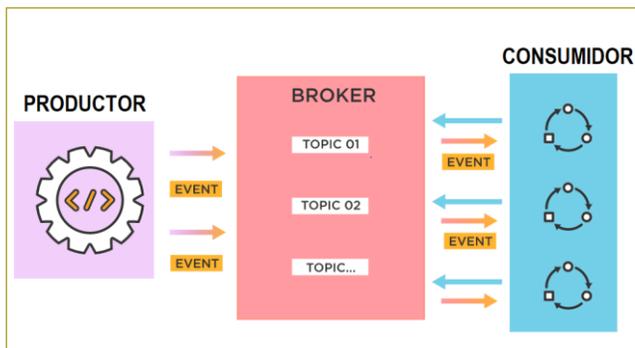


Figura 1. Arquitectura basada en eventos [33]. Productor, broker y consumidor son los componentes más característicos de una arquitectura orientada al consumo de eventos.

Cada una de estas arquitecturas tiene sus ventajas y desventajas; las soluciones modernas están aplicando arquitecturas híbridas, que combinan varios estilos para sacar lo mejor de cada una. Un ejemplo de esto son los sistemas que exponen sus APIs a través de servicios REST sobre una arquitectura basada en recursos, y al mismo tiempo ofrecen API asíncronas, utilizando arquitecturas basadas en eventos. El trabajo de los arquitectos de *software* consiste en encontrar qué estilos encajan y se combinan mejor al momento de construir un sistema distribuido.

RESILIENCIA

La resiliencia se puede definir como la capacidad de un sistema a seguir funcionando según lo esperado, luego de sufrir una alteración. Se han propuesto patrones de diseño de *software* que ayudan a hacer que los sistemas distribuidos sean más resilientes; *frameworks* como Spring-boot o Service meshes [5], o gestores de contenedores como Kubernetes, ya implementan

estos patrones casi en forma nativa [6]. El desarrollo de un sistema distribuido debería ejecutarse siempre pensando en estos patrones. Algunos patrones de diseño orientados a mejorar la resiliencia de un sistema distribuido son [7]:

- Reintentos limitados. Atrapar errores transitorios en el sistema y reintentar las llamadas al API, con la expectativa de que la falla sea temporal. El número de reintentos se hace un número limitado de veces.
- Tiempo límite. Asegurar que las llamadas a otros componentes se completan en menos de un tiempo límite. Esto se utiliza para evitar que los recursos queden bloqueados, esperando respuestas.
- Cortador de circuito. Previene fallas en cascada entre una cadena de microservicios. Cuando varias llamadas a un microservicio fallan, se *abre* el circuito y el microservicio responde datos cacheados o un error por defecto. De esta manera, se previene una falla en cascada (figura 2). Retroceso (fallback). Cuando una llamada a un microservicio falla es bueno tener un plan B que pueda servir de apoyo para cuando el servicio A falla. Esto normalmente funciona cuando se tienen APIs versionadas.

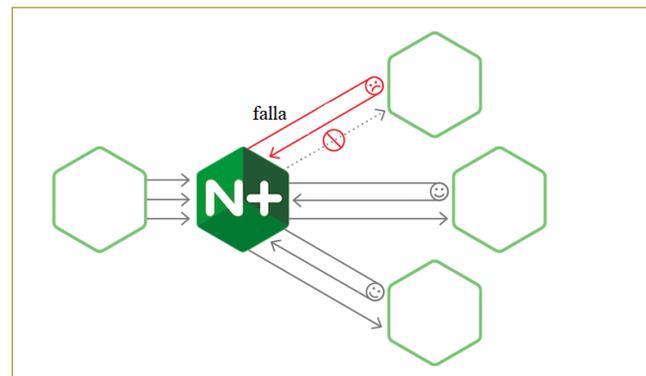


Figura 2. Patrón cortador de circuitos implementado por NGINX [33]. Detecta si un microservicio está respondiendo a un error y, por ende, se bloquea cualquier futura llamada a ese servicio.

INGENIERÍA DEL CAOS

En agosto de 2008, Netflix sufrió una caída en sus servicios por tres días debido a un corte de energía en uno de sus servidores más importantes. Luego de esto vino la segunda caída más grande de la compañía debido a una corrupción en sus bases de datos, y después de

esto hubo otra caída de once horas por causa de un mantenimiento en el sistema. Debido a estas constantes fallas, en 2008 Netflix decidió mover su infraestructura a la nube, consumiendo los servicios de Amazon Web Services, y al mismo tiempo se hizo una reingeniería de su sistema, siguiendo la arquitectura de microservicios.

Junto con la migración a AWS, el equipo de tráfico de Netflix desarrolló una herramienta, denominada Chaos Monkey [8], para poner a prueba su sistema ante posibles fallos y estudiar la forma como éste reaccionaba. El propósito de Chaos Monkey era seleccionar, aleatoriamente, instancias que estén corriendo en producción y destruirlas; así es, detenerlas y destruirlas completamente.

Este proceso se ejecuta en horas en las que el tráfico de usuarios es más bajo, para evitar altos impactos y dar a los ingenieros tiempo de resolver errores en horas de bajo tráfico. Luego de esto, desarrolló experimentos más robustos a los que llamó “Chaos Kong” [9], con los cuales simulaban la caída completa de todas las instancias de Amazon EC2 en una región.

Desde este momento, Netflix ha aportado varias herramientas a la comunidad de ingeniería de caos; incluso construyó una *suite* completa llamada Simian Army, en la que se encuentran aplicaciones para inyectar retrasos en comunicaciones cliente-servidor, terminar regiones de AWS y borrar información de bases de datos.

Para ejecutar pruebas de caos se debe hacer un proceso de análisis y creación de experimentos que ayuden a detectar posibles debilidades del sistema, por lo que se requiere entender cuáles son los puntos críticos del sistema, las dependencias, tanto internas como externas, y determinar el alcance del experimento.

Principios de la ingeniería del caos

El equipo de Netflix propuso cuatro pasos para aplicar ingeniería del caos:

- Definir un estado estacionario del sistema que indica un comportamiento normal.
- Hipotetizar que este estado estacionario continuará tanto en el grupo de control como en el grupo experimental.
- Introducir variables que reflejan eventos del mundo real, como servidores que dejan de funcionar, discos rígidos que funcionan mal, conexiones de red que están cortadas, etc.

- Tratar de refutar la hipótesis buscando una diferencia en el estado estacionario entre el grupo de control y el grupo experimental. Cuanto más difícil es interrumpir el estado estacionario, más confianza tenemos en el comportamiento del sistema. Si se descubre una debilidad, hay ahora un objetivo de mejora antes de que ese comportamiento se manifieste en el sistema.

Estos cuatro pasos están soportados en cinco principios [10]:

- Construir una hipótesis alrededor de un estado fijo.
- Variar eventos del mundo real.
- Correr experimentos en producción.
- Automatizar los experimentos para que se ejecuten automáticamente.
- Minimizar el radio de impacto de los experimentos.

Siguiendo estos principios y aplicando los pasos propuestos por Netflix, se puede tener más confianza en el sistema. Los experimentos pueden realizarse sin límite alguno; el límite lo deciden los diseñadores de los experimentos, teniendo en cuenta las hipótesis y el alcance que hay que probar.

Experimentos para robustecer la resiliencia usando ingeniería del caos

A continuación se exponen experimentos de ingeniería del caos y los resultados obtenidos por varias compañías que operan sobre sistemas distribuidos.

Etsy, una tienda de productos artesanales, lanzó en 2012 su nuevo sistema de pagos [11]; la resiliencia era muy importante, al ser un componente crítico del *e-commerce*. Los ingenieros de Etsy escribieron una lista de los peores escenarios para los cuales debería estar preparado su sistema, entre los que se encontraban casos como caídas completas de un servidor hasta fallos en bases de datos. Luego de que los ingenieros de Etsy probaran estos escenarios en ambientes de desarrollo, estaban listos para aplicar ingeniería del caos en el ambiente de producción; el equipo de Etsy estaba confiado de la capacidad del sistema y así mismo montaron herramientas de monitoreo para confirmar el éxito o fracaso del sistema de pagos a las pruebas.

Para tranquilidad de Etsy, el sistema se comportó según lo esperado; a pesar de algunas pequeñas sorpresas, los ingenieros pudieron remediar los hallazgos sin problema. Un ejemplo de los hallazgos fue relacionado con la comunicación con sistema de antifraude; cuando se probó la indisponibilidad de contactar este servicio, Etsy fallaba por *timeout* esperando una respuesta; esto se corrigió fácilmente al ajustar el *timeout* del servicio [11].

Por otro lado, el equipo de Azure Search en Microsoft desarrolló un modelo para cuantificar el caos; construyó una herramienta llamada Search Chaos Monkey, que puede ejecutar ingeniería del caos en cuatro niveles de impacto: caos bajo, caos miedo, caos alto y caos extremo [12]. Cada nivel varía la forma de afectar el sistema, práctica que ayudó a aplicar caos al sistema de manera gradual, sin tener miedo al impacto que podría ocasionar. Con la aplicación de esta herramienta, el equipo de Azure Search ha probado que los principios de la ingeniería del caos son muy útiles cuando se desarrollan servicios *cloud* y tolerantes a fallos [12].

La ejecución de experimentos de manera automatizada para probar la resiliencia de un sistema es una práctica cada vez más común. El equipo de IBM Watson usó Gremlin, una herramienta de fallas como servicio o *Failure-as-a-Service*, en la que, por medio de una API o CLI, se envían órdenes a un *daemon set* o *sidecars* para inyectar fallas en los microservicios. Gremlin se puede ejecutar en cualquier proveedor *cloud* (figura 3).

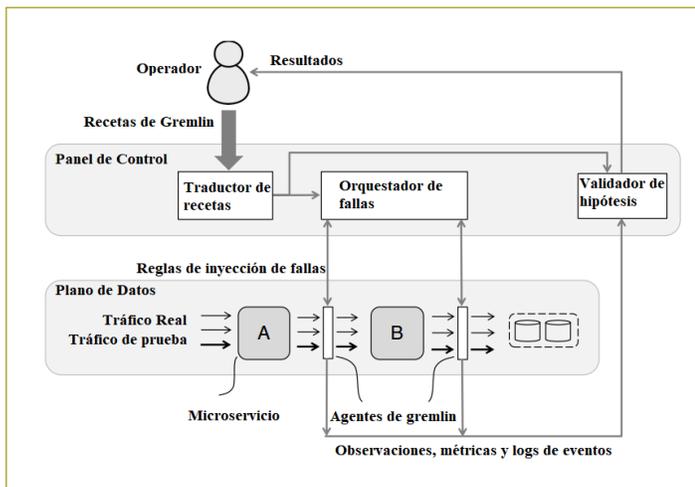


Figura 3. Arquitectura de Gremlin. Los *daemon sets* inyectan fallas en los microservicios enviando instrucciones a un conjunto de *daemon sets* a través del panel de control de Gremlin [13].

Los resultados obtenidos por el equipo de IBM fueron hallazgos relacionados con falta de *timeouts* (figura 4) y *circuit breakers*; esto se detectó cuando se incrementó el *delay* en los microservicios y también la falla continua en la respuesta de alguno de ellos.

El equipo de Facebook aplicó la inyección de errores para detectar y localizar fallas en los *data centers* en *networking*. Para esto manipularon el tiempo de respuesta en red e I/O, y con análisis estadísticos y monitores detectaron *links* o *switches* con problemas en la conexión [14]. Otra prueba que realizó el equipo de Facebook en 2014 consistió en apagar por completo sus *data centers* para probar la resiliencia [15].

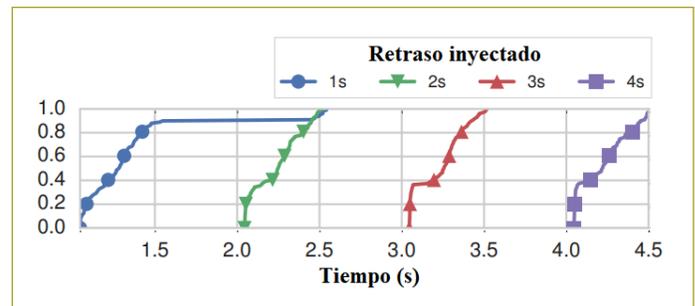


Figura 4. Resultados de IBM al incrementar el *delay* de los microservicios. Se puede observar que no hay una regla de *timeout* y los tiempos de respuesta dependen del tiempo que tomen las dependencias en responder [7].

Groupon diseñó una herramienta propietaria llamada Screwdriver para ejecutar pruebas de caos en *clusters* de diez máquinas [18]; inyectaron varias fallas, como límites de CPU, llenados de discos y problemas de latencia. Una característica de Screwdriver era poder modelar la infraestructura de Groupon utilizando archivos YAML y ejecutar *playbooks* con pruebas controladas. Esto ayudó a Groupon a identificar problemas de resiliencia, como puntos únicos de fallo (*single points of failures*) y falta de *cache* en algunos servicios.

La adopción sin duda es lenta, pero hay grandes compañías que están probando no sólo sistemas web, sino también hay casos como la Fuerza Aérea de Estados Unidos, que está haciendo ingeniería del caos en los sistemas de vuelo. Durante un vuelo de prueba se inyectaron fallas en la configuración, las cuales contenían, entre varias cosas, modificaciones en los centros de gravedad o cambios en los parámetros aerodinámicos; el sistema de vuelo L1 fue capaz de sobrescribir las

configuraciones y solucionar el problema, manteniendo el vuelo a salvo y con un rendimiento esperado [22].

Dentro de un sistema distribuido cualquier componente puede ser crítico, según sus responsabilidades. La ingeniería del caos puede aplicarse a cualquier componente de la arquitectura del sistema, desde microservicios, bases de datos, balanceadores de carga, *proxies* e infraestructura *cloud*, hasta *networking*, niveles de CPU y memoria de los servidores.

Observabilidad

La ejecución de ingeniería del caos sin observabilidad es simplemente caos [21]. La observabilidad es la capacidad de medir el sistema antes, durante y después de correr experimentos de caos. La observabilidad de un sistema puede ser a diferentes niveles, pero lo ideal es tener métricas y *dashboards* que permitan tener una foto del sistema en cualquier momento en el tiempo. Hay varias herramientas para monitorear el estado de un sistema distribuido, como *dashboards* y métricas en Grafana, métricas de contenedores en Kubernetes o *logs* centralizados en Elasticsearch.

Las organizaciones que deseen aplicar ingeniería de caos deben preparar previamente sus sistemas antes de correr experimentos de caos; el equipo de Adobe, en conjunto con Netflix, ha creado una herramienta para monitorear el tráfico y determinar fallas en las comunicaciones en forma visual fácilmente (figura 5).

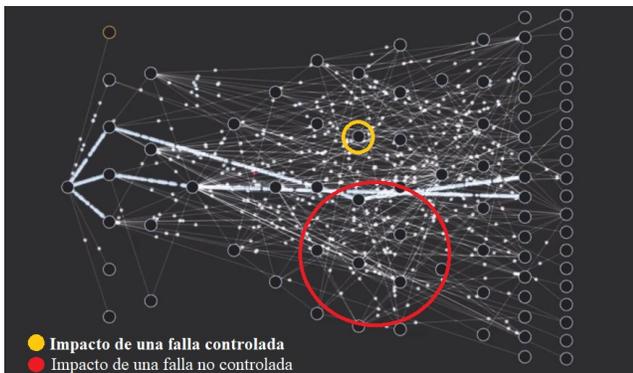


Figura 5. Imagen modificada de la contribución de Adobe al proyecto Vizceral para monitoreo de tráfico en vivo [24], junto con un ejemplo del impacto de una falla controlada contra una falla no controlada.

Muchas herramientas de ingeniería del caos cuentan con sistemas de observabilidad que ayudan a obtener información sobre las pruebas realizadas. Este es el caso de ChaosOrca, una herramienta para hacer ingeniería del caos en aplicaciones corriendo en contenedores, se apoya en métricas nativas de ecosistemas, como Kubernetes, Docker o AWS (figura 6) en la gráfica (b). Se puede ver cómo una aplicación de NGINX logra recuperar su operación (uso de CPU) luego de una perturbación; por el contrario, se observa otro caso (c), en el que la aplicación se queda en un *loop* de consumo de memoria perpetuo cuando se inyecta error en *system calls* [23].

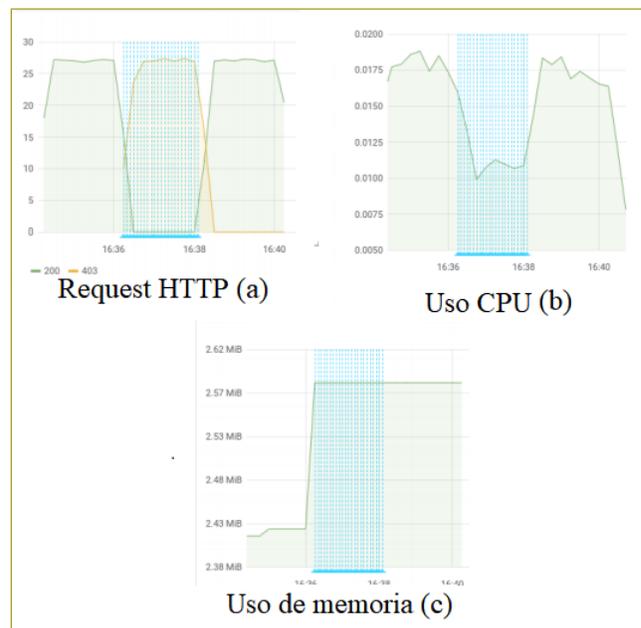


Figura 6. Gráficas resultantes de ChaosOrca. Un conjunto de métricas (área verde) son perturbadas por un periodo de tiempo (área azules) [23].

Otro experimento documentado por estudiantes de la Universidad de Stuttgart se basó en destruir gradualmente *Pods* de Kubernetes que contienen el mismo identificador, cuya funcionalidad es alojar microservicios de configuración [25].

Este es un ejemplo de cómo el radio de explosión de una prueba puede incrementarse. Para este escenario en particular se toman varios *Pods*, no sólo uno, pero es totalmente graduable según los objetivos del experimento.

Utilizando la herramienta de Chaos toolkit, instalada por medio de *helm* en Kubernetes, fue posible ver cómo

el sistema fue capaz de recuperarse en menos de cinco minutos a la falla inyectada (figura 7).

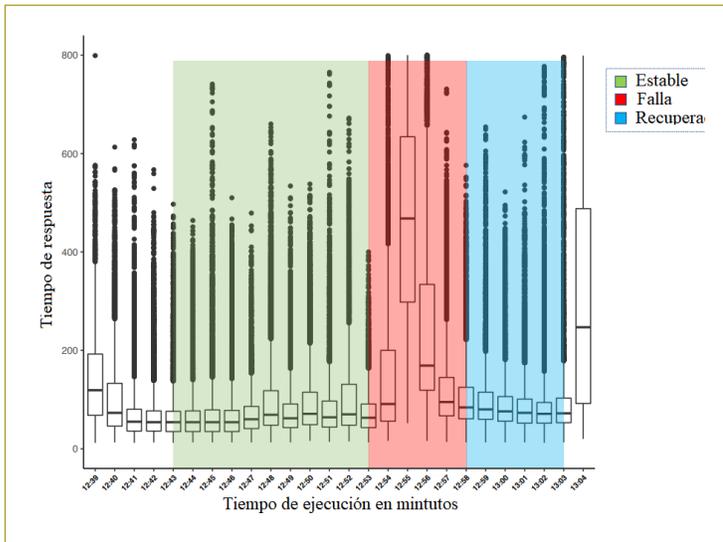


Figura 7. Gráfico para monitorear el experimento de destruir todos los *Pods* con el mismo identificador en Kubernetes usando Chaos toolkit [25].

El monitoreo de un sistema distribuido es crucial para mantener una operación estable. Cuando se aplica ingeniería del caos es necesario tener sistemas de medición como métricas para captar el comportamiento del sistema frente a diferentes perturbaciones. Hay herramientas disponibles que complementan la experimentación y nos permiten monitorear:

- Monitorear cuando un proceso ha terminado su ejecución con éxito o no.
- Trackear el estatus HTTP de los *requests* entre los componentes del sistema.
- Un estándar de métricas para sistemas distribuidos, como uso de CPU, uso de memoria, número de hilos, tiempos de respuestas.
- *Logs* categorizados, informativos, alertas y errores fatales.
- Métricas personalizadas.
- Observabilidad y rastreo de la propagación de errores (por ejemplo, ID de transacción).

Herramientas disponibles

La inyección de fallas puede ejecutarse a cualquier nivel y teniendo como alcance diferentes atributos y

objetivos de los sistemas *cloud*. Un ejemplo de esto es Chaos Machine, una herramienta para generar y falsificar excepciones para tratar de invalidar hipótesis en programas escritos en Java corriendo en producción. Entre sus reportes puede indicar qué bloques de *try-catch* pueden ser críticos para el sistema o aquellos que necesitan mayor atención.

A continuación se listan algunas de las herramientas actuales que se emplean para realizar ingeniería del caos junto con sus características.

Tabla 1
Datos iniciales tomados de [19] y extendida con otras herramientas encontradas

Framework	Objetivo	Atributos	Capas
Chaos Kong	Regiones AWS	Disponibilidad	Red <i>cloud</i>
Chaos Gorilla	Zonas de AWS	Disponibilidad	Red <i>cloud</i>
Chaos Monkey	Microservicios	Disponibilidad	Instancias VM
Chaos Monkey - Spring Boot	Aplicaciones de Spring	Disponibilidad	Aplicaciones Rest, llamadas internas
Royal Chaos	Aplicaciones Java	Disponibilidad	JVM
Chaos toolkit	AWS, Azure, GCP y Kubernetes	Disponibilidad	Cloud y Kubernetes
ChaosSlingr	AWS	Seguridad	Servicios <i>cloud</i>
CloudStrike	AWS & GCP	Seguridad	Servicios <i>cloud</i>
Doctor	CPU y memoria	Disponibilidad	Hardware
Chaos Machine	Aplicaciones Java	Disponibilidad	Excepciones JVM
Chaos Orca	Docker	Disponibilidad	Contenedor
Pumba	Docker	Disponibilidad	Contenedor

ADOPCIÓN Y EVOLUCIÓN DE LA INGENIERÍA DEL CAOS

¿Por qué deberíamos hacer ingeniería del caos? ¿Es bueno hacer ingeniería del caos? La principal diferencia entre ingeniería del caos y las pruebas de errores es que la ingeniería del caos es una práctica experimental que busca generar conocimiento sobre un sistema; por el contrario, las pruebas de errores buscan hacer pruebas muy específicas de una condición o propiedad [9]. Sin embargo, realizar experimentación en ambientes pro-

ductivos no es algo que un CEO o cualquier *stakeholder* desearía de primera mano. En estos casos, es bueno revisar el impacto económico que podría generar en una empresa hacer ingeniería del caos.

No es difícil llegar a imaginar la gran cantidad de dinero que pueden perder importantes compañías por fallas en servicios críticos. Por este motivo, realizar ingeniería del caos con un radio de “explosión” controlado genera seguridad en los sistemas, siempre y cuando esto se ejecute correctamente; el retorno de la inversión (ROI) se vería incrementado [26], e incluso se han propuesto modelos para calcular el ahorro de dinero que podría tener una compañía comparando el costo de una falla controlada (al menos con un impacto calculado) con una falla inesperada.

$$\begin{aligned} \text{ROI} &= \frac{\text{beneficios} - \text{costos}}{\text{beneficios}} \\ &= \frac{C(U) - C(U') - E}{C(H) + E} \end{aligned}$$

C(U): costo de todas las fallas, sin usar ingeniería de caos

C(U'): costo de todas las fallas, usando ingeniería de caos

C(H): costo de las fallas inyectadas con ingeniería de caos

E: Esfuerzo de implementar ingeniería de caos

Empleando datos históricos es posible llegar a estimar qué tanto impacto puede tener realizar ingeniería del caos en una compañía [26].

No obstante, la ingeniería del caos no es la única forma de probar la resiliencia de un sistema; existen otras prácticas, como el Game Day [27], evento creado por Amazon para probar sus sistemas días antes del famoso Prime Day. La ingeniería del caos es un complemento a esta práctica; la única diferencia es que no es un evento único al año para ejecutar pruebas o fallos manualmente, sino más bien una actividad que debe convertirse en algo automatizado y periódico [28].

Muchas compañías no ejecutan ingeniería del caos o Game Day por miedo al impacto que esto pueda tener en la producción del día; esto es algo supremamente válido, pero este miedo debe ser convertido en el motivo de las empresas para promover el desarrollo de sistemas resilientes. Una forma de entrenar el sistema inmune es usando vacunas que enseñan a nuestro sistema a

defenderse de entidades que pueden hacernos daño; ese mismo concepto puede aplicarse a la hora de justificar la ingeniería del caos en sistemas productivos. Es una forma de aprender a recuperarse.

Conferencias profesionales se han creado alrededor de la ingeniería del caos, como la conferencia “Grea” o la “Chaos Conf”; en estos eventos se discuten temas desde la explicación de los principios hasta las experiencia de grandes compañías, incursionando en la práctica de la ingeniería del caos. Exingenieros de Netflix, como Kolton Andrus y su equipo, han contribuido activamente a la ingeniería del caos. Kolton es CEO de Gremlin y es reconocido por las contribuciones que ha hecho a esta área [25].

CONCLUSIONES Y TRABAJO EN EL FUTURO

Cualquier organización que desee operar un sistema distribuido con una velocidad de desarrollo bastante rápida debe usar ingeniería del caos para mejorar la resiliencia del sistema. La ingeniería del caos se debería considerar una actividad más en el ciclo de desarrollo de *software*, tales como pruebas unitarias, pruebas de integración o pruebas de regresión.

Las experiencias documentadas por compañías que están aplicando ingeniería del caos son muy valiosas; al ser una práctica que genera riesgo y tener un impacto negativo en el sistema, es muy importante conocer cómo otras empresas lo están haciendo, qué procedimientos y medidas se están aplicando para minimizar el riesgo. Los resultados han mostrado que la ingeniería del caos sí mejora la resiliencia de un sistema; la observabilidad, como punto clave, ayuda a detectar fallos que no se habrían evidenciado hasta que un grupo de usuarios se encontraran con ellos. Esto hace que los procesos de corrección y ajuste del sistema se efectúen de manera más rápida y temprana, y que la resiliencia aumente al mismo ritmo al que se desarrollan nuevos componentes del sistema. Integrar pruebas automatizadas de ingeniería del caos en sistemas distribuidos ayuda a proteger el sistema de fallos inesperados por cambios en el sistema y, al mismo tiempo, sirve para mantener los estándares de resiliencia.

La adopción de la ingeniería del caos en el sector industrial aún está en una etapa muy temprana; pese a que esta práctica se originó y formalizó desde el 2010, sólo grandes compañías con sistemas críticos la han

comenzado a adoptar. El futuro de la ingeniería del caos todavía es muy grande, pues cada vez habrá más y más sistemas complejos que necesitarán mitigar sus riesgos y errores con mayor frecuencia. Se requiere que esta práctica sea reconocida en el ámbito mundial como un rol clave dentro de cualquier proyecto de ingeniería.

El cambio cultural en los equipos de desarrollo es un punto que hay que tener en cuenta para el futuro de la aplicación de ingeniería del caos a escala global; es una práctica que no se encuentra en los estándares ni en las metodologías más empleadas en el desarrollo de *software*. Alrededor de la comunidad de ingeniería de *software* y arquitectos de *software* hay una alta adopción; existen eventos dedicados a la ingeniería del caos y en muchas conferencias de arquitectura ya el tema está constantemente presente.

Existen varios ecosistemas en los que la ingeniería del caos tiene muchas oportunidades. Un ejemplo de esto son los sistemas ciberfísicos. Esta área es un campo fértil para aplicar ingeniería del caos. Una de las barreras que hay en esta área, que requiere una investigación más profunda, es cómo ejecutar pruebas de caos sin lastimar físicamente a las personas involucradas en estos sistemas. Se requiere pensar en una forma de separar las funciones del sistema ciberfísico y el riesgo que puede llevar a hacer caos de este tipo en esos sistemas [24].

El área de la seguridad informática también es un campo de acción para la ingeniería del caos; actualmente, hay avances en esta área [19], pero sin duda muchas de las herramientas ya creadas están enfocadas en probar patrones de resiliencia, mas no políticas ni fallos en la seguridad del sistema. Este es un nicho con mucho trabajo aún por desarrollar.

Las soluciones orientadas a la salud también se pueden ver beneficiadas por esta práctica. Ya hay casos de ingeniería del caos para probar sistemas de redes neuronales recurrentes [29]. Otro caso son los sistemas financieros, en los que se inyectan predicciones al sistema sobre posibles cambios en los mercados para estudiar la forma en que se comportaría el sistema y sus individuos [30]. Hay propuestas para detectar las oportunidades para continuar explorando esta práctica están abiertas. La ingeniería del caos es relativamente joven y tiene todo un mundo y escenario donde aplicarse, siempre tomando en cuenta los riesgos y el impacto que esto pueda tener.

El presente artículo es producto del trabajo del autor como estudiante de la Maestría en Informática, en el desarrollo de la asignatura Nuevas Tecnologías de la Información, a cargo de la ingeniera Claudia Patricia Santiago Cely.

REFERENCIAS

- [1] Naik, S. & Tripathy, P. *Software Testing and Quality Assurance: Theory and Practice*. John Wiley and Sons.
- [2] ITIC. Posts. One Hour of Downtime Costs. \$100K for 95 % of Enterprises. *Itic-corp.com*, 2020 [online]. Disponible en <https://itic-corp.com/blog/2013/07/one-hour-of-downtime-costs-100k-for-95-of-enterprises/>.
- [3] Uday, P. & Marais, K. Designing Resilient Systems-of-Systems: A Survey of Metrics, Methods & Challenges. *Systems Engineering*, 18 (5), 491-510, 2015. Disponible en 10.1002/sys.21325.
- [4] Van Steen, M. & Tanenbaum, (2017). *Distributed Systems* (3rd ed.). CreateSpace Independent Publishing Platform, 978-1543057386.
- [5], [9] Resilient communication. Docs.microsoft.com, 2020 [online]. Disponible en <https://docs.microsoft.com/en-us/dotnet/architecture/cloud-native/resilient-communications>.
- [6] Izrailevsky, Y. & Bell, C. Cloud Reliability", *IEEE Cloud Computing*, vol. 5, no. 3, pp. 39-44, 2018. Disponible en 10.1109/mcc.2018.032591615.
- [7] Heorhiadi, V., Rajagopalan, S., Jamjoom, ,Reiter & Sekar, V. (2016). Gremlin: Systematic Resilience Testing of Microservices. *2016 IEEE 36th International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS)*. Disponible en 10.1109/icdcs.2016.11.
- [8] Basiri, A. et al. (2016). Chaos Engineering. *IEEE Software*, 33 (3), 35-41. Disponible en 10.1109/ms.2016.60.
- [9] Lenka, R., Padhi, S. & Nayak, K. (2018). Fault Injection Techniques - A Brief Review. *2018 International Conference on Advances in Computing, Communication Control and Networking (ICACCCN)*. Disponible en 10.1109/icacccn.2018.8748585.
- [10] Principles of chaos engineering. *Principlesofchaos.org*, 2020 [online]. Disponible en <https://principlesofchaos.org/>.
- [11] Allspaw, J. (2012). Fault injection in production. *Communications of the ACM*, 55, (10), 48-52, 2012. Disponible en 10.1145/2347736.2347751.
- [12] Inside Azure Search: Chaos Engineering. *Azure.microsoft.com*, 2020 [online]. Disponible en <https://azure.microsoft.com/en-us/blog/inside-azure-search-chaos-engineering/>.
- [13] Clients > Overview | Gremlin Docs. Gremlin.com, 2020 [online]. Disponible en <https://www.gremlin.com/docs/clients/overview/>.
- [14] Roy, A., Hongyi Zeng, J., Bagga, J. & Snoeren, (2017). Passive Realtime Datacenter Fault Detection and Localization. *Usenix*, 14, 602.
- [15] Sverdluk, Y. (2020). Facebook Turned Off Entire Data Center to Test Resiliency. *Data Center Knowledge* [online]. Disponible en <https://www.datacenterknowledge.com/archives/2014/09/15/facebook-turned-off-entire-data-center-to-test-resiliency>.
- [18] Nagarajan, A. & Vaddadi, A. (2016). Automated Fault-Tolerance Testing. *2016 IEEE Ninth International Conference on Software Testing, Verification and Validation Workshops (ICSTW)*, 2016. Disponible en 10.1109/icstw.2016.34.
- [19] Torkura, K., Sukmana, M., Cheng, F. & Meinel, C. (2020). CloudStrike: Chaos Engineering for Security and Resiliency in

- Cloud Infrastructure. *IEEE Access*, 8, 123044-123060. Disponible en 10.1109/access.2020.3007338.
- [20] Villano, U., Rak, M., De Benedictis, A. & Casola, V. (2020). A Methodology for Automated Penetration Testing of Cloud Applications. *International Journal of Grid and Utility Computing*, 11 (2), 267. Disponible en 10.1504/ijguc.2020.10026556.
- [21] Charity Majors: Closing the Loop on Chaos with Observability - Chaos Conf 2018. Gremlin.com, 2020 [online]. Disponible en <https://www.gremlin.com/blog/charity-majors-closing-the-loop-on-chaos-with-observability-chaos-conf-2018/>.
- [22] G. Communications (2020). Flight control breakthrough could lead to safer air travel. Grainger.illinois.edu [online]. Disponible en <https://grainger.illinois.edu/news/10817>.
- [23] Simonsson, J. & Zhang, L., Morin, B., Baudry, B. & Monperrus, M. (2019). Observability and Chaos Engineering on System Calls for Containerized Applications in DockerCoRR, abs/1907.13039.
- [24] Rosenthal, C., Aschbacher, N. & Jones, N. (2020). Chaos Engineering: System Resiliency in Practice. O'Reilly Media, Incorporated. URL: <https://books.google.de/books?id=UxuFxAEACAAJ>.
- [25] Kesim, D. Assessing resilience of software systems by the application of chaos engineering: a case study. Dx.doi.org, 2020 [online]. Disponible en <http://dx.doi.org/10.18419/opus-10901>.
- [26] Tucker, H., Hochstein, L., Jones, N., Basiri, A. & Rosenthal, C. (2018). The Business Case for Chaos Engineering. *IEEE Cloud Computing*, 5 (3), 45-54. Disponible en 10.1109/mcc.2018.032591616.
- [27] Shelly, N., Tschaen, B., Förster, K., Chang, M., Benson, T. & Vanbever, L. Destroying networks for fun (and profit). *Proceedings of the 14th ACM Workshop on Hot Topics in Networks-HotNets-XIV*, 2015. Disponible en 10.1145/2834050.2834099.
- [28] Hole, K. & Otterstad, C. (2019). Software Systems with Antifragility to Downtime. *Computer*, 52 (2), 23-31.
- [29] Przystałka, P. & Moczulski, W. (2015). Methodology of neural modelling in fault detection with the use of chaos engineering. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 41, 25-40. Disponible en 10.1016/j.engappai.2015.01.016.
- [30] Klioutchnikov, I., Sigova, M. & Beizerov, N. (2017). Chaos Theory in Finance. *Procedia Computer Science*, 119, 368-375. Disponible en 10.1016/j.procs.2017.11.196.
- [31] Miles, R. (2019). *Learning Chaos Engineering: Discovering and Overcoming System Weaknesses Through Experimentation*. O'Reilly Media.
- [32] Azure-Event-Driven Architecture in the Cloud with Azure Event Grid. Docs.microsoft.com, 2020 [online]. Disponible en <https://docs.microsoft.com/en-us/archive/msdn-magazine/2018/february/azure-event-driven-architecture-in-the-cloud-with-azure-event-grid>.
- [33] What is Event-driven Architecture?, 2020 [online]. Disponible en <https://www.tibco.com/reference-center/what-is-event-driven-architecture>.

Evaluación del consumo energético de un vehículo eléctrico en la ciudad de Bogotá

Evaluation of the energy consumption of an electric vehicle in the city of Bogotá

SEBASTIÁN TORRES FRANCO¹ - MÓNICA MARCELA SUÁREZ PRADILLA² -
IVÁN CAMILO DURÁN TOVAR³ - AGUSTÍN RAFAEL MARULANDA GUERRA⁴

1. Magíster en Ingeniería Eléctrica, profesor de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
2. Doctora en Gestión y Valoración Urbana, profesora asistente del programa de Ingeniería Civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
3. Doctor en Ingeniería Eléctrica, profesor asistente del programa de Ingeniería Eléctrica de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
4. Doctor en Ingeniería Eléctrica, profesor asociado del programa de Ingeniería Eléctrica de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

sebastian.torres@escuelaing.edu.co - monica.suarez@escuelaing.edu.co - ivan.duran@escuelaing.edu.co -
agustin.marulanda@escuelaing.edu.co

Recibido: 03/04/2020 Aceptado: 27/06/2020

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

Resumen

El crecimiento de la flota de vehículos eléctricos (EV, por su sigla en inglés) en el espacio urbano es un desafío para los planificadores de ciudad y transporte. Particularmente, caracterizar los desplazamientos en función de la duración de la carga del vehículo requiere evaluar los hábitos de conducción de los usuarios y las condiciones de tránsito local que puedan afectar el consumo energético.

Con el objetivo de contribuir a la caracterización del consumo energético de EV en el contexto local, a lo largo de este artículo se presenta la implementación de un modelo de consumo energético considerando el comportamiento del tránsito en una autopista en la ciudad de Bogotá, D.C.

Para la implementación del modelo se hicieron mediciones instantáneas de perfiles de velocidad, aceleración y ángulos de inclinación mediante aplicativos GPS, en un periodo de una semana. Los resultados indican que, en las condiciones de tránsito normal en las rutas de estudio, el consumo energético de los EV puede superar sustancialmente el consumo promedio especificado para los vehículos. Sin embargo, las condiciones operativas de este tipo de vehículos aportan grandes beneficios ambientales y su consumo energético es muy bajo en situaciones de congestión vehicular.

Palabras claves: vehículos eléctricos, estado de carga, freno regenerativo, modelo de consumo energético.

Abstract

The growth of the electric vehicle (EV) fleet at the urban level is a challenge for city and transportation planners. Characterizing trips in terms of vehicle charging duration requires assessing users' driving habits and local traffic conditions that may affect energy consumption. With the objective of contributing to the characterization of EV energy consumption in the local context, this article presents the implementation of an energy consumption model considering the traffic behavior on a highway in the city of Bogotá, D.C.

For the implementation of the model, instantaneous measurements of speed profiles, acceleration and slopes' angles were made using GPS applications over a period of one week. The results indicate that, under normal traffic conditions on the study routes, the energy consumption of EV can substantially exceed the average consumption specified for vehicles. However, the operating conditions of this type of vehicles provide great environmental benefits and their energy consumption is very low under traffic congestion.

Keywords: electric vehicles, state of charge, regenerative brake, energy consumption model.

INTRODUCCIÓN

El constante esfuerzo mundial por reducir las emisiones de gases de efecto invernadero ha llevado a un mayor aprovechamiento de las energías renovables no convencionales y a lograr avances en el desarrollo de tecnologías sostenibles.

Los modos de transporte representan la segunda fuente de emisión de gases de efecto invernadero en el mundo, ya que generan cerca de 8,08 Gton de CO₂ y otros contaminantes, anualmente (IEA, 2020a). Así, las nuevas tendencias energéticas sitúan al vehículo eléctrico como una herramienta eficaz para empezar a controlar las emisiones de gases de efecto invernadero y contribuir a mitigar el cambio climático.

Actualmente, hay cerca de cinco millones de unidades de vehículos eléctricos (EV, por su sigla en inglés) a escala mundial (IEA, 2020b) y se espera que la flota se incremente en los próximos años. Los factores que inciden en el crecimiento de la actual flota son de tipo ambiental, económico (relacionados con su mantenimiento) y de desempeño (aquellos que están en función de la eficiencia del motor), especialmente.

De acuerdo con Yong, Ramachandaramurthy, Tan, Mithulanathan (2015), el vehículo eléctrico supera al tradicional vehículo de combustible en situaciones de alta congestión de tráfico y, por lo tanto, es más sostenible. En Colombia, el censo de EV del año 2020 muestra que existen 2521 unidades, que corresponden a un incremento del 80,6 % respecto al año 2019, de los cuales un 30 % son vehículos enchufables (Vera & Marulanda, 2019; Andemos, 2020).

Desde otra perspectiva, la adopción de EV ha abierto nuevas oportunidades de mercado y posibilidades tecnológicas, al tiempo que ha generado grandes retos comerciales, de ingeniería y de políticas de regulación. Las investigaciones que se han desarrollado en este campo están enfocadas en identificar los efectos sobre las redes eléctricas, la localización óptima de infraestructura pública de carga y la optimización de la energía de su batería con fines de venta (Xiao, Huimei, Chen & Hongjun, 2014; Yong et al., 2015).

No obstante, para lograr una integración completa de EV en los diferentes niveles de la infraestructura económica y tecnológica a escala mundial, es necesario caracterizar el comportamiento de los usuarios en materia del consumo energético y el comportamiento de carga. Esto se debe principalmente a que los EV utilizan

cargadores que se pueden instalar en redes eléctricas de baja y media tensión, lo cual desagrega la demanda centralizada de las estaciones de combustible convencionales, y permite que los EV se puedan recargar en residencias domésticas, centros comerciales o instalaciones empresariales. De esta manera, en un escenario ideal, los usuarios de EV pueden cargar sus vehículos cuando y donde quieran (Quirós-Tortós, Ochoa & Lees, 2015; Dang, 2018).

Esta situación genera incertidumbre respecto a las franjas horarias de conexión de los vehículos, el tiempo de carga y las ubicaciones urbanas de mayor demanda. Las investigaciones realizadas muestran que para caracterizar el comportamiento de los usuarios se deben utilizar modelos de tipo estocástico o probabilístico. En la actualidad, un número significativo de estudios se ha concentrado en el desarrollo de metodologías y modelos que puedan representar este comportamiento. Mediante estos trabajos, se ha identificado que el estado de carga de la batería (SoC, por su sigla en inglés, que se expresa como porcentaje de la capacidad de la batería) y el consumo energético causado por la utilización del vehículo son aspectos fundamentales que hay que tener en cuenta al momento de modelar la interacción de los EV con las redes eléctricas y el comportamiento de los usuarios.

Considerando que el comportamiento puede variar, dependiendo del país, las condiciones climáticas, el parque automotor, o incluso de factores culturales, los resultados no se pueden generalizar. Sin embargo, las técnicas de modelación empleadas en los casos de estudio se pueden reproducir utilizando las características locales de las regiones particulares para obtener resultados realistas (Quirós-Tortós et al., 2015; (Wang, Wang, Qiu, Chu & Gadh, 2018).

Existen varios modelos para evaluar el consumo energético de un EV. Por ejemplo, los modelos de base probabilística evalúan el comportamiento de un volumen considerable de EV, para modelar sus parámetros aleatorios mediante *funciones de densidad de probabilidad* (Quirós-Tortós et al., 2015; Mendoza, Quintero, Santamaría & Alarcón, 2016).

Otros estudios dedicados a estimar el impacto de los cargadores sobre la red eléctrica utilizan un modelo simplificado, en el que se describe como una relación lineal el rendimiento promedio de la batería de consumo del vehículo (Rezaee, Farjah & Khorramdel, 2013). Por

otro lado, los modelos basados en el cálculo de potencias mecánicas y eléctricas utilizan las especificaciones técnicas del vehículo, junto a mediciones de su desempeño mecánico y eléctrico para calcular el consumo energético de la batería, en función de la velocidad y la aceleración (Tanaka, Ashida & Minami, 2008; Fiori, Ahn & Rakha, 2016; Fiori & Marzano, 2018).

Con el objetivo de aportar al entendimiento del comportamiento estocástico de los EV en el contexto local, en este artículo se presenta un estudio del consumo energético de un vehículo eléctrico en condiciones de tránsito normal en una autopista de la ciudad de Bogotá, D.C. Se aplica un modelo de consumo de potencia eléctrica, el cual utiliza mediciones instantáneas de velocidad y aceleración. Las mediciones se hacen durante distintas franjas horarias y en diversos sentidos de la vía, con la intención de verificar cómo estos factores pueden afectar el consumo del vehículo.

El contenido restante del artículo se estructura de la siguiente manera: primero se presenta la metodología de trabajo para la evaluación del consumo energético, posteriormente se analiza el caso de estudio, luego se describen los resultados y, finalmente, se dan las conclusiones y se discuten los aportes hechos.

METODOLOGÍA

En este trabajo se ha adoptado el enfoque de los modelos basados en el cálculo de potencias, debido a que proporcionan resultados confiables sin la necesidad de una población de pruebas compuesta por EV. La metodología general de estos modelos se ilustra más adelante (figura 1).

La finalidad de la metodología consiste en calcular el consumo de energía eléctrica (E) de la batería a partir del consumo mecánico de potencia (P_m) ocasionado por el movimiento del vehículo. Para esto, primero se identifica el vehículo que se va a utilizar y se obtienen las especificaciones correspondientes para conocer cómo varía su consumo energético, en función del peso, la eficiencia del motor, la eficiencia de la batería, etc.

Posteriormente, se calcula la potencia instantánea mecánica desarrollada por el motor eléctrico del EV, para lo cual es necesario disponer de los perfiles de velocidad con respecto al tiempo, $v(t)$, y aceleración con respecto al tiempo, $a(t)$, en todo el recorrido del vehículo. Esta potencia mecánica se debe convertir a

su equivalente en potencia eléctrica para determinar la energía demandada de la batería del vehículo, proceso que se puede llevar a cabo mediante técnicas rigurosas, como el cálculo de la demanda de corriente por parte del motor, o mediante el uso de eficiencias promedio.

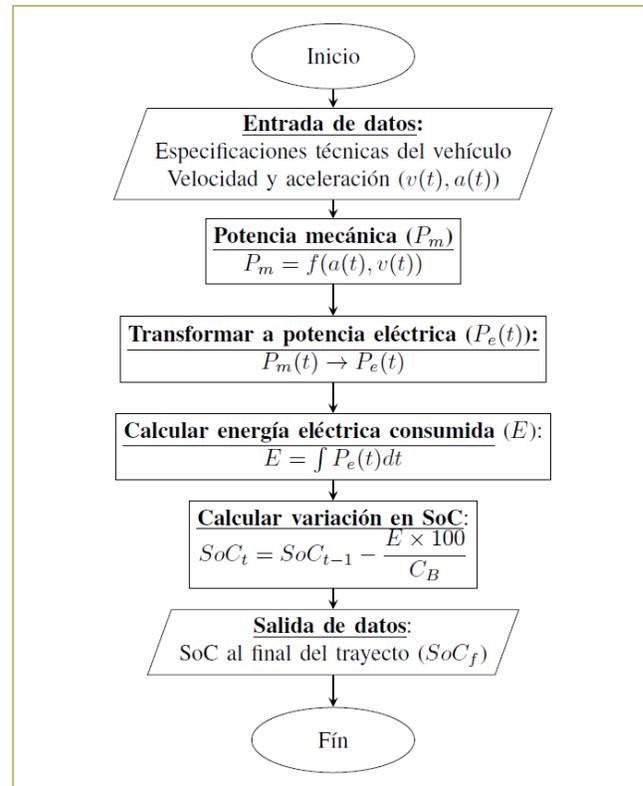


Figura 1. Metodología general de modelos de consumo de potencia.

Finalmente, se calcula la demanda energética (E) integrando la demanda de potencia eléctrica en intervalos de tiempo para calcular la variación en el SoC de la batería. Es importante señalar que esta variación no depende únicamente de las características físicas del vehículo, sino también de la capacidad energética de la batería; de esta manera, baterías con capacidades energéticas más altas experimentarán menores variaciones en su estado de carga.

CASO DE ESTUDIO

A continuación, se describe la implementación del modelo de consumo de potencia utilizado, la selección de rutas tomadas como objetivo de estudio y, finalmente, el proceso de medición llevado a cabo para la caracte-

rización de los perfiles de velocidad y aceleración en condiciones reales de tráfico.

1. Implementación del modelo de consumo

En este artículo se ha implementado el modelo presentado en Fiori et al. (2016), en el cual no solo se considera la variación negativa del SoC por el desplazamiento del vehículo, sino que también incluye las variaciones positivas que resultan del uso del freno regenerativo.

Por otro lado, en el modelo se consideran cuatro eficiencias principales dentro del vehículo: la eficiencia del eje de transmisión, la eficiencia del motor, la eficiencia del freno regenerativo y, finalmente, la eficiencia de las baterías, presentando estos rendimientos como factores constantes. De acuerdo con lo anterior, para calcular la demanda energética de la batería se requiere partir de la caracterización de la potencia que el EV desarrolla por su movimiento, y escalar de forma lineal este valor utilizando las eficiencias que intervienen en la transmisión energética de las baterías a las llantas del vehículo, proceso que se esquematiza a renglón seguido (figura 2).

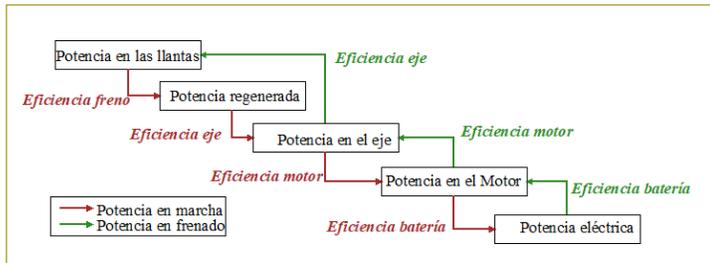


Figura 2. Flujos de potencia durante frenado y marcha del EV.

Nótese que para aquellos momentos en los cuales se emplee el freno regenerativo, la potencia eléctrica tendrá un valor negativo y se verá afectada por la eficiencia del freno.

De las potencias anteriores, la potencia en las llantas del EV (P_w) se puede calcular mediante la ecuación (1).

$$P_w = (m \cdot a(t) + m \cdot g \cdot \cos(\theta)) \cdot \frac{C_r}{1000} (c_1 v(t) + c_2) + \frac{1}{2} \rho_{\text{aire}} \cdot A_f \cdot C_D v^2(t) + m \cdot g \cdot \sin(\theta)) \cdot v(t) \quad (1)$$

Donde m es la masa total del vehículo y los pasajeros medida en $[kg]$, $a(t)$ es la aceleración del vehículo en el instante t , medida en $[m/s^2]$. La inclinación de la vía se representa por θ . Las constantes C_r , c_1 y c_2 están asociadas a la resistencia de la superficie del terreno y del material de las llantas. La velocidad instantánea del vehículo corresponde a la expresión $v(t)$, medida en $[m/s]$; la densidad del aire a la altura de estudio se indica por ρ_{aire} , medida en $[kg/m^3]$; A_f corresponde al área frontal del vehículo, medida en $[m^2]$; g es la gravedad medida en $[m/s^2]$ y, finalmente, C_D es el coeficiente de arrastre del vehículo.

Una vez calculada la potencia desarrollada en las llantas del vehículo se puede determinar la potencia mecánica demandada por éste, usando las eficiencias del eje de transmisión y la eficiencia eléctrica del motor, como se muestra a continuación (2).

$$P_m = \frac{P_w}{\eta_t \cdot \eta_m} \quad (2)$$

Donde η_t es la eficiencia del eje de transmisión y η_m es la eficiencia eléctrica del motor.

Finalmente, es posible determinar la potencia eléctrica demandada de la batería (P_e) a partir de la eficiencia del sistema de almacenamiento mediante la ecuación (3). Como se mencionó con anterioridad, durante el uso del freno regenerativo el sentido del flujo de energía es inverso y se ve afectado por la eficiencia del freno regenerativo.

$$P_e(t) = \begin{cases} \frac{P_m}{\eta_B} & \text{si } a(t) > 0 \\ \frac{P_m}{\eta_F \cdot \eta_B} & \text{si } a(t) < 0 \end{cases} \quad (3)$$

Donde η_B es la eficiencia de la batería del vehículo y η_F es la eficiencia del freno regenerativo, que se puede obtener mediante la ecuación (4).

$$\eta_F = \begin{cases} \left(e^{\frac{\alpha}{|a(t)|}} \right) & \text{si } a(t) < 0 \\ 0 & \text{si } a(t) > 0 \end{cases} \quad (4)$$

Finalmente, se calcula la variación en el SoC a partir de la siguiente ecuación:

$$SoC_t = SoC_{t-1} - \frac{P_{cons}}{3600 \cdot C_B} \quad (5)$$

También es posible averiguar el consumo promedio del vehículo para las rutas estudiadas, relacionando su consumo energético con la distancia (6).

$$CE = \frac{\sum_{t=t_0}^{t=t_f} P_c(t) \cdot \Delta t}{3600 \cdot d} \quad (6)$$

Donde CE es el consumo energético del vehículo medido en $[Wh/km]$, y d es la distancia recorrida en kilómetros durante el intervalo de tiempo.

El vehículo tomado como sujeto de estudio en este artículo es el Nissan Leaf 2015, para el cual se sugieren los valores de constantes empíricas que se muestran más adelante (tabla 1) (De Gennaro, Paffumi, Martini, Manfredi, Vianelli, Ortenzi & Genovese, 2015; Fiori et al., 2016).

Tabla 1

Valores de coeficientes para el caso de estudio

Coefficientes	Valor	Coefficientes	Valor
m [kg]	1640	η_{eje}	0,92
C_r	1,75	η_{me}	0,91
c_1	0,0328	η_{bat}	0,90
c_2	4,575	C_{bat} [kWh]	24,0
A_f	2,3316	α	0,411
C_0	0,28		

Adicionalmente, se consideró un consumo fijo asociado a sistemas auxiliares de $700 W$ por el consumo de sistemas auxiliares del vehículo.

2. Rutas de prueba y perfiles de velocidad y aceleración

El modelo se aplicó en condiciones de tránsito de un día normal de la ciudad de Bogotá, D.C., entre los puntos **A** y **B**, cursando trayectos que mezclan varias avenidas principales de la ciudad, en los cuales se midieron la ve-

locidad y la aceleración instantánea con una resolución de un segundo mediante la aplicación GPS Speed Pro durante un periodo de una semana (figura 3).

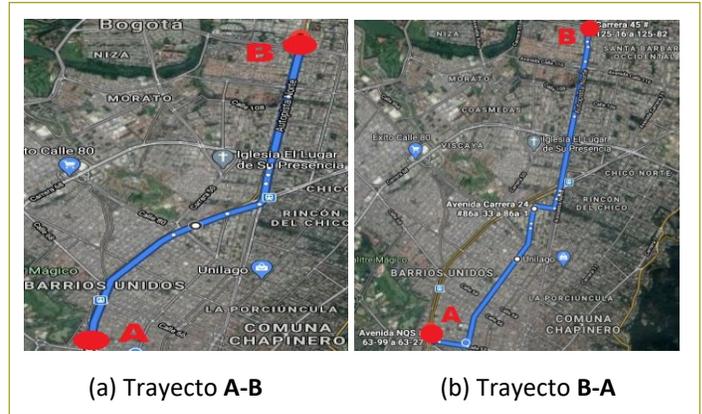


Figura 3. Trayectos de prueba seleccionados.

Los trayectos **A-B** se evaluaron entre las 7:00 y las 8:00 a.m., mientras que los trayectos de **B-A** se evaluaron entre las 5:00 y las 6:00 p.m. A continuación, se muestra el perfil de velocidad de las rutas para una de las mediciones realizadas (figura 4).



Figura 4. Perfiles de velocidad en las rutas de prueba.

RESULTADOS

En la figura siguiente se presentan el comportamiento del SoC y la velocidad del EV con respecto al tiempo, una vez implementado el modelo ya descrito para un grupo de mediciones de cada una de las rutas de prueba

(figura 5). Nótese que la variación del SoC de la batería al final del trayecto está aproximadamente en el rango de un 4 % de la capacidad de la batería, y que, a diferencia de los vehículos tradicionales de gasolina, los EV mantienen un consumo muy bajo de energía durante los periodos de baja velocidad. También es posible apreciar cómo el máximo consumo energético se produce en las condiciones de mayor velocidad, y que las situaciones de frenado más bruscas generan un mayor efecto regenerativo sobre la energía del vehículo.

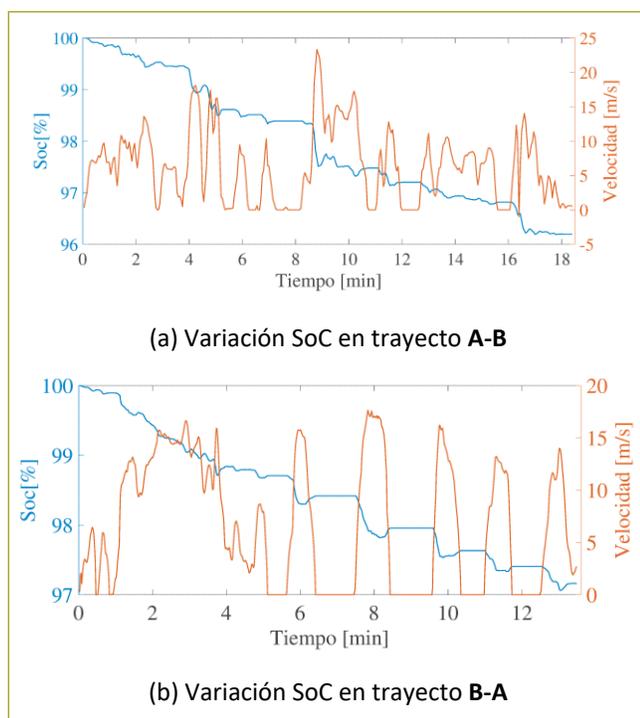


Figura 5. Variación del SoC en las rutas de pruebas.

Por otra parte, se ilustra la demanda de potencia activa para las anteriores rutas de estudio, en la que es posible notar cómo la demanda de potencia sigue un patrón casi idéntico, presentado por el de la aceleración (figura 6). Esto se debe principalmente a que los picos de demanda no se producen por situaciones de velocidad constante, sino cuando hay una condición de alto par.

Seguidamente, se presenta un resumen de los estadísticos obtenidos sobre la variación del SoC y el consumo energético del vehículo (tabla 2).

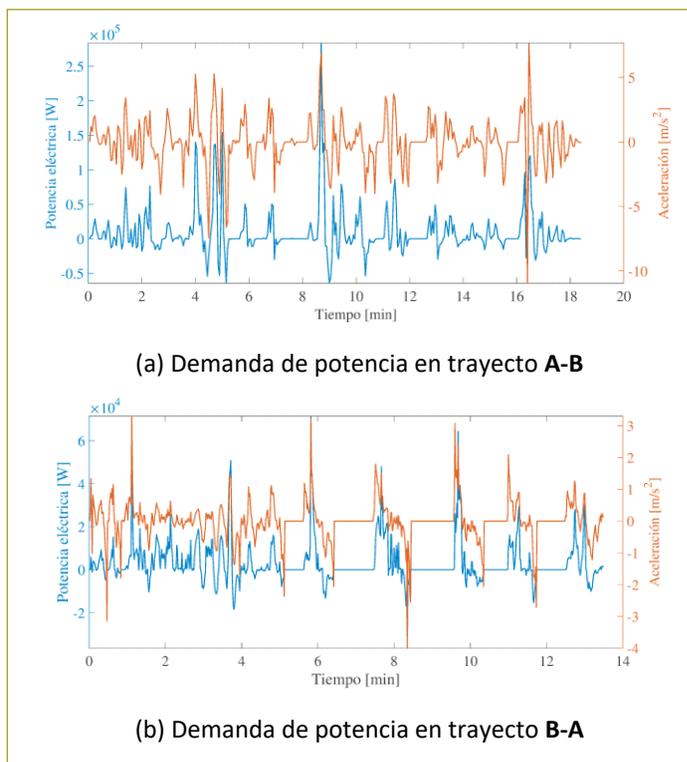


Figura 6. Demanda de potencia en las rutas de estudio.

Tabla 2

Resultados del modelo de consumo para el caso de estudio

Parámetro	Trayecto A-B	Trayecto B-A
Distancia [km]	7,37	5,64
Velocidad promedio ida [km/h]	20,3	25
Duración promedio del viaje [min]	20	19
Consumo promedio energético [Wh/]	188,89	183
Consumo mínimo energético [Wh/]	166	175
Consumo máximo energético [Wh/]	205	191
Variación promedio SoC [%]	-4,9	-5,6
Variación mínima SoC [%]	-4,3	-5,4
Variación máxima SoC [%]	-5,3	-5,9

Al comparar los resultados obtenidos con el consumo promedio nominal del EV de 165 [Wh/km], se encuentra que en las condiciones de tránsito local el consumo se incrementa en promedio un 20 %, lo cual indica que el número de posibles trayectos que el usuario puede recorrer disminuirá en este mismo valor.

CONCLUSIONES

Se implementó un modelo de consumo energético basado en el cálculo de potencias mecánicas y eléctricas para caracterizar la variación en el estado de carga de la batería de un EV en condiciones de tránsito en una autopista en Bogotá, D.C. Los resultados demuestran que con los perfiles de velocidad y aceleración locales el consumo energético promedio del EV tiende a ser sustancialmente más elevado que el indicado en fábrica.

Los resultados del caso de estudio señalan, de acuerdo con la variación promedio del estado de carga, que la capacidad de la batería tomada como parte del estudio es capaz de cubrir aproximadamente ocho trayectos de ida y vuelta antes de descargarse al 20 % de la capacidad de la batería.

Las condiciones de tránsito local pueden afectar sustancialmente el rendimiento nominal de un EV. Mientras que las condiciones más altas de velocidad generan el mayor consumo energético, los frenados más bruscos generan un efecto más cuantioso sobre la regeneración de energía. Por otro lado, a diferencia de los vehículos tradicionales de gasolina, situaciones de baja velocidad o estacionamiento no tienen un efecto significativo sobre el consumo de energía.

REFERENCIAS

- Asociación Nacional de Movilidad Sostenible (Andemos) (2020). *Informes híbridos y eléctricos 2020-2028*. Tomado de <https://www.andemos.org/index.php/2020/09/09/agosto-8/>.
- Dang, Q. (2018). *Electric vehicle (EV) charging management and relieve impacts in grids*. 9th IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), 1-5. DOI 10.1109/PEDG.2018.8447802.
- De Gennaro, M., Paffumi, E., Martini, G., Manfredi, U., Vianelli, S., Ortenzi, F. & Genovese, A. (2015). Experimental test campaign on a battery electric vehicle: laboratory test results (part 1). *SAE International Journal of Alternative Powertrains*, 4 (1), 1-16. DOI 10.4271/2015-01-1167.
- Fiori, C., Ahn, K. & Rakha, H. A. (2016). Power-based electric vehicle energy consumption model: model development and validation. *Applied Energy*, 168, 257-268. DOI 10.1016/j.apenergy.2016.01.097.
- Fiori, C. & Marzano, V. (2018). *Modelling energy consumption of electric freight vehicles in urban pickup/delivery operations: analysis and estimation on a real-world dataset*. *Transportation Research. Part D: Transport and Environment*. 65, 658-673. DOI 10.1016/j.trd.2018.09.020.
- International Energy Agency (IEA) (2020a). *CO₂ emissions from fuel combustion*. Tomado de <https://www.iea.org/subscribe-to-data-services/co2-emissions-statistics>.
- International Energy Agency (IEA) (2020b). *Global EV Outlook*. Tomado de <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2020>.
- Mendoza, C. C., Quintero, A. M., Santamaría, F. & Alarcón, J. A. (2016). Estimation of electric energy required by electric vehicles based on travelled distances in a residential zone. *Tecciencia*, 11(21), DOI 10.18180/tecciencia.2016.21.4.
- Quirós-Tortós, J., Ochoa, L. F. & Lees, B. (2015). *A statistical analysis of EV charging behavior in the UK*. 2015 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Latin America (ISGT Latam), 445-449. DOI 10.1109/ISGT-LA.2015.7381196.
- Rezaee, S., Farjah, E. & Khorramdel, B. (2013). Probabilistic analysis of plugin electric vehicles impact on electrical grid through homes and parking lots. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 4, 1024-1033. DOI 10.1109/TSTE.2013.2264498.
- Tanaka, D., Ashida, T. & Minami, S. (2008). An analytical method of EV velocity profile determination from the power consumption of electric vehicles. *2008 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 1-3. DOI 10.1109/VPPC.2008.4677742.
- Vera, C. D. y Marulanda, A. R. (2019). *Retos de los vehículos eléctricos en Colombia*. *Revista CIDET*, Vol. 21, pp. 69-76. Tomado de: <http://revista.cidet.org.co/revistas/revista-21/retos-de-los-vehiculos-electricos-en-colombia/>
- Wang, B., Wang, Y., Qiu, C., Chu, C., y Gadh, R. (2015). *Event-based electric vehicle scheduling considering random user behaviors*. 2015 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGrid-Comm). pp. 313-318. DOI 10.1109/SmartGridComm.2015.7436319.
- Xiao, H., Huimei, Y., Chen, W. y Hongjun, L., (2014), *A survey of influence of electric vehicle charging on power grid*. 9th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. pp. 121-126. DOI 10.1109/ICIEA.2014.6931143.
- Yong, J. Y., Ramachandaramurthy, V. K., Tan, K. M. & Mithulananthan, N. (2015). A review on the state-of-the-art technologies of electric vehicle. *Renewable and Sustainable Energy*, 49, 365-385. DOI 10.1016/j.rser.2015.04.130.

Corredores factibles para la implementación de tranvías en la ciudad de Bogotá

Feasible corridors for implementing streetcars in Bogotá

IVÁN CAMILO BARAHONA RODRÍGUEZ¹ - SANTIAGO HENAO-PÉREZ²

1. Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Tránsito y Transporte.
2. Director del Centro de Estudios de Vías y Transporte.

ivan.barahona@escuelaing.edu.co - santiago.henao@escuelaing.edu.co

Recibido: 10/04/2020 Aceptado: 27/06/2020

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

Resumen

Desde el año 2000 funciona en Bogotá el sistema de buses articulados conocido como Transmilenio, un sistema que se esperaba que cubriera el 80 % de la ciudad para el año 2016; sin embargo, en el 2020 no ha llegado ni a la mitad de dicho objetivo, además de que los pasajeros están migrando a otro tipo de sistemas, dado el bajo nivel de servicio que presta en horas de alta demanda. En este estudio se determinaron los corredores de la ciudad por los cuales es factible implementar un sistema de transporte público tipo tranvía, que permita atender la demanda insatisfecha y completar la red de transporte público. El análisis se hizo mediante un modelo de asignación para determinar la demanda de los corredores que se pueden cubrir con este tipo de sistemas; luego, sobre los corredores con la demanda suficiente para atenderlos con tranvía, se hizo un análisis de las características físicas con las que cuentan para determinar si es factible la implementación de un sistema férreo de este tipo. Como resultado, cinco corredores de la ciudad cumplieron con las condiciones de demanda e infraestructura para plantear una solución de transporte basada en tranvía.

Palabras claves: demanda de transporte, infraestructura de transporte, transporte público, modelo de asignación, ferrocarriles metropolitanos.

Abstract

Since 2000, the rapid mass transit system known as Transmilenio has been in operation in Bogotá; this system was expected to cover 80% of the city by 2016. However, by 2020, it had not reached half of that projected goal and passengers are migrating to other means of transportation as Transmilenio does not manage to cover peak hours' demands. This study determined the city corridors through which a light rail (streetcar) system can be implemented, which allows to meet the unsatisfied demand and complete the public transport system. The analysis was made through an allocation model to determine each corridor demand which can be covered with these types of system; then, on those corridors with enough demand for a light rail system, a physical characteristics analysis was performed to establish how feasible such a system would be. As a result of this study, five corridors in the city met the demand and infrastructure conditions to set up a transportation solution based on a streetcar.

Keywords: transportation demand, transportation infrastructure, public transportation, allocation model, metropolitan light rails.

INTRODUCCIÓN

En razón de la necesidad de buscar opciones para completar la red de transporte público de la ciudad de Bogotá, surge la pregunta de si es factible implementar un sistema de transporte público de pasajeros tipo tranvía en la ciudad de Bogotá, considerando las bondades que éste puede ofrecer en comparación con otros sistemas de mayor capacidad, como el metro. Por tal motivo, se requiere hacer un análisis general de las condiciones físicas y de demanda de transporte con las que cuentan los corredores viales de la ciudad, para así determinar en cuáles de éstos es factible la implantación de un sistema de mediana capacidad, como el tranvía.

Resulta pertinente describir los elementos particulares que caracterizan a estos sistemas en comparación con otros modos de transporte público, especialmente la capacidad de transporte. Además, hay que contextualizar la jerarquización que se les ha dado a todas las vías de la ciudad en función de la capacidad teórica que éstas deben tener para movilizar personas, con el propósito de establecer en forma preliminar aquellos que hay que considerar en el análisis de demanda, la cual se determina mediante un modelo de asignación que permita proyectar los viajes en transporte público al año 2040. De esta modelación, se eligen los corredores con la demanda justa para atenderla por medio de sistemas de tipo tranvía de mediana capacidad.

En este artículo se busca hacer una selección de corredores factibles para implementar un tranvía fundamentado únicamente en las características físicas y de demanda de éstos, con base en información pública de las entidades distritales. No se presentan diseños detallados de la infraestructura, ni tampoco se tiene en consideración el análisis económico o tarifario con el que debería contar el sistema propuesto.

METODOLOGÍA

En primer lugar, se describieron las particularidades del funcionamiento de los sistemas férreos urbanos: las formas de implantación, el funcionamiento operacional y las configuraciones del material rodante, para determinar cuáles combinaciones de los anteriores pueden resultar adecuadas para el contexto urbano de la ciudad de Bogotá. En segundo término, se analizaron las reservas viales incluidas en el Plan de Ordenamiento Territorial (POT) vigente para la ciudad, con el fin de

determinar la sección vial planificada, descartando aquellos en los cuales ya se ha implementado algún sistema de transporte masivo.

Dada la viabilidad de los corredores previamente seleccionados, utilizando los datos de generación y atracción de viajes de la Encuesta de Movilidad 2015, se construyó un modelo de asignación, el cual optimiza los tiempos de viaje de la red total de transporte público, restringiendo la capacidad de los corredores según la tecnología propuesta, con el propósito de calcular la demanda de transporte público para estos al año 2040 y determinar de esta forma los aquellos que cuentan con la demanda suficiente para estudiar la posibilidad de implementar sistemas tranviarios. (Institute for Transportation Development Policy, 2010).

Resultados

El tamaño de los coches no puede ser igual al de un ferrocarril convencional. Grandes marcas fabricantes de trenes tranviarios han optado por diseñar coches modulares con el propósito de aumentar la capacidad de los trenes cuando así sea necesario, incorporando nuevas secciones en las configuraciones existentes (Melis Maynar & González Fernández, 2008). A renglón seguido se observa la versatilidad que ofrecen los coches tranviarios en función de la configuración deseada (figura 1):



Figura 1. Configuraciones modulares de tranvías.

Fuente: Ferrocarriles Metropolitanos, Melis Maynar.

Según los sistemas de operación y configuración de los materiales rodantes en los modos de transporte, es posible establecer ciertos intervalos de capacidad en los que puede funcionar cada uno de ellos (figura 2). Éste resulta ser el elemento de mayor importancia a la hora de determinar el tipo de tecnología que se debe implementar en cualquier corredor de la ciudad, ya que la capacidad de ésta debe satisfacer completamente la demanda que, se espera, tenga el corredor en el año del proyecto. Para efectos del presente artículo, se considerará factible la implementación de tranvías en vías cuya demanda proyectada se encuentre entre los 10.000 y 19.000 pasajeros/hora/sentido.

Con el propósito de escoger el método más apropiado de asignación de viajes a la red, y teniendo como insumos la matriz origen-destino para transporte público en horas pico del año 2015, derivada de la encuesta de movilidad del mismo año, la red y los pasajeros reportados para cada una de sus troncales por el sistema Transmilenio (TransConsult, 2015), utilizando la herramienta TransCAD 7.0, se hicieron cuatro modelos de asignación, cuyos resultados se compararon con los volúmenes reportados por Transmilenio en las troncales que están en funcionamiento,

para determinar cuál de los métodos produce menos diferencia con los realmente encontrados en campo. A continuación se presentan los sistemas de transporte existentes y proyectados para la ciudad de Bogotá y su área de cobertura (figura 3):

El modelo seleccionado es el denominado “Sistema óptimo” (también conocido como equilibrio de los usuarios), con el que se busca minimizar el tiempo total de viaje de toda la red. Debe considerarse que, con la concepción de este método, ningún usuario puede cambiar de ruta sin aumentar el tiempo total de viaje en el sistema, aunque puede ser posible que disminuya sus propios tiempos de viaje (Molinero & Sánchez, 1998). En este modelo se puede decir que el costo total del sistema se minimiza cuando se les dice a los viajeros qué ruta tomar específicamente. En atención a las pocas posibilidades de elección de ruta que tiene un pasajero de transporte público, este método resultó aceptable para determinar la demanda de sistemas de transporte público.

Para expandir la matriz origen-destino se tuvo en cuenta el crecimiento normal de abordajes, tanto para Transmilenio como para el transporte colectivo SITP, reportado por la entidad para cada año en los que han

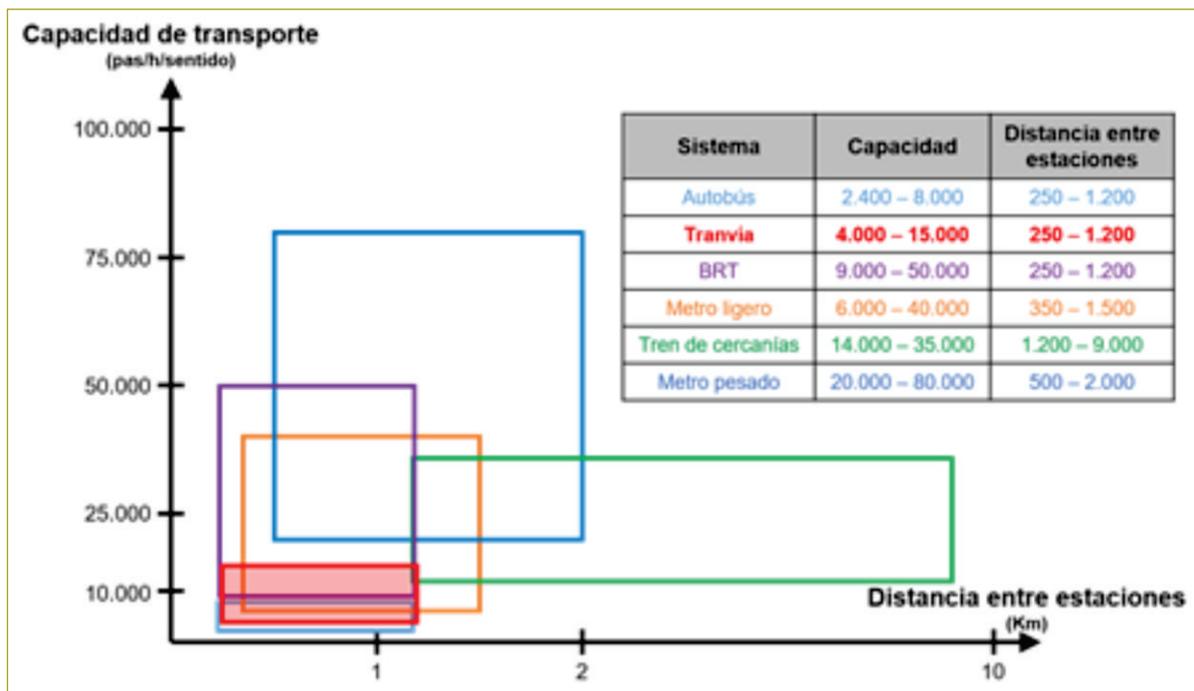


Figura 2. Capacidades de los medios de transporte público.

Fuente: Ferrocarriles Metropolitanos, Melis Maynar.

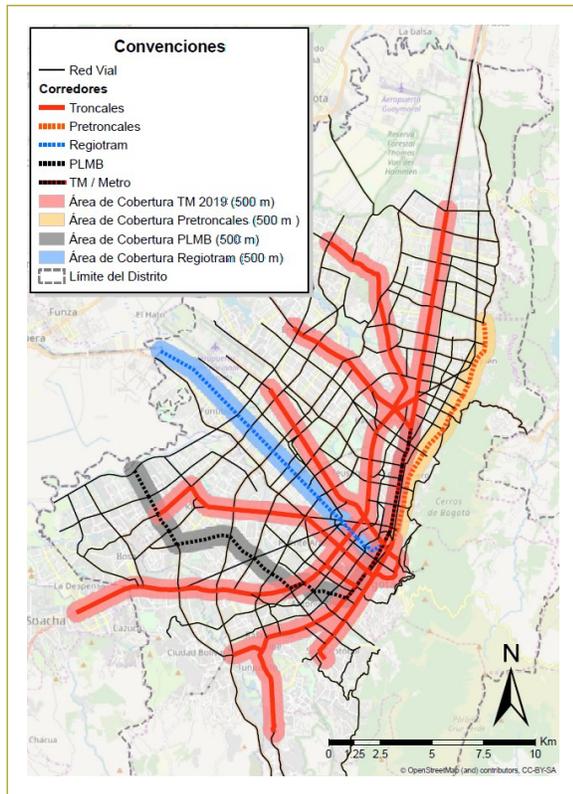


Figura 3. Cobertura de la red del sistema Transmilenio, PLMB y Regiotram.
Fuente: Elaboración de los autores.

estado en funcionamiento. Utilizando distintas regresiones, se seleccionó aquella que generó un coeficiente de correlación cercano a la unidad; en ambos casos, es una función potencial.

En la figura siguiente (figura 4) se evidencian los resultados del modelo de asignación para el año 2015, ajustado a los volúmenes reportados por el sistema de transporte, así como la modelación para el año 2040, en la que se contempla la construcción de nuevas líneas de transporte masivo de alta capacidad, como la primera línea del metro o los trenes de cercanías. En este escenario finalmente resultan cinco corredores, que tienen la demanda suficiente para ser atendidos por un sistema de tipo tranvía; éstos son las avenidas Mutis, Rodrigo Lara Bonilla, Mariscal Sucre, Chile y Ferrocarril del Sur.

CONCLUSIONES

El proceso iterativo de la estimación de la demanda para cada uno de los corredores permite identificar cuáles son las variables que afectan en mayor medida la elección de un corredor u otro por parte de los pasajeros potenciales. Como era de esperar, la capacidad de transporte que ofrece cada corredor altera considerablemente la posibilidad de implementar otros modos

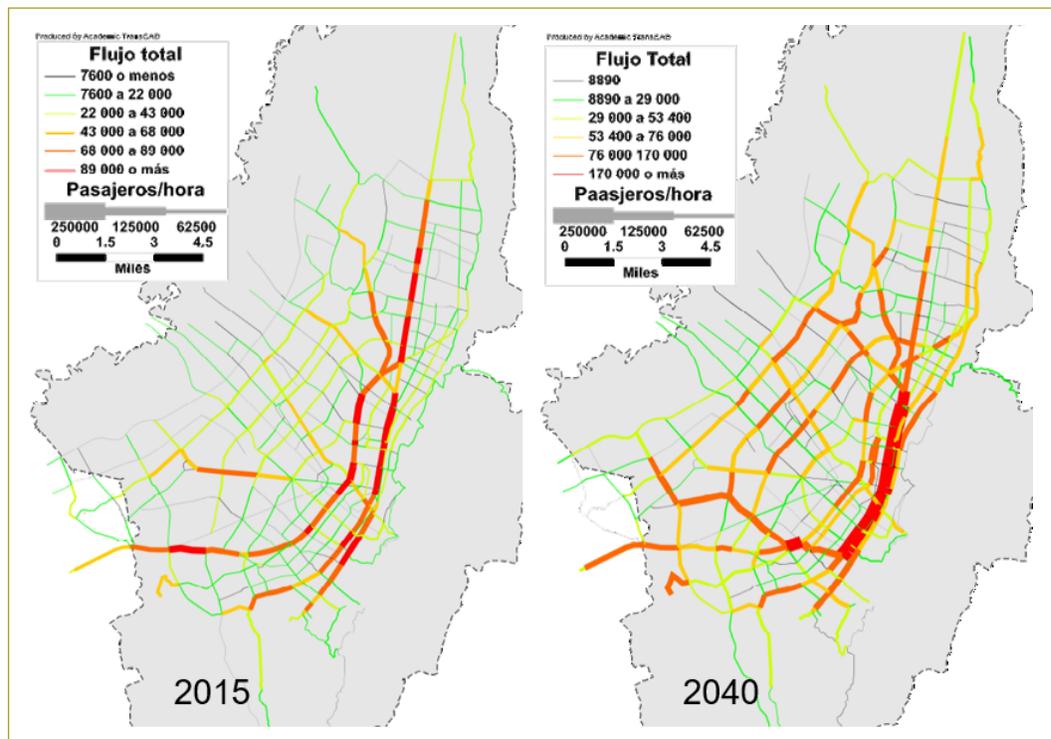


Figura 4. Demanda año 2015 vs. Demanda año 2040.
Fuente: Elaboración de los autores.

de transporte que optimicen la infraestructura. Como caso concreto, cuando se incorporan en el modelo de asignación la primera línea del metro y el sistema Regiotram, los potenciales corredores en el área de influencia de estos proyectos, sobre los cuales también habría sido posible la implementación de sistemas de mediana capacidad, reducen considerablemente la demanda, haciendo que ésta se vea más atraída a usar los sistemas más pesados, como el metro, en este caso.

Utilizar el modelo de asignación que optimiza los tiempos de transporte de la red resulta ser lo más adecuado, ya que esta herramienta tiene por objeto mejorar los tiempos de desplazamiento en toda la red como un solo conjunto y no sólo usuario por usuario. Para etapas de prefactibilidad, en las cuales la escala de análisis es una ciudad completa, es el más adecuado. A medida que los modelos buscan representar situaciones

más concretas y detalladas, se debe considerar el uso de funciones de costo mucho más específicas, en las que, para el caso del transporte público, la tarifa tenga un mayor peso al momento de elegir entre una variedad de opciones de movilización.

REFERENCIAS

- Institute for Transportation Development Policy (2010). *Guía de planificación de sistemas BRT*. Nueva York.
- Melis Maynar, M., & González Fernández, F. J. (2008). *Ferrocarriles metropolitanos* (3ª ed.). Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
- Molinero, Á., & Sánchez, I. (1998). *Transporte público: planeación, diseño, operación y administración* (3ª ed.). México, D. F.: Fundación ICA.
- TransConsult (2015). *Encuesta de Movilidad 2015*. Recuperado de <https://drive.google.com/file/d/0ByNoeWkPXuHpakpSeFVODnBsQ3c/view>.

Elaboración de modelos predictivos de accidentalidad para víctimas no fatales en la concesión Devinorte

Elaboration of predictive accidentality models for non-deadly victims on the Devinorte concession

JAIRO FRANCISCO BRAVO RAMÍREZ¹ - SANTIAGO HENAO PÉREZ²

1. Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Tránsito y Transporte.

2. Director del Centro de Estudios de Vías y Transporte de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

jairo.bravo@mail.escuelaing.edu.co - santiago.henao@escuelaing.edu.co

Recibido: 20/04/2020 Aceptado: 03/07/2020

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista

<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

Resumen

En este artículo se desarrollan los componentes relevantes de la tesis elaborada en la que se desarrollan modelos predictivos con apoyo de redes neuronales artificiales (RNA) para la concesión Desarrollo Vial del Norte (Devinorte) de la ciudad de Bogotá, en el departamento de Cundinamarca, cuya operación se efectuó entre los años 1984 y 2017. Con el fin de profundizar en investigaciones en siniestralidad vial, se identifica un uso potencial de las redes neuronales artificiales (RNA) como una herramienta que permita la elaboración de modelos predictivos, los que, a su vez, se podrían plantear como un elemento adicional al diagnóstico de la siniestralidad para un corredor vial.

Estos modelos, desarrollados mediante la aplicación Matlab R2020a, permiten evaluar diferentes variables incluidas en los registros de siniestros, plantear escenarios con variaciones en los datos de entrada, e identificar variables relevantes para la construcción de modelos y su finalidad para esta investigación. La idea es ampliar la información disponible para facilitar la toma de decisiones en cuanto a intervenciones para mitigar la siniestralidad vial.

La investigación se desarrolla con base en información recopilada de siniestros reportados por la concesión Devinorte en el departamento de Cundinamarca (Colombia) durante los años 2010 a 2016. A su vez, el proyecto permite verificar que es posible la realización de modelos predictivos con RNA cuyo desempeño aporta valores de correlaciones que se pueden considerar relevantes para aplicarlos para bases de datos con registros de siniestros viales.

Palabras claves: accidentes de tráfico, modelo predictivo, redes neuronales artificiales, concesiones.

Abstract

To deepen research on road accidents, and the potential use of artificial neural networks (ANN) as a tool that allows the development of predictive models, which, in turn, could be considered as an additional element to the accident diagnosis for a road corridor.

These models, developed through the Matlab R2020a application, allows the evaluation of different variables included in the claims records, propose scenarios with variations in the input data, and identify relevant variables for the construction of models and their purpose for this research. The main objective is to focus on the reduction of road accident fatalities and make easier for decision-makers to make strategies to reduce the severity and frequency of accidents.

Keywords: road accident, traffic accident, predictive model, artificial neuronal networks, concession schemes in roads.

INTRODUCCIÓN

En busca de herramientas que permitan diagnosticar y contribuir a reducir el número de casos o las consecuencias de siniestros viales, se indaga en la posibilidad de realizar modelos predictivos que estén relacionados con la siniestralidad vial, de manera que se encuentre una posibilidad de analizar cambios en algunas condiciones o variables, que a su vez permitan, en parte, explicar el comportamiento de la siniestralidad. Se intenta verificar si por medio de herramientas computacionales como las redes neuronales artificiales (RNA), planteadas como una variación de un modelo matemático, es posible hacer deducciones sobre unos datos de entrada provenientes de la recopilación de siniestralidad obtenidos de la concesión Devinorte.

Las RNA pretenden asemejar el comportamiento de un cerebro biológico, capaz de resolver problemas cotidianos que involucran patrones, percepción del espacio y control motor. Por ejemplo, la visión humana hace una representación del entorno, por lo que permite reconocer un rostro familiar o ayudar a predecir la trayectoria de un vehículo mientras se conduce, para poder sortear un obstáculo o tomar bien una curva (Haykin, 1999).

En la recopilación de varios documentos cuyo propósito está relacionado con la implementación de redes neuronales artificiales, se destaca que uno de los primeros análisis encontrados data del 2008, cuando ya se empiezan a realizar modelos para estudiar la siniestralidad en vías rurales, cuyos resultados se perciben como exitosos, teniendo en cuenta la capacidad de adaptación a series de tiempo con comportamientos no lineales (Ozgan, 2008); sobresalen también, por ejemplo, aquellos que involucran estudios con países en vías de desarrollo como Nigeria (Ogwueleka, Misra, Ogwueleka, & Fernandez-Sanz, 2014), en los que se destaca la facilidad con la que se pueden solventar situaciones difíciles de advertir con los análisis convencionales.

Por otra parte, dentro de la investigación que se desarrolla con los actores involucrados en la siniestralidad, se tienen casos ampliamente documentados, como el aprendizaje autónomo para vehículos que no necesitan conductor, por medio del reconocimiento de imágenes y la aplicación de algoritmos para *deep learning* (Tian, Jana, Pei, & Ray, 2020). La aplicación de modelos predictivos con RNA pretende tener un

margen de trabajo en el cual, a partir de condiciones conocidas o escenarios con variables preestablecidas, se den posibles salidas que apoyen, por ejemplo, el diagnóstico de puntos críticos o la toma de decisiones para intervenciones de infraestructura enfocadas en la seguridad vial.

Para la elaboración de los modelos se parte del análisis de la concesión Devinorte en dos tramos de vía: 5501 y 45A04, buscando generar condiciones con mayor homogeneidad que faciliten el análisis de resultados. Así mismo, se extraen los registros de siniestralidad vial que involucran únicamente daños materiales, datos proporcionados por la concesión Devinorte y en los que, para cada registro o siniestro, se deposita la siguiente información:

Tabla 1
Variables registradas por Devinorte para siniestros ocurridos en la concesión

Variable IPAT	Nombre	Variable IPAT	Nombre
1	Fecha	12	Víctimas (total afectados)
2	Día	13	Heridos leves
3	Hora	14	Heridos graves
4	Condiciones meteorológicas	15	Muertos
5	Localización	16	Conductor vehículo automotor muerto
6	Abscisado	17	Placa vehículo conductor fallecido
7	Calzada	18	Inspector
8	Geometría	19	Agente que conoció el caso
9	Clase accidente	20	Croquis
10	Causas posibles	21	Desestimiento
11	Elementos involucrados		

Fuente: Elaboración propia, con datos de Devinorte.

RESULTADOS

En primer lugar, se presenta el mapa general de la concesión, en el cual se muestran las abscisas para cada uno de los tramos analizados y la concentración de puntos críticos o de peligrosidad en relación con la siniestralidad en el corredor. Cabe señalar que se encuentran, principalmente, en zonas con presencia de centros poblados:

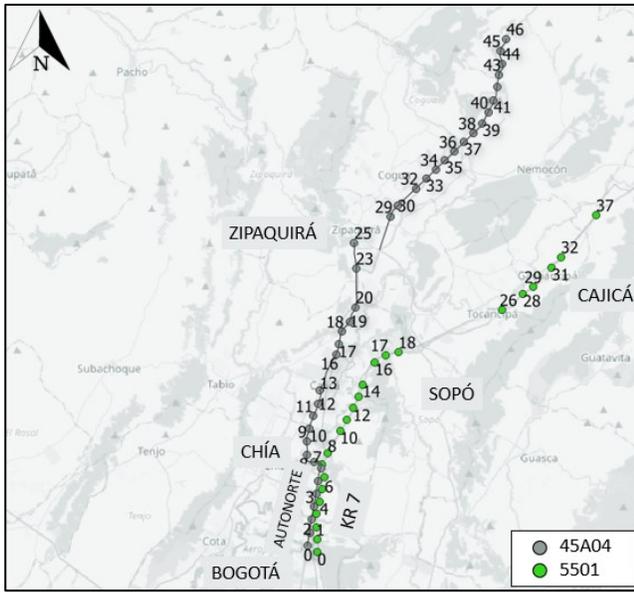


Figura 1. Abscisas, concesión Devinorte.
Fuente: Elaboración propia, con base en QGIS 3.10.2.

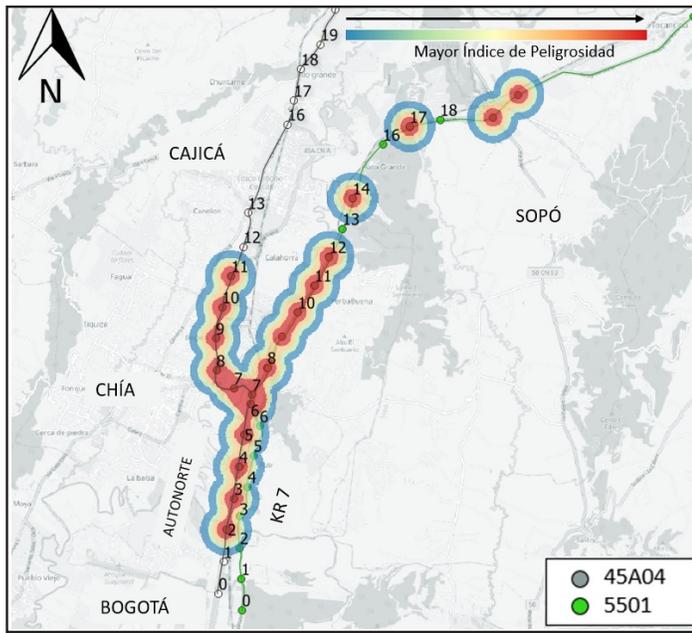


Figura 2. Concentración de siniestros por índice de peligrosidad, concesión Devinorte 2010-2016.
Fuente: Elaboración propia, con QGIS 3.10.2.

Ahora, para la elaboración de los modelos predictivos de siniestralidad, se destaca que de manera general una RNA está compuesta por una capa de entrada (X), una capa oculta (a1...an) y una capa de salida (Y). Las capas de entrada corresponden a las variables de entrada en la red, las capas ocultas se relacionan con la zona

donde el proceso iterativo se realiza y la capa de salida corresponde al resultado de la interacción o corrida.

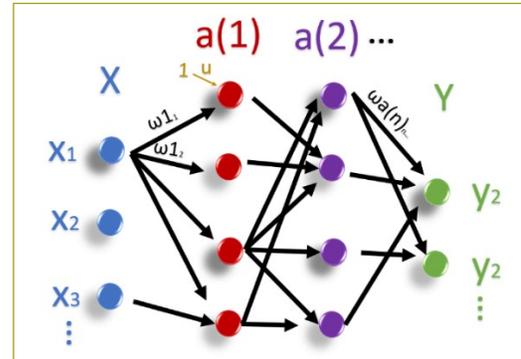


Figura 3. Modelo de redes neuronales artificiales.
Fuente: Elaboración propia.

A su vez, para cada neurona en la red, se tiene una capa de entrada propia que se denotará por medio de la letra z , un peso sináptico y un parámetro conocido como umbral o función de activación (Giuseppe Ciaburro, 2017). Ésta tiene como finalidad acotar la salida en la neurona, pero es muy importante que su derivada sea sencilla, de tal modo que facilite el ajuste de los errores en las iteraciones del modelo.

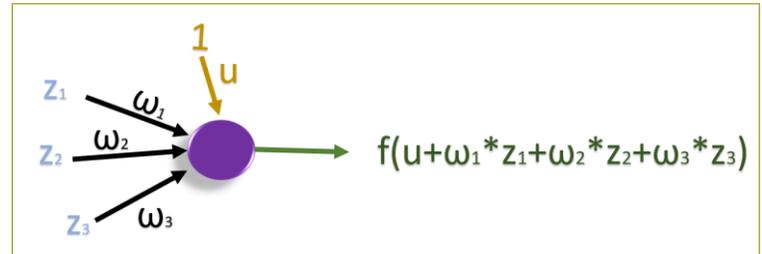


Figura 4. Funcionamiento del modelo de RNA.
Fuente: Elaboración propia.

El modelo se realiza con una RNA con perceptrón multicapa. Ésta consiste en un modelo no paramétrico y no lineal que, en busca de tener generalización y optimización de los pesos, se resuelve con el método bayesiano (Ceballos, Muñoz, & Moreno Cadavid, 2011). De igual manera, se escoge una función sigmoide para su desarrollo y para el procesamiento se hace uso de la versión R2020a del *software* Matlab.

Para la aplicación del *software*, se realizan las siguientes simplificaciones en los datos de siniestralidad para la entrada:

Tabla 2
Variación de los modelos de RNA para la vía 45A04, Devinorte

	Variable	Descripción	Rango
1	Mes	Mes de ocurrencia del siniestro	1-12
2	Año	Año de ocurrencia del siniestro	2010-2016
3	Día	Día de la semana de ocurrencia del siniestro	1-7
4	Hnum	Hora en formato militar	0-24
5	Tpd	Tránsito promedio diario anual	20610-40241
6	D_n	Día o noche	1-2
7	Cond_met	Condición meteorológica	1-3
8	Cals	Calzada E-W-Única	1-3
9	Geometría	Recta, curva, etc.	1-4
10	Claseac1	Choque, atropello, volcamiento, etc.	1-8
11	Claseac2	Choque, atropello, volcamiento, etc.	1-8
12	Caup1	Exceso de velocidad, fallas mecánicas, etc.	1-304
13	Caup2	Exceso de velocidad, fallas mecánicas, etc.	1-304
14	Elemento1	Automóvil, bus, buseta	1-20
15	Elemento2	Automóvil, bus, buseta	1-20
16	Heridos	Se reporta herido, pero no requiere atención médica(0 NO; 1 Sí)	1-2
17	Abscisado	Abscisa de ocurrencia del siniestro (variable dependiente)	0-46

Fuente: Elaboración propia.

Y como modelo general, se presenta la siguiente figura (figura 5):

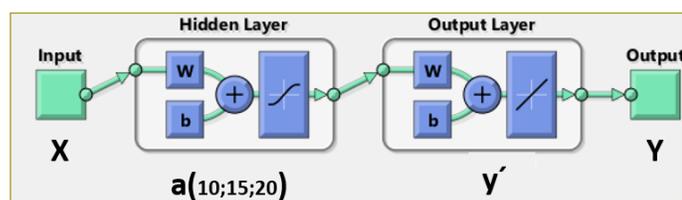


Figura 5. Modelo general de RNA para siniestros en la concesión Devinorte.

Fuente: Elaboración propia, con base en Matlab R2020a.

Donde:

X: corresponde a las variables de siniestralidad incluidas como datos de entrada.

a: corresponde a las capas ocultas de la RNA, que toma valores de 10, 15 y 20.

y': corresponde a la variable dependiente o *target* (1, valor único).

Y: corresponde al valor de salida, predicho por el modelo (1, valor único).

Al hacer las combinaciones de variables y establecer variaciones de 10, 15 y 20 capas ocultas para cada modelo realizado, se encuentran los resultados que se presentan en las siguientes tablas (tablas 3 y 4).

Teniendo en cuenta que para el tramo 45A04, un alto número de casos se concentra en los primeros 10 PR, se desarrollan los modelos con ese filtro y se analizan los cambios del coeficiente de correlación (tabla 5).

CONCLUSIONES

Una vez verificadas las combinaciones entre variables dependientes e independientes, se confirma que es posible realizar un modelo predictivo con RNA que permite ayudar a la gestión de los indicadores de siniestralidad de la concesión. Sin embargo, tomando en cuenta la gran variación de los datos, se recomienda la aplicación de estos modelos, principalmente en el tramo 5501 de la concesión Devinorte.

Tabla 3
Variación de los modelos de RNA para la vía 45A04, Devinorte

Modelo	Variables ingresadas (x)	Variable dependiente (y')	Capas ocultas (a)								
			10			15			20		
			Train	Test	Total	Train	Test	Total	Train	Test	Total
1	16	# de herido leve	0,289	0,2783	0,29	0,27	0,21	0,26	0,33	0,261	0,319
2	12	ABS ocurrencia	0,307	0,132	0,291	0,337	0,19	0,321	0,32	0,12	0,301
3	10	ABS ocurrencia	0,307	0,164	0,292	0,34	0,159	0,321	0,32	0,119	0,301

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4
Resultados de los modelos de RNA para la vía 5501, Devinorte

Modelo	Variables ingresadas (x)	Variable dependiente (y')	Capas ocultas (a)								
			10			15			20		
			Train	Test	Total	Train	Test	Total	Train	Test	Total
1	16	# de herido leve	0,599	0,269	0,568	0,635	0,355	0,605	0,56	0,423	0,547
2	13	ABS ocurrencia	0,561	0,395	0,513	0,611	0,405	0,547	0,507	0,455	0,491
3	12	ABS ocurrencia	0,552	0,41	0,51	0,638	0,332	0,542	0,545	0,421	0,51
4	16	Herido leve (sí/no)	0,655	0,388	0,571	0,736	0,365	0,622	0,785	0,326	0,641
5	15	Clase ACC	0,77	0,596	0,716	0,8	0,582	0,733	0,838	0,565	0,748

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5
Variación de los modelos de RNA para la vía 45A04, primeros 10 PR, Devinorte

Modelo	Variables ingresadas (x)	Variable dependiente (y')	Capas ocultas (a)								
			10			15			20		
			Train	Test	Total	Train	Test	Total	Train	Test	Total
4	15	ABS Ocurrencia	0,41	0,33	0,3986	0,45	0,273	0,432	0,487	0,278	0,463
5	13	ABS ocurrencia	0,385	0,339	0,381	0,432	0,337	0,422	0,461	0,227	0,437
7	13	Clase AC1	0,436	0,325	0,402	0,497	0,2914	0,436	0,5373	0,317	0,47
8	13	Herido leve (sí/no)	0,451	0,495	0,453	0,518	0,4	0,5122	0,522	0,299	0,51
6	12	GeometrÍA	0,509	0,344	0,458	0,508	0,297	0,442	0,572	0,296	0,49
9	10	Herido leve (sí/no)	0,521	0,336	0,468	0,517	0,335	0,463	0,57	0,316	0,492

Fuente: Elaboración propia.

El limitado desempeño de los modelos hechos para el tramo 45A04 en la concesión Devinorte puede obedecer a variables explicativas no contempladas y que no se pueden explicar con los datos de siniestralidad recopilados por la concesión. Para tal fin, es posible incluir otros parámetros o variables, como velocidades de operación, pendientes, parámetros específicos de diseño geométrico, e incluso mediciones de IRI o similares. De este modo, es posible que se obtengan modelos más

robustos y que se pueda ayudar a mejorar el desempeño del coeficiente de correlación.

En consideración a que el entrenamiento de la red obedece a un aprendizaje autónomo, los resultados de los modelos varían cada vez que se realiza el entrenamiento, razón por la cual no se puede afirmar categóricamente que los resultados obtenidos obedecen al mejor modelo para cada variable estudiada, pero sí es posible obtener un orden de magnitud en el coeficiente de correlación de los datos.

La aplicación de modelos predictivos con RNA para eventos de siniestralidad tiene un alto potencial de investigación y desarrollo que puede apoyar la toma de decisiones, lo cual permite modificar uno o varios parámetros de entrada que ayuden a obtener diversos escenarios y resultados, de modo que aporten en la toma de decisiones para intervenciones viales relacionadas con la seguridad vial. Por otra parte, se destaca la posibilidad de inclusión de variables adicionales que pueden ayudar a elevar los coeficientes de correlación, generando modelos más completos cuyo desempeño se pueda potenciar.

Agradecimientos

Damos gracias a la concesión Devinorte por permitirnos tanto el acceso a sus bases de datos, como el desarrollo del proyecto de investigación.

Aclaraciones

La información procesada y los modelos realizados corresponden únicamente a siniestros que no dejaron

víctimas fatales o a aquellos que no requieren atención médica, razón por la cual sólo puede aplicarse sobre eventos que presentan daños materiales.

REFERENCIAS

- ANI. (05 de octubre de 2020). *Estadística, tráfico y recaudo*. Obtenido de Agencia Nacional de Infraestructura: <https://www.ani.gov.co/estadistica-traffic-y-recaudo>
- Ceballos, F., Muñoz, L. E., & Moreno Cadavid, J. (Diciembre de 2011). Selección de perceptrones multicapa usando aprendizaje bayesiano. *Scientia et Technica*, 110-115.
- Giuseppe Ciaburro, B. V. (2017). *Neural Networks with R: Smart models using CNN, RNN, deep learning, and artificial intelligence principles*. Birmingham: Packt.
- Haykin, S. O. (1999). *Neural Networks. A Comprehensive Foundation, second edition*. Ontario: Pearson Prentice.
- Matlab. (2020). Version R2020a. Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc.
- Ogwueleka, F. N., Misra, S., Ogwueleka, T. C., & Fernandez-Sanz, L. (2014). An Artificial Neural Network Model for Road Accident Prediction: A Case Study of a Developing Country. *Acta Polytechnica Hungarica*, 177-197.
- Ozgan, E. a. (2008). Neural Networks-based Modeling of Traffic Accidents In Interurban Rural Highways. *Duzce Sampling. J. Applied Sci.*, 146-151.
- Tian, Y., Jana, S., Pei, K., & Ray, B. (22 de Abril de 2020). *DeepTest: Automated Testing of Deep-Neural-Network-driven Autonomous Cars*. Obtenido de s. <https://doi.org/10.1145/3180155.3180220>.

Lineamientos para la accesibilidad de la infraestructura peatonal a personas con movilidad reducida y de la tercera edad. Caso de estudio: municipio de Chía, avenida Pradilla entre el parque Ospina y el centro comercial Centro Chía

Guidelines for the accessibility of pedestrian infrastructure for people with reduced mobility and the elderly. Case study: Chía Municipality, Pradilla Avenue between Ospina Park and Chía Mall

JORGE MARIO GANTIVA GARZÓN¹ - MARITZA CECILIA VILLAMIZAR ROPERO²

1. Magíster en Ingeniería Civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Bogotá, Colombia.

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

jorge.gantiva@mail.escuelaing.edu.co – maritza.villamizar@escuelaing.edu.co

Recibido: 26/04/2020 Aceptado: 05/07/2020

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

Resumen

El trabajo realizado parte de los problemas que afrontan los peatones en el municipio de Chía. Se hizo una revisión bibliografía con el fin de identificar los aspectos necesarios en el diseño de aceras, andenes y pasos peatonales, y se llevó a cabo un concienzudo trabajo de campo, mediante el cual se recolectó información que luego se procesó para elaborar archivos geográficos que permitieran presentar algunos mapas temáticos con la caracterización del corredor. Con esto, más el análisis de la información, se establecieron una serie de lineamientos que buscan mejorar la accesibilidad en general de la población, pero en especial de las personas con discapacidad, de movilidad reducida y de la tercera edad.

Palabras claves: accesibilidad, movilidad, movilidad reducida, personas discapacitadas.

Abstract

The work departs from the current problem in the municipality of Chía for pedestrians where a bibliography review was carried out to identify the necessary aspects in the design of sidewalks, platforms and pedestrian crossings. Furthermore, a field work was performed in which information was collected and processed so as to prepare geographic files showing some thematic maps with the corridor's characterization. With this work, and the analysis of the information, a series of guidelines were established that seek to improve accessibility in general and, especially, for people with disabilities, reduced mobility, and the elderly.

Keywords: accessibility, mobility, reduced mobility, disabled people.

INTRODUCCIÓN

La accesibilidad es aquella condición que debe cumplir cualquier entorno para que pueda ser utilizado por todas las personas de manera segura y confortable (RAE, 2020).

Chía era un municipio donde la mayoría de sus habitantes utilizaban la bicicleta para realizar sus actividades diarias. Sin embargo, con el crecimiento de Bogotá y el aumento de la construcción de viviendas y de conjuntos residenciales, el municipio comenzó a migrar hacia el uso del vehículo particular, priorizando siempre a estos usuarios y dejando a un lado las alternativas sostenibles.

El corredor establecido como caso de estudio es la entrada principal del municipio, conocida como la avenida Pradilla, donde hay un alto flujo de vehículos. Adicionalmente, en los sectores aledaños se encuentran diversos centros atractores, como centros comerciales, centros de salud (IPS) y una oferta variada de lugares destinados al comercio y a la recreación. A causa de esta situación, la avenida Pradilla se ha convertido en una vía imposible de transitar; en horas pico, para hacer un recorrido de dos kilómetros una persona se puede tardar hasta 30 minutos en los casos más críticos.

Además de esto, la infraestructura peatonal paralela a la vía presenta un estado bastante deteriorado; las personas que requieren hacer uso de ésta en muchas ocasiones se enfrentan a condiciones inseguras, las cuales ponen en riesgo su salud y, en los casos más críticos, su vida; varios andenes tienen deficiencias en sus materiales, irregularidades y una falta de diseño que es evidente cuando se hacen caminatas y actividades a lo largo de éstos. Conscientes de lo anterior, se enfatiza en el tema de la infraestructura peatonal y se realiza una recolección de información en campo para evaluar las condiciones actuales y establecer unos lineamientos que mejoren la accesibilidad de la población a ésta, especialmente de las personas con discapacidad, de movilidad reducida y de la tercera edad.

1. RESULTADOS

Se llevó a cabo una revisión del estado del arte, con el propósito de identificar las tendencias y las características necesarias para garantizar el acceso a la infraestructura peatonal; luego de esto, se desarrolló una caracterización de la infraestructura vial, analizando y tomando un registro fotográfico de paraderos, malla

vial y señalización tanto horizontal como vertical; posteriormente, se realizó una caracterización para la infraestructura peatonal existente, haciendo especial hincapié en las aceras y pasos peatonales mediante un registro fotográfico que permitió la recopilación de información y, a su vez, la realización de archivos geográficos que permitieran la elaboración de mapas temáticos en los que se pudieran visualizar las características del corredor y su análisis posterior, con el objeto de establecer los lineamientos para la accesibilidad de la población a la infraestructura peatonal.

Una vez realizadas estas actividades, se encontró:

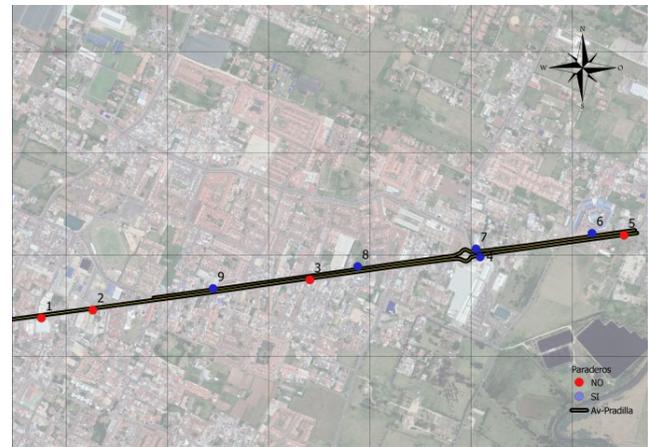


Figura 1. Mapa temático de existencia de señalización horizontal.

Fuente: Elaboración propia.

- En el 100 % de los paraderos hay señalización vertical, gracias a los cuales los peatones y usuarios pueden identificar los puntos designados como puntos autorizados para poder utilizar el servicio de transporte público.
- Solamente el 55 % cuenta con señalización horizontal, y el estado de este mobiliario se encuentra bastante deteriorado.
- Apenas uno de los paraderos en el corredor presenta mobiliario para la espera de las rutas de transporte público.
- Hay 82 señales verticales, de las cuales 41 se encontraban en el costado norte, 39 en el costado sur y 2 en el separador central.
- De estas 82 señales, la composición de acuerdo con su clasificación es la que se muestra a renglón seguido (tabla 1).

Tabla 1
Composición por clasificación

Clasificación de señalización			
Informativa	Preventiva	Reglamentaria	Total general
22	15	45	82
27 %	18 %	55 %	100 %

Fuente: Elaboración propia.

- La composición, de acuerdo con el estado que presenta la señal, se muestra en la tabla siguiente (tabla 2).

Tabla 2
Composición de acuerdo con el estado

Estado de señalización			
Bueno	Malo	Regular	Total general
4	50	28	82
5 %	61 %	34 %	100 %

Fuente: Elaboración propia.

- De acuerdo con la tabla anterior y con el levantamiento realizado, es correcto decir que el estado de esta señalización en general es malo (más del 50 % se encuentra en este estado); es común encontrar que estas señales son vandalizadas o alteradas por habitantes del municipio, y a pesar de esto no se han tomado medidas para multar a los que hacen estos daños, o para mejorar o remplazar las señales deterioradas. A continuación, se puede evidenciar el estado deficiente de estas señales (figura 2).



Figura 2. Señales en estados regular y malo.

Fuente: Archivo fotográfico propio.

- El estado de la señalización horizontal de los tramos está entre regular y malo. Esto se debe a la continua aparición de obras que se han realizado en la vía, el alto tráfico y la clara falta de calidad en los materiales utilizados para hacer la señalización, lo cual genera situaciones que afectan la movilidad y la seguridad de los usuarios. A renglón seguido, se puede apreciar el estado de la señalización en algunos de estos tramos (figura 3).



Figura 3. Señalización horizontal en la avenida Pradilla.

Fuente: Archivo fotográfico propio.

- La situación actual de los andenes en el caso de estudio es bastante mala, como se pudo observar en los mapas y en la toma de información, En algunos hay anchos que no permiten la circulación de varias personas a la vez, presencia de obstáculos, diversos materiales o la inexistencia de éstos, lo que hace casi imposible para personas con movilidad reducida o con alguna discapacidad movilizarse por estos senderos, como se puede apreciar (figura 4).



Figura 4. Situaciones críticas en la avenida Pradilla 1.

Fuente: Archivo fotográfico propio.

Con base en la bibliografía consultada y la situación que se evidenció al desarrollar este proyecto, es claro que en el municipio hay que desincentivar el uso del vehículo particular motorizado. Se propuso optar por el modelo de “Pirámide invertida del transporte”, en el que se hace una jerarquía de las formas de moverse según los medios más sanos y cuyo consumo de CO₂ es menor (peatones), hasta aquellos con mayor empleo de CO₂ (vehículos motorizados).

Lineamientos

- Teniendo en cuenta a todos los actores, entre los que se destacan personas de la tercera edad, gente con movilidad reducida (usuarios en silla de ruedas, con caminador, muletas o ayudas técnicas), invidentes, usuarios con perros guías, gente con deficiencias auditivas, etc., y garantizando los principios de la accesibilidad universal, se debe establecer una franja mínima de circulación de 2,0 m, que garantice el flujo de al menos una persona en silla de ruedas (que es el usuario que necesita mayor espacio, como se puede apreciar a continuación), además de una franja de servicio y de amoblamiento de 0,8 m.

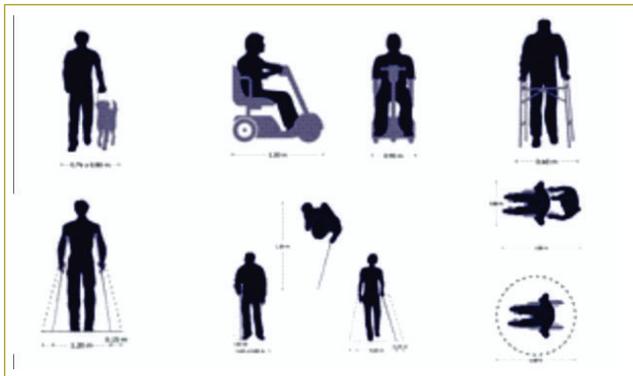


Figura 5. Espacio necesario para diferentes usuarios.

Fuente: Elaboración propia, con base en el Manual de calles (ITDP, 2018).

- Los materiales para la franja de circulación deben ser totalmente continuos, antideslizantes tanto en condiciones favorables (secas y cálidas) como desfavorables (húmedas y de lluvias) de circulación.
- Se debe disponer de superficies podotáctiles, tanto de guía como de alerta; la superficie de guía ha de ser paralela, con una distancia mínima de 1,0 m al paramento y dejando por lo menos 0,60 m del

otro lado de la guía. Las señales de alerta deben ubicarse de manera perpendicular, para garantizar la seguridad del peatón.



Figura 6. Guía podotáctil en andenes.

Fuente: Imagen tomada de Cartilla de andenes (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2018).

- La pendiente transversal del andén debe ser de máximo 2,0 %, garantizando un buen drenaje; además, hay que tomar en cuenta la condición actual de la vía y la NTC 4109. La altura del andén debe ser máximo de 0,2 m.
- Las rampas que se tengan a lo largo de la infraestructura peatonal no deben exceder el 6 % de pendiente longitudinal, de modo que se permita la circulación a todos los usuarios.
- Los paraderos deben contar con una infraestructura especial, que permita la espera de los usuarios del sistema. Han de tener una longitud mínima de 12 m, una guía podotáctil paralela al bordillo del andén, una pendiente transversal de máximo el 2 %, e igualmente, para garantizar la conectividad del paradero con el entorno, las rampas deberán tener un ancho mínimo de 2,0 m y una pendiente longitudinal máximo del 6 %.
- Adicionalmente, los paraderos deben tener una señalización incluyente; para los usuarios con deficiencias visuales hay que contar con un módulo braille que permita acceder a la información del

paradero. Este módulo debe instalarse de manera paralela a la vía, con una altura que no sobrepase el 1,50 m para que se garantice la comodidad a la hora de la lectura.

- La señalización ha de ser acorde con las condiciones que presenta la vía. Las señales deben ser visibles durante todo el día, por lo que tienen que elaborarse con materiales apropiados y que aseguren su retrorreflexión, cumpliendo con la NTC 4739. Las señales verticales se ubicarán dentro de la franja de amoblamiento en los andenes, de tal modo que éstas no interfieran en el flujo de los usuarios peatonales y garanticen una distancia mínima de 0,3 m, contados a partir del borde del andén.
- La altura libre de las señales verticales no deberá ser inferior a los 2,0 m; en esta forma, se garantizan la comodidad y la seguridad de los peatones, así como de los demás usuarios de la calle.
- Se deberán demarcar todos los pasos peatonales con dos líneas continuas paralelas transversales a la vía, un ancho mínimo de 0,3 m y una separación que no podrá ser mayor de 4,0 m ni menor de 2,0 m.
- Deberá demarcarse con una línea de detención continua, ubicada a una distancia mínima de 1,2 m de cualquier paso peatonal y las líneas que delimitan la senda para el cruce peatonal.
- Los semáforos peatonales pueden contar con una señal audible, correspondiente a un tono intermitente; esta medida se toma para ayudar a las personas que tienen dificultades visuales, principalmente. Vale la pena aclarar que no se recomienda su implementación cuando se presente una cercanía con otros semáforos que puedan generar conflictos y malinterpretación de la señal. En caso de instalarse, hay que ubicarlo sobre la cara del semáforo peatonal y alineado con el andén opuesto sobre el cruce peatonal. El sonido debe dirigirse paralelamente a la señal luminosa del semáforo peatonal; la distancia mínima recomendada entre las dos fuentes emisoras ha de ser de 3,0 m.
- De conformidad con las condiciones que se presentan en las intersecciones a lo largo del corredor, se hace necesario contar con una fase exclusiva para los peatones en los semáforos, con el fin de que puedan cruzar las intersecciones en cualquier sentido, mientras todos los vehículos se encuentran detenidos.
- Además de lo determinado anteriormente, hay que disponer de bases de datos en las que se identifiquen los accidentes y siniestros viales; se puede pensar en la implementación de un observatorio de accidentalidad para el municipio, con el propósito de que se pueda comparar la situación base con un escenario renovado, lo que permitirá que se reconozcan los puntos críticos y que éstos no migren hacia otros lugares del corredor o del municipio.
- En cuanto al tema de la composición vehicular y los volúmenes de tránsito, es evidente que se deben establecer horarios en los que se restrinja el tránsito de vehículos pesados, y si se continúa registrando un crecimiento considerable en el parque automotor, pensar en adoptar medidas como pico y placa para el municipio; hay que tomar en cuenta que las condiciones de movilidad cambiarán drásticamente por el escenario de la pandemia que se ha venido presentando durante el año 2020, por lo que a la hora de implementar las medidas que se necesiten hay que considerar todos los factores que permitan una movilidad segura, sostenible y accesible.

2. CONCLUSIONES

Como fue evidente al realizar la toma de información y el análisis de resultados, al igual que la caracterización de la infraestructura vial y peatonal, el estado en general del corredor presenta unas condiciones deficientes tanto en la malla vial como en la infraestructura peatonal, lo que genera problemas de congestión y seguridad vial en su mayoría.

Las ciclovías son otro de los aspectos críticos en materia de movilidad. Solamente en uno de los tramos del corredor se había establecido un espacio para los ciclistas, por lo que se presentan situaciones en las que estos actores viales invaden el espacio peatonal o son protagonistas de incidentes viales.

El estado de la señalización es, en general, bastante deficiente. Durante los últimos meses se han efectuado una serie de obras para adecuar el sistema de acueducto y alcantarillado, lo que ha llevado al deterioro de las vías y la infraestructura peatonal; esta señalización ha sido una de las más afectadas, y se evidencia que se debe hacer una renovación para todo el corredor.

Con base en los documentos investigados y consultados, hay que seguir unas políticas de movilidad

sostenible, en especial si se consideran los eventos que se han presentado en el mundo en los últimos años. Estas políticas son:

- **Movilidad socialmente sostenible.** La movilidad como un derecho de las personas, lo que contribuye a mejorar su calidad de vida, con criterios de equidad social.
- **Movilidad competitiva.** La movilidad se rige de acuerdo con principios de efectividad en el empleo de sus componentes para garantizar la circulación de las personas y de los bienes con criterios de logística integral, tomando en cuenta el beneficio sobre el desarrollo de las actividades económicas que soportan el municipio.
- **Movilidad ambientalmente sostenible.** Tiene que ver con la adopción de criterios de movilidad ambientalmente sostenibles, que ayuden a preservar la salud y el bienestar de la población actual y futura.

REFERENCIAS

- Agencia Nacional de Seguridad Vial (2020). *Boletín estadístico Cundinamarca*. Bogotá.
- Alcaldía Mayor de Bogotá (2018). *Cartilla de andenes*. Bogotá.
- IDTP, IDOM & Sedatu (2018). *Manual de calles. Diseño vial para ciudades mexicanas*. Ciudad de México.
- Ministerio de Transporte (2015). *Manual de señalización vial. Dispositivos uniformes para la regulación del tránsito en calles, carreteras y ciclorrutas de Colombia*. Bogotá.
- Nacto (2016). *Global Street Design Guide*. Recuperado de <https://globaldesigningcities.org/publication/global-street-design-guide>.
- Organización Mundial de la Salud (2013). *Seguridad peatonal: manual de seguridad vial para instancias decisorias y profesionales*. Recuperado de https://www.who.int/violence_injury_prevention/publications/pedestrian_safety_manual/es/.
- Pearlman, J., Cooper, R., Duvall, J. & Livingston, R. (2013). Pedestrian Pathway Characteristics and their Implications of Wheelchairs Users. *Assist. Technol.*, 25 (4): 230-239.
- RAE (2020). Definición de accesibilidad. Recuperado de <https://dej.rae.es/lema/accesibilidad>.
- Santuario, A. (2016). Infraestructura y accesibilidad para la movilidad peatonal: factores de caminabilidad en dos áreas habitacionales de Tijuana, B.C, 2015. Tijuana, B.C., México.
- Secretaría Distrital de Planeación - Dirección del Taller del Espacio Público (2018). *Cartilla de andenes*. Bogotá, D.C.

Análisis de la correlación entre la accidentalidad vial en puntos críticos y los niveles de servicio, tomando como caso de estudio el corredor de la avenida Boyacá entre la calle 183 y la autopista Sur (AC 45A sur)

Analysis of the correlation between road accidentality in critical points and service levels, a case study: Avenida Boyacá corridor between Calle 183 and Autopista Sur (AC 45A Sur)

GABRIEL ANDRÉS VELANDIA GARCÍA¹ - MARÍA TERESA MOLINA CIFUENTES²

1. Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Tránsito y Transporte.

2. Profesora de la Maestría en Ingeniería Civil con énfasis en Tránsito y Transporte.

gabriel.velandia@mail.escuelaing.edu.co – maria.molina@escuelaing.edu.co

Recibido: 28/04/2020 Aceptado: 10/07/2020

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

Resumen

Actualmente, se consideran las condiciones del accidente y su relación con los volúmenes de tránsito, pero no se tienen en cuenta otras variables de la operación vial que están directamente relacionadas con los accidentes.

Básicamente, se hace evidente la necesidad de considerar las condiciones de operación, buscando una correspondencia entre la accidentalidad y los niveles de servicio.

Palabras claves: accidente, gravedad de los accidentes, volumen vehicular, micromodelación, capacidad, estación maestra.

Abstract

Currently, the conditions of accidents and their connection with traffic volumes are considered, but other road operation variables directly related with accidents are not taken into consideration.

In general terms, it is necessary to consider the operation conditions, finding a correspondence between accidentality and service levels.

Keywords: accident, accident mortality, vehicular volume, micromodelling, capacity, master station.

OBJETIVOS

General

Correlacionar las condiciones de operación de las intersecciones semaforizadas medias a partir de los niveles de servicio con los índices de severidad, evaluados a partir del caso de estudio en el corredor de la avenida Boyacá entre calle 183 y la autopista Sur (AC 45A Sur).

Específicos

- Evaluar las características de los puntos de mayor relevancia de accidentalidad en el corredor de la avenida Boyacá entre calle 183 y la autopista Sur (AC 45A Sur).
- Evaluar la accidentalidad a partir del índice de severidad (gravedad de los accidentes) a lo largo del corredor de la avenida Boyacá entre calle 183 y la autopista Sur (AC 45A Sur).
- Modelar cada intersección seleccionada para conocer el NS y definir la correlación dada con la accidentalidad vial.

Esta investigación está orientada a buscar una correlación entre la accidentalidad y los niveles de servicio en intersecciones semaforizadas, con base en dos aspectos. El primero corresponde a la metodología de evaluación de puntos críticos de accidentalidad, analizada desde el índice de severidad, que parte del número de eventos de tránsito ocurridos según su gravedad, periodo de estudio, longitud del tramo o área de influencia (intersecciones) y el tránsito promedio diario (TPD); el segundo aspecto está asociado a la evaluación de las condiciones de operación para establecer los niveles de servicio en cada punto de análisis. Para la investigación, se tomó como caso de estudio la avenida Boyacá entre calle 183 y autopista Sur; al depurar la información de accidentalidad existente de los años 2016 y 2017 se evidenció que las intersecciones reguladas con semáforos sobre el corredor eran las que presentaban el mayor número de eventos, por lo cual se seleccionaron 19 puntos críticos.

Los niveles de servicio se analizaron con la ayuda del *software* PTV Vissim, que ayudó a recopilar información concerniente a volúmenes vehiculares, movimientos vehiculares permitidos, planeamiento semafórico y condiciones de la vía. A partir de la información estudiada se hizo el análisis para determinar el tipo de correlación existente entre la accidentalidad y el NS, además de

proponer una expresión alternativa para establecer el IS a partir del volumen en la hora de máxima accidentalidad y el número de eventos presentados, datos que son fácilmente medibles y que no implican amplias jornadas de evaluación.

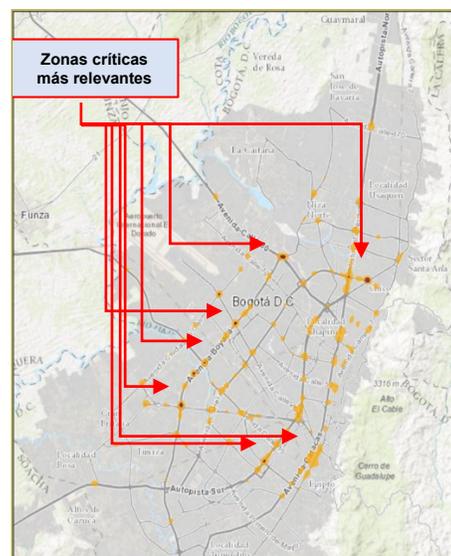
RESULTADOS DE METODOLOGÍA

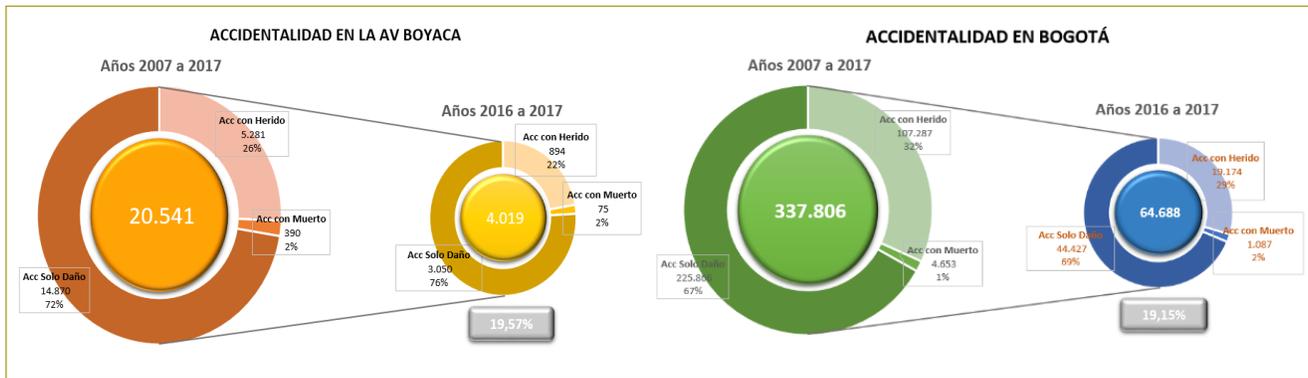
El resultado de esta metodología tiende a centrarse en los puntos de accidentes estadísticamente significativos y áreas alrededor de los cruces y tramos. Se evidenció que, de todos los corredores viales, la avenida Boyacá mostraba una mayor concentración de zonas de calor.

Se toma como base de estudio la avenida Boyacá, al ser un corredor que presenta altos índices de accidentalidad (6,21 % de la totalidad de accidentes ocurridos en Bogotá entre los años 2016 y 2017), además de que las características geométricas no tienen gran variación en los últimos años, con lo que el estudio que se va a desarrollar no tendrá posibles particularidades en el tramo vial que incidan las evaluaciones de accidentalidad y operación vial.

IDENTIFICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

Para la escogencia de los puntos críticos se determinaron como mecanismo de selección los sitios (cruce o tramo) con mayor índice de severidad, los cuales tienen en cuenta la gravedad de los eventos en los puntos de evaluación, dentro del periodo analizado (2016-2017).





La selección se basó en los datos suministrados por la Secretaría Distrital de Movilidad (SDM), en cuanto a los lugares en la ciudad donde se presenta mayor accidentalidad.

A partir de los datos de siniestralidad obtenidos de la base de datos suministrada por el Sistema de Información Geográfica de Accidentes de Tránsito de Bogotá (Sigat II), remitidos por la SDM, que incluye los accidentes reportados por la Policía de Tránsito con diligenciamiento del Informe Policial de Accidentes de Tránsito (IPAT), se evaluaron por puntos de calor (con el *software* ArcGIS) las zonas y corredores con mayor índice de accidentalidad, para así poder enfocar y estudiar un tramo vial que sea suficientemente amplio y ejemplar en el análisis que hay que desarrollar en la evaluación de operación vial de un corredor significativo de la ciudad de Bogotá.

Para estudiar con mayor detalle la distribución espacial de estos eventos se elaboró un mapa de densidad calculado con estimación Kernel¹, que muestra posibles zonas de concentración de alta ocurrencia. Esta clase de mapa ofrece varias ventajas prácticas en el análisis espacial de eventos de puntuales, además de que permite a los analistas visualizar simplificada y examinar los patrones complejos de los puntos de incidentes, en este caso, los accidentes de tránsito.

CASO DE ESTUDIO SOBRE LA AV. BOYACÁ ENTRE LA AV. CALLE 183 Y AUTOSUR (AC 45A SUR)

Al utilizar la estimación tipo Kernel en el mapa generado en ArcGIS, se detectó que una de las áreas con mayor densidad de accidentes por km² es el área de influencia del corredor de la avenida Boyacá, por lo que se definió éste como corredor de estudio, limitando su evaluación entre la calle 183 y la autopista Sur (AC 45A Sur). La técnica consistió en seleccionar diferentes

puntos y relacionar cada uno con el número equivalente de accidentes de tránsito, de acuerdo con la unidad de patrón de severidad que pondera cada accidente, según su gravedad. Esto se hace con el fin de analizar con mayor detalle la distribución espacial de tales eventos y elaborar un mapa de densidad en el que se muestren los puntos de alta concentración:

En razón de que los rangos de magnitud de la densidad de Kernel² varían entre 0 y 56.187 (para los 4018 eventos presentados sobre la avenida Boyacá entre la calle 183 y la Autosur, entre los años 2016 y 2017), se parametrizaron las magnitudes de forma binaria, considerando los siguientes intervalos ($0 < 18.000$ y $1 > 18.000$), con el propósito de identificar zonas críticas de accidentalidad sobre el corredor.

Los resultados obtenidos para magnitudes >18.000 mostraron 28 puntos críticos (tabla 1); al evaluarse de acuerdo con el tipo de intersección, se obtuvo que el mayor porcentaje de accidentalidad se presenta en intersecciones semaforizadas con 42,86 %. Por tal motivo, en este artículo se evaluaron las intersecciones semaforizadas presentes en el corredor de la avenida Boyacá (AK 72) entre CL 183 y Autosur (AC 45A Sur).

1. Herramienta que calcula la densidad de las entidades de punto alrededor de cada celda ráster de salida. La función Kernel se basa en la función Kernel cuadrática que se describió en Silverman (1986, p. 76, ecuación 4.5).
2. La densidad Kernel expande la cantidad conocida de la población para cada punto fuera de la ubicación del punto. Las superficies resultantes que rodean a cada punto en la densidad Kernel se basan en una fórmula cuadrada con el valor más alto en el centro de la superficie (la ubicación del punto) y se estrechan hasta cero en la distancia de radio de búsqueda. Para cada celda de salida, se calcula el número total de intersecciones acumuladas de las superficies de expansión individual (ArcGIS Desktop, n.d.).

Tabla 1

ID	Dirección	Composición	Tipo de intersección
1	Av. Boyacá (AK 72) por CL 170	X	SEM
2	Av. Boyacá (AK 72) por CL 153 (Av. Sirena)	X	SEM
3	Av. Boyacá (AK 72) por CL 138 (Av. Camino del Prado)	X	SEM
4	Av. Boyacá (AK 72) por Av. Suba (TV 76)	DESNIVEL	A DESNIVEL
5	Av. Boyacá (AK 72) por CL 128	DOBLE T	PARE
6	Av. Boyacá (AK 72) por CL 127	X	SEM
7	Av. Boyacá (AK 72) por AC 80 (Av. Medellín)	DESNIVEL	A DESNIVEL
8	Av. Boyacá (AK 72) por AC 72 (Av. Chile)	DESNIVEL	A DESNIVEL
9	Av. Boyacá (AK 72) por AC 53	X	SEM
10	Av. Boyacá (AK 72) por AC 24 (Luis Carlos Galán)	DESNIVEL	A DESNIVEL
11	Av. Boyacá (AK 72) por CL 22	T	PARE
12	Av. Boyacá (AK 72) por CL 19	T	PARE
13	Av. Boyacá (AK 72) por AC 17 (Av. Centenario)	DESNIVEL	A DESNIVEL
14	Av. Boyacá (AK 72) por CL 15 o CL 12B	DOBLE T	PARE
15	Av. Boyacá (AK 72) por AC 12 (Av. Alsacia)	X	SEM
16	Av. Boyacá (AK 72) por CL 9	T	SEM
17	Av. Boyacá (AK 72) por CL 8	T	SEM
18	Av. Boyacá (AK 72) por CL 7A	T	PARE
19	Av. Boyacá (AK 72) por AC 6 (Av. de las Américas)	DESNIVEL	A DESNIVEL
20	Av. Boyacá (AK 72) por CL 5A	DOBLE T	PARE
21	Av. Boyacá (AK 72) por AC 3	X	SEM
22	Av. Boyacá (AK 72) por AC 26 SUR (Av. 1.º de Mayo)	DESNIVEL	A DESNIVEL
23	Av. Boyacá (AK 72) por CL 37 SUR	DOBLE T	PARE
24	Av. Boyacá (AK 72) por DG 39 SUR y KR 68M	DOBLE T	PARE
25	Av. Boyacá (AK 72) por CL 39B SUR	X	SEM
26	Av. Boyacá (AK 72) por CL 43A SUR	X	SEM
27	Av. Boyacá (AK 72) por CL 44 SUR	X	SEM
28	Av. Boyacá (AK 72) por AC 45A SUR (Autosur)	DESNIVEL	A DESNIVEL

IDENTIFICACIÓN DE LA HORA DE MÁXIMA ACCIDENTALIDAD DE LAS INTERSECCIONES DE ESTUDIO

De acuerdo con la información suministrada por la SDM, para cada intersección se pudo establecer el número de accidentes que se presentaron en el periodo de análisis; con esto, se identificó la hora en la que se presenta el mayor número de eventos por cada intersección (hora de máxima accidentalidad [HMA]).

Identificación de intersecciones con condiciones de operación similares

Para el desarrollo del estudio se determinó evaluar 25 intersecciones semaforizadas, teniendo en cuenta la

representatividad en la accidentalidad sobre el corredor vial de la avenida Boyacá (AK 72), de acuerdo con una evaluación detallada se determinó que para la modelación y la obtención de los Niveles de servicio (NS), se tomarían intersecciones que cumplieran las siguientes condiciones:

Condición 1

Intersecciones que independiente de su geometría, permitieran movimientos directos en tres de los accesos con los que cuenta. De este modo, las intersecciones que tuvieran detención vehicular únicamente para el paso peatonal se descartarían de la evaluación.

Tabla 2

ID	Nombre de intersección	Año 2016			Año 2017			Total gral.	Número de eventos HMA	HMA
		Con heridos	Con muertos	Sólo daños	Con heridos	Con muertos	Sólo daños			
1	AK 72 por AC 170	7	0	22	5	0	29	63	7	17:00-18:00
2	AK 72 por CL 169B	2	0	2	0	0	2	6	3	23:00-24:00
3	AK 72 por CL 167	1	0	16	7	0	12	36	3	08:00-09:00
5	AK 72 por AC 153	6	0	21	2	1	17	47	6	12:00-13:00
8	AK 72 por AC 138	5	0	20	9	0	22	56	5	06:00-07:00
11	AK 72 por CL 127A	2	0	9	3	0	9	23	4	08:00-09:00
12	AK 72 por AC 127	8	0	19	8	1	23	59	6	16:00-17:00
13	AK 72 por CL 75	1	1	14	8	0	11	35	6	11:00-12:00
14	AK 72 por CL 66A	4	0	8	8	1	10	31	3	09:00-10:00
15	AK 72 por AC 63	5	0	14	10	0	19	48	5	19:00-20:00
16	AK 72 por AC 53	9	1	21	6	0	24	61	7	08:00-09:00
17	AK 72 por AC 12	9	0	38	19	0	39	105	10	12:00-13:00
18	AK 72 por CL 9	8	0	30	8	0	33	79	8	20:00-21:00
19	AK 72 por AC 8	8	0	15	6	0	29	58	7	16:00-17:00
20	AK 72 por DG 3	12	2	15	5	0	12	46	5	06:00-07:00
22	AK 72 por CL 37D S	3	0	6	1	0	2	12	2	08:00-09:00
23	AK 72 por CL 39B S	15	0	18	6	0	15	54	4	16:00-17:00
24	AK 72 por CL 43A S	6	1	8	5	1	6	27	3	08:00-09:00
25	AK 72 por CL 44 S	11	2	10	7	0	20	50	5	20:00-21:00
Total general		122	7	306	123	4	334	896		

Condición 2

Intersecciones cuyos accesos estén controlados por semáforo y no por pasos de prioridad; en este sentido, la intersección de la AK 72 por CL 134 queda descar-

tada, teniendo en cuenta que el acceso occidental no tiene semáforo y el ingreso y salida de este acceso está reglamentado con señal de pare SR-01.

Datos de evaluación
para determinar los NS
en la modelación



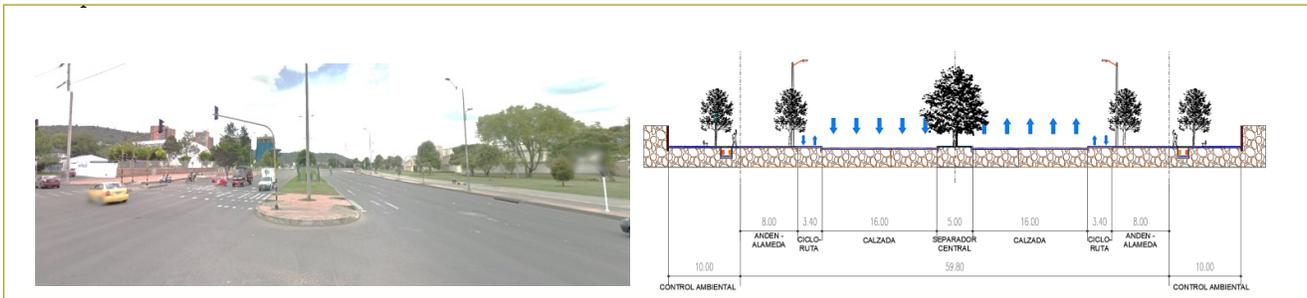


Figura 1. Perfil de la avenida Boyacá (AK 72) entre la AC 170 y la AC 80.

EVALUACIÓN GEOMÉTRICA

La avenida Boyacá entre la calle 183 y la Autosur (AC 45A Sur) tiene una longitud aproximada de 22,8 km, cuenta con 10 pasos a desnivel y 25 intersecciones semaforizadas.

Según el Plan de Ordenamiento Territorial (POT), la avenida Boyacá (AK 72) está clasificada como malla vial arterial principal, al ser una vía de gran jerarquía que actúa como soporte de la movilidad y accesibilidad metropolitana y regional. En la avenida Boyacá, entre la CL 183 y la Autosur, podemos encontrar varios perfiles cuya jerarquía depende de la geometría, el número de calzadas, el número de carriles y de anchos de separador central.

En el correcto desarrollo de actividades de captura de información de campo, se realizan visitas previas a los sectores de análisis para identificar las áreas de influencia y determinar factores que afecten la recolección de información, además de las características particulares de cada intersección, como los anchos de carril, número de calzadas, número de movimientos permitidos, disposición geométrica, condiciones del pavimento, luminosidad y longitudes de recorridos, entre otros, para poder evaluar y plasmar estas condiciones en el modelo en el que se dispondrán las mismas características geométricas para una exacta caracterización de la intersección en el modelo.

VOLÚMENES VEHICULARES

En el marco de la solicitud, la Secretaría Distrital de Movilidad suministró información concerniente a volúmenes vehiculares en ocho intersecciones semaforizadas del año 2016 sobre el corredor de estudio.

En razón de que la información secundaria suministrada por la SDM no cumple con la totalidad de

información relevante para cada una de las intersecciones semaforizadas seleccionadas, se hizo necesario tomar información primaria de volúmenes vehiculares, discriminándolos por tipo de vehículo (livianos, transporte público, camiones y motocicletas), y por los movimientos que tenían cada una de las intersecciones semaforizadas analizadas.

Una vez obtenidos todos los volúmenes vehiculares clasificados por tipo de vehículo y movimiento en la HMA para cada intersección, se establecieron los factores de expansión de 14 a 24 horas para la información secundaria y factores de expansión de 01 a 24 horas para la información primaria a partir de la estación maestra SDM, localizada en el área de influencia del sector, con el fin de expandir a 24 horas la información registrada en la estación de aforo donde se recopiló la información.

Para la toma de información primaria se definió una metodología con la utilización de herramientas tecnológicas por medio de una cámara de video, de la que se obtendrán grabaciones del corredor que permiten registrar, en el lugar de trabajo, el número de vehículos que cruzan.

VOLUMEN VEHICULAR ESTACION MAESTRA: AK_72_X_AC_138					
INTERVALO	LIVIANOS	BUSES	MOTOS	TOTAL CAMIONES	MIXTOS
VOLUMEN 24 HORAS (00:00 - 24:00)	85,115	10,405	12,040	4,446	112,006
Porcentajes vehiculares	75.99%	9.29%	10.75%	3.97%	100.00%

VOLUMEN VEHICULAR ESTACION MAESTRA: AK_72_X_AC_72					
INTERVALO	LIVIANOS	BUSES	MOTOS	TOTAL CAMIONES	MIXTOS
VOLUMEN 24 HORAS (00:00 - 24:00)	150,651	21,693	34,759	7,136	214,239
Porcentajes vehiculares	70.32%	10.13%	16.22%	3.33%	100.00%

VOLUMEN VEHICULAR ESTACION MAESTRA: AK_72_X_AC_17					
INTERVALO	LIVIANOS	BUSES	MOTOS	TOTAL CAMIONES	MIXTOS
VOLUMEN 24 HORAS (00:00 - 24:00)	143,942	29,763	60,116	25,330	259,171
Porcentajes vehiculares	55.54%	11.48%	23.20%	9.77%	100.00%

VOLUMEN VEHICULAR ESTACION MAESTRA: AK_72_X_AC_26 S					
INTERVALO	LIVIANOS	BUSES	MOTOS	TOTAL CAMIONES	MIXTOS
VOLUMEN 24 HORAS (00:00 - 24:00)	118,632	31,069	46,871	13,852	210,424
Porcentajes vehiculares	56.38%	14.76%	22.27%	6.58%	100.00%

Tabla 3

Id	Dirección	Volumen total 24h				
		Autos	Buses	Camiones	Motos	Tpd
1	AK 72 por CL 170	55.379	6.967	5.340	14.480	82.166
2	AK 72 por CL 169B	41.912	4.742	3.714	7.592	57.960
3	AK 72 por CL 167	54.130	3.822	4.782	15.249	77.983
5	AK 72 por AC 153	84.040	6.207	5.180	16.097	111.524
8	AK 72 por AC 138	101.060	6.474	5.431	17.510	130.475
11	AK 72 por CL 127A	106.363	5.830	5.109	16.666	133.968
12	AK 72 por AC 127	97.448	7.168	6.282	41.097	151.995
13	AK 72 por CL 75	112.872	12.310	17.251	23.126	165.559
14	AK 72 por CL 66A	121.854	8.997	8.607	31.692	171.150
15	AK 72 por AC 63	113.125	11.465	12.716	54.317	191.623
16	AK 72 por AC 53	136.385	12.766	8.262	39.132	196.545
17	AK 72 por AC 12	135.465	16.780	11.703	65.324	229.272
18	AK 72 por CL 9	86.880	25.052	16.434	40.405	168.771
19	AK 72 por AC 8	101.477	11.677	8.859	42.069	164.082
20	AK 72 por DG 3	69.186	11.707	14.113	35.632	130.638
22	AK 72 por CL 37D S	72.924	9.830	21.302	29.907	133.963
23	AK 72 por CL 39B S	82.937	11.704	11.287	35.094	141.022
24	AK 72 por CL 43A S	62.646	14.628	16.861	33.099	127.234
25	AK 72 por CL 44 S	72.452	12.552	15.891	39.978	140.873

El equipo de video usado fue una cámara Samsung Gear 360 de 2016, que es un dispositivo especial que emplea dos objetivos para captar una imagen completa de todo lo que le rodea.

se solicitó información a la SDM de los planeamientos semafóricos, la programación automática y los esquemas de la intersección, con el propósito de evaluar particularmente la programación en la HMA de cada intersección.

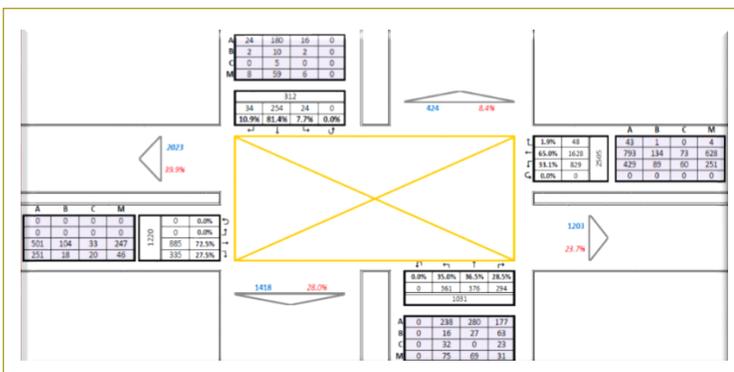
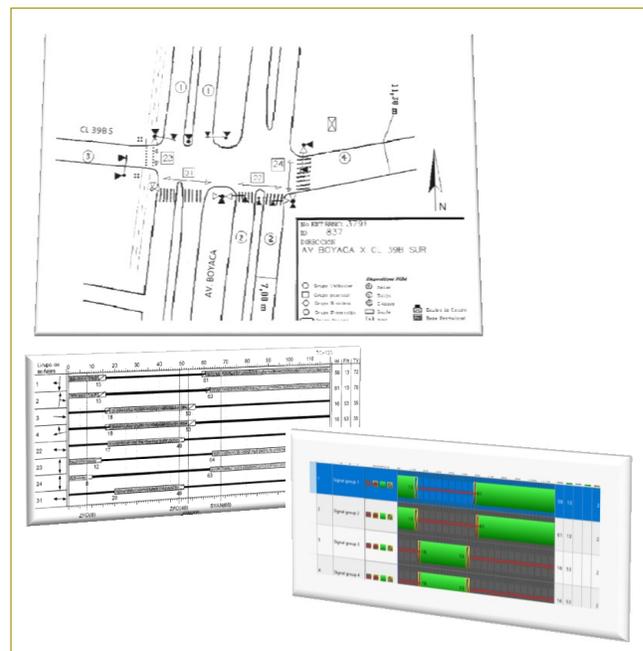


Figura 2. Volúmenes HMA Intersección No 1 - AK 72 por AC 170 – HMA = 17:00-18:00.

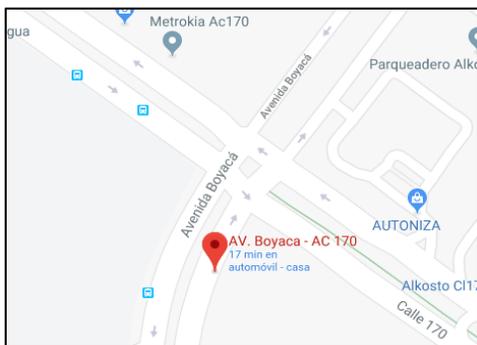
PLANEAMIENTOS SEMAFÓRICOS

Para la modelación de las intersecciones semaforizadas es indispensable el modo de operación de los semáforos en cada uno de los puntos de análisis, por lo cual

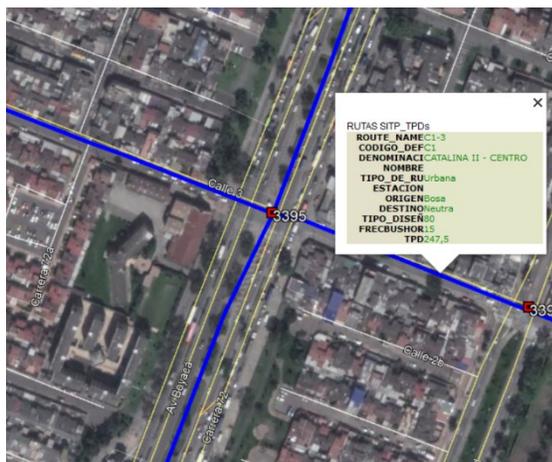


RUTAS Y PARADEROS DEL SITP

Sobre la avenida Boyacá (AK 72) transitan varias rutas de transporte público, las cuales hacen sus paradas en los paraderos existentes para cada una de las intersecciones; con este fin, se solicitaron e identificaron esquemáticamente los paraderos ubicados alrededor de cada intersección, en la que se identificaron el número del paradero, el número y el nombre de rutas que se detienen, los intervalos y las frecuencias.



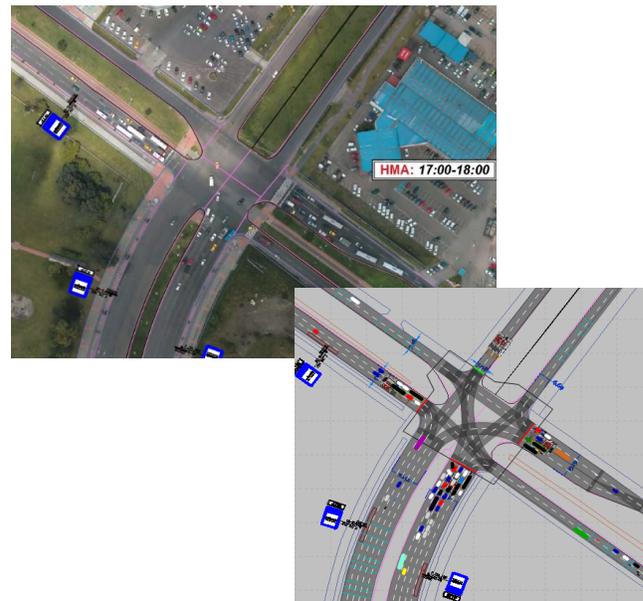
ID PARADERO	RUTA	NAME	INTERVALO	FRECUENCIA
			C/min	Buses/Hora
002A02	165	Arborizadora Alta	8	8
	607	San Antonio Norte	5	12
	742	Calle 222	7	9
	E60	Bosa Palestina	5	12
	Z13	Metrovienda	16	4
TOTAL			45	



MODELACIÓN DE LAS INTERSECCIONES SEMAFORIZADAS

La elaboración y el análisis de resultados de la microsimulación mediante el *software* Vissim 9.00 se hicieron a partir de la modelación, en la cual se estructuraron matrices origen-destino de viajes con un nodo (evaluando todo el cruce vial); dicha modelación desagregada se hizo por tipo de vehículo (liviano, bus, pesado y motocicleta), lo cual permite caracterizar correctamente el comportamiento vehicular sobre el área de influencia de la intersección. Esto fue posible a partir del uso de la información primaria recolectada.

Como una buena práctica dentro del proceso de modelación se incluyó una precarga entre el segundo 0 y el 900, y se evaluó un periodo de una hora desde el segundo 900 y el 4500, para correr posteriormente cinco veces el modelo y calibrarlo, con el objeto de simular el comportamiento habitual de la intersección y poder hallar los parámetros necesarios (demoras) para establecer los niveles de servicio de cada intersección semaforizada de estudio.



Vehicle Network Performance Evaluation Results															
Coun	SimRun	Timelnt	DelayAvg(All)	StopsAvg(All)	SpeedAvg(All)	DelayStopAvg(All)	DistTot(All)	TravTmTot(All)	DelayTot(All)	StopsTot(All)	DelayStopTot(All)	VehAct(All)	VehArr(All)	DelayLatent	DemandLatent
1	1	900-450	33,61	0,98	32,03	18,08	9754,59	1096471,80	376146,60	10970	202268,54	251	10939	382,60	0,00
2	2	900-450	33,62	0,99	31,98	18,14	9725,24	1094900,80	375905,74	11050	202789,26	298	10883	402,20	1,00
3	3	900-450	33,55	0,94	32,03	18,41	9741,76	1095067,40	375210,95	10476	205936,60	276	10909	361,00	0,00
4	4	900-450	34,24	0,97	31,81	19,00	9745,39	1103017,20	383021,13	10896	212569,84	259	10926	433,00	0,00
5	5	900-450	35,05	1,05	31,52	19,40	9737,20	1112045,60	392284,19	11700	217084,19	292	10900	579,00	0,00
6	Average	900-450	34,02	0,98	31,87	18,61	9740,84	1100300,56	380513,72	11018	208129,69	275	10911	431,56	0,20
7	Standard	900-450	0,64	0,04	0,22	0,58	10,81	7357,46	7301,64	441	6472,65	20	22	86,57	0,45
8	Minimu	900-450	33,55	0,94	31,52	18,08	9725,24	1094900,80	375210,95	10476	202268,54	251	10883	361,00	0,00
9	Maximu	900-450	35,05	1,05	32,03	19,40	9754,59	1112045,60	392284,19	11700	217084,19	298	10939	579,00	1,00

$$GEH = \sqrt{\frac{(E - V)^2}{(E + V)/2}}$$

Donde: *GEH* : Indicador estadístico

E : Volumen estimado modelo.

V : Volumen medido en campo.

Criterio de Mediciones (Valores modelados versus observados)	Aceptación de Calibración	Comentarios / Fuente
Flujo de Arcos Individuales	> 85% de casos	FHWA (2004)
Dentro de 100 Veh/h para flujos < 700 Veh/h	> 85% de casos	
Dentro de 15% para 700 < flujos < 2700 Veh/h	> 85% de casos	
Dentro de 400 Veh/h para flujos > 2700 Veh/h	> 85% de casos	
Suma de todos los flujos por arco	Precision = 5%	
Estadístico GEH* < 5 para flujos por arco individual	> 85% de casos	
Estadístico GEH* para suma sobre flujos de arco	< 4	

No.	PUNTO - ARCO	MOVIMI ENTO	FLUJO VEHICULAR OBSERVADO	FLUJO VEHICULAR MODELADO	CALIBRACIÓN GEH		CALIBRACIÓN FLUJOS		
					GEH	ACEPTACIÓN	INT. 1	INT. 2	INT. 3
1	AK 72 x AC 170	1	254	249	0,3	1	1	-	-
2		5	24	22	0,4	1	1	-	-
3		91	34	33	0,2	1	1	-	-
4		101	0	0	-	-	1	-	-
5		2	376	369	0,4	1	1	-	-
6		6	361	347	0,7	1	1	-	-
7		92	294	266	1,7	1	1	-	-
8		102	0	0	-	-	1	-	-
9		3	885	877	0,3	1	-	1	-
10		7	0	0	-	-	1	-	-
11		93	335	320	0,8	1	1	-	-
12		103	0	0	-	-	1	-	-
13		4	1.628	1.602	0,6	1	-	1	-
14		8	829	834	0,2	1	-	1	-
15		94	48	49	0,1	1	1	-	-
16		104	0	0	-	-	1	-	-

5.068	4.968	1,4	100%	100%	100%	-
TOTAL OBSERVADO	TOTAL MODELADO	GEH	% ACEPTACIÓN	% ACEPTACIÓN INT. 1	% ACEPTACIÓN INT. 2	% ACEPTACIÓN INT. 3

2%
ERROR

1	Flujos de arcos individuales
2	Suma de todos los flujos por arco
3	GEH para flujos por arco individual
4	GEH para suma sobre flujos de arco

CALIBRACIÓN DE LA MODELACIÓN

El proceso de calibración consistió en una secuencia de asignaciones de la matriz origen-destino de viajes-vehículo sobre la red vial, hasta ajustar los flujos asignados a los que se dispone en los puntos de aforo.

Para la validación del modelo se adoptaron los nodos en cada una de las intersecciones de las que se disponía de información real del flujo de vehículos en el periodo de máxima accidentalidad, los cuales se contrastan con los resultados obtenidos por el modelo de microsimulación.

IDENTIFICACIÓN DE LA CORRELACIÓN ENTRE LOS NIVELES DE SERVICIO Y LOS DATOS DE ACCIDENTALIDAD

De acuerdo con la consolidación de la información, a continuación (tabla 4) se muestran los resultados del índice de severidad y los niveles de servicio para cada una de las intersecciones semaforizadas evaluadas.

Como evaluación primaria para la correlación, se hicieron histogramas para evaluar el comportamiento de las líneas de tendencia entre los IS y NS; tomando en cuenta los datos previamente evaluados, se pudo evidenciar que no hay una relación directa de acuerdo

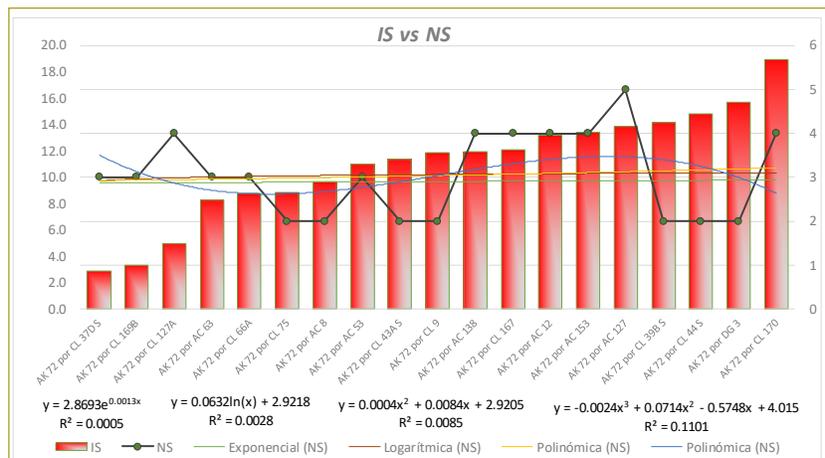
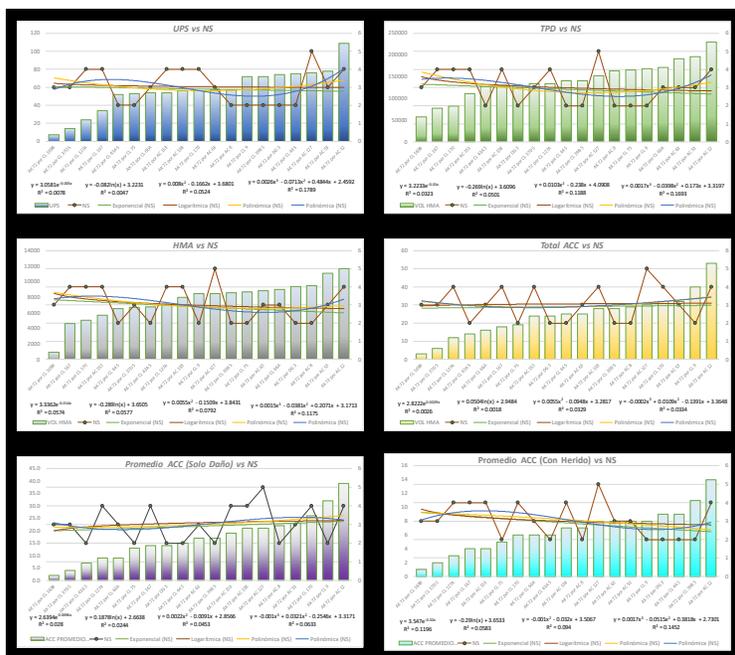


Tabla 4

N.º	Dirección	ACC promedio sólo daños	ACC promedio con heridos	ACC promedio con muertos	Total ACC	UPS	TPD	IS	NS
1	AK 72 por CL 170	26	6	0	32	56	82166	18.9	4
2	AK 72 por CL 169B	2	1	0	3	7	57960	3.4	3
3	AK 72 por CL 167	14	4	0	18	34	77983	12.1	4
5	AK 72 por AC 153	19	4	1	24	54	111524	13.5	4
8	AK 72 por AC 138	21	7	0	28	56	130475	11.9	4
11	AK 72 por CL 127A	9	3	0	12	24	133968	5.0	4
12	AK 72 por AC 127	21	8	1	30	76	151995	13.9	5
13	AK 72 por CL 75	13	5	1	19	53	165559	8.9	2
14	AK 72 por CL 66A	9	6	1	16	54	171150	8.8	3
15	AK 72 por AC 63	17	8	0	25	57	191623	8.3	3
16	AK 72 por AC 53	23	8	1	32	78	196545	11.0	3
17	AK 72 por AC 12	39	14	0	53	109	229272	13.2	4
18	AK 72 por CL 9	32	8	0	40	72	168771	11.9	2
19	AK 72 por AC 8	22	7	0	29	57	164082	9.6	2
20	AK 72 por DG 3	14	9	1	24	74	130638	15.7	2
22	AK 72 por CL 37D S	4	2	0	6	14	133963	2.9	3
23	AK 72 por CL 39B S	17	11	0	28	72	141022	14.2	2
24	AK 72 por CL 43A S	7	6	1	14	52	127234	11.4	2
25	AK 72 por CL 44 S	15	9	1	25	75	140873	14.8	2

* Los IS se clasificaron en relación con el NS, en el que el más alto está dado por el número 1 y el más bajo por el número 6 (NS:1=NS:A).



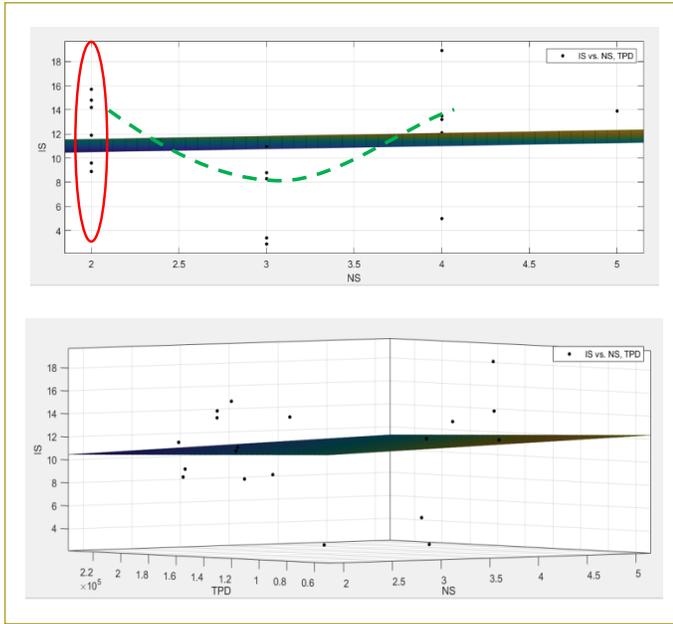
con los IS y los NS, debido a que a medida que los IS aumentan, el comportamiento de los NS no mejora; esto significa que los NS y el IS no son directamente proporcionales.

Adicionalmente, se efectuó una segunda evaluación en la que se realizaron histogramas para que se relacionaran varios factores de evaluación (IS, UPS, TPD, volumen vehicular en la HMA, número de eventos de accidentalidad, promedio de accidentes con herido y promedio de accidentes con sólo daño) con los NS, en los que se evidenció que, al igual que el IS, no hay una tendencia matemática simple que logre correlacionar, de tal modo que no se observó una tendencia directa entre los factores, según la información analizada.

Todos los factores analizados se evaluaron por medio de tendencias exponenciales, logarítmicas y polinómicas de primero y segundo orden, en las que el valor de R² no superó el 0,20, lo que indica la gran dispersión de datos, sin una clara tendencia de relación.

EVALUACIÓN MULTIMODAL DE LOS DATOS GENERADOS

Con el propósito de hacer un análisis más detallado se realizó una evaluación multivariable con la ayuda de la herramienta *software* Matlab, cuyo entorno de cálculo técnico de altas prestaciones para cálculo numérico y visualización permitió hacer un análisis numérico de las variables utilizadas.

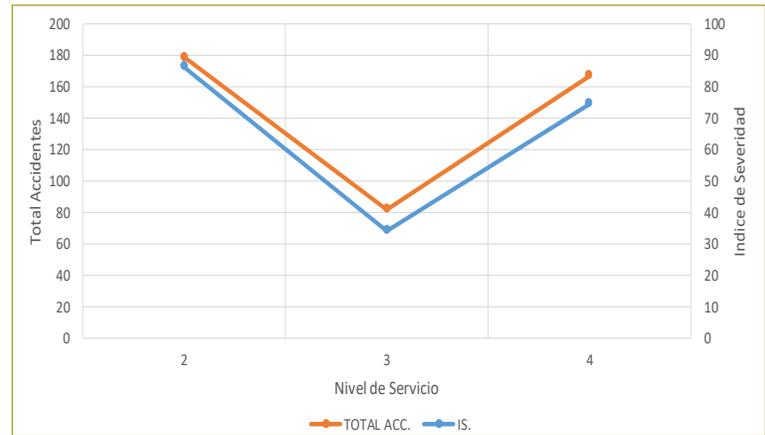


En el análisis se mostró una tendencia, la cual expresa que para un NS = C se genera el menor número de accidentes de tránsito, mientras que para los demás niveles el número de eventos de accidentalidad se tienden a incrementar.

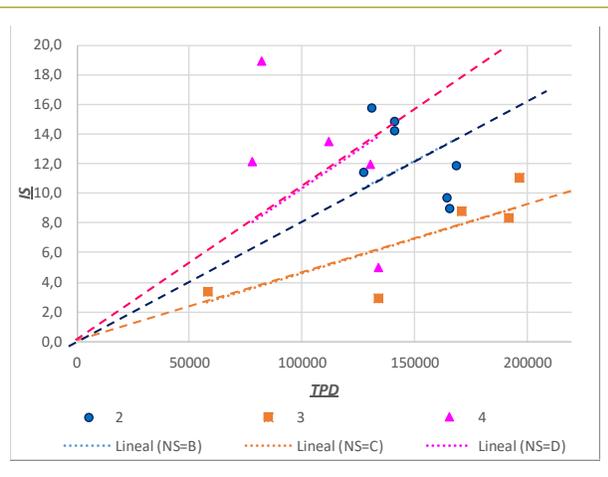
Al analizar los datos independientemente para cada NS, se demuestra la tendencia de datos evaluada ante-

riormente. En el gráfico se discriminan los datos, lo que da como dato independiente el TPD, mientras que el IS sería la variable dependiente. Así, se evidencia que en el NS = C, al tener los mayores TPD, son menores en comparación con los NS = B y D.

De acuerdo con los datos obtenidos, se hizo una evaluación conjunta que permitió evidenciar que mientras las intersecciones se encuentren en un NS = C, los índices de severidad y el número de accidentes se mantienen más bajos; dicho comportamiento para un NS = B sería la condición más crítica, debido a que al presentarse este nivel las tasas de IS y el número de accidentes son los más elevados, según la evaluación de las intersecciones semaforizadas sobre el corredor vial arterial de la avenida Boyacá.

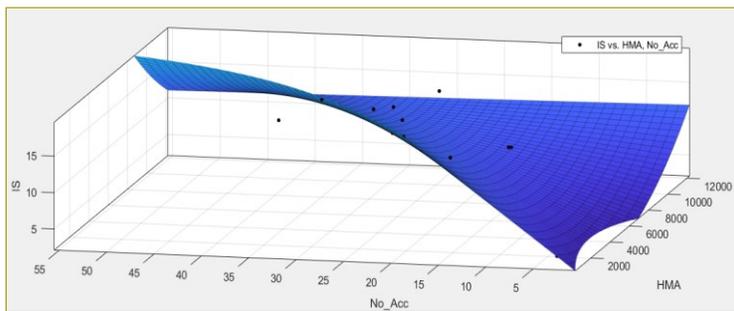


Dirección:	TOTAL ACC	TPD	IS	NS
AK 72 por CL 43A S	14	127234	11.4	2
AK 72 por DG 3	24	130638	15.7	2
AK 72 por CL 44 S	25	140873	14.8	2
AK 72 por CL 39B S	28	141022	14.2	2
AK 72 por AC 8	29	164082	9.6	2
AK 72 por CL 75	19	165559	8.9	2
AK 72 por CL 9	40	168771	11.9	2
AK 72 por CL 169B	3	57960	3.4	3
AK 72 por CL 37D S	6	133963	2.9	3
AK 72 por CL 66A	16	171150	8.8	3
AK 72 por AC 63	25	191623	8.3	3
AK 72 por AC 53	32	196545	11.0	3
AK 72 por CL 167	18	77983	12.1	4
AK 72 por CL 170	32	82166	18.9	4
AK 72 por AC 153	24	111524	13.5	4
AK 72 por AC 138	28	130475	11.9	4
AK 72 por CL 127A	12	133968	5.0	4



IDENTIFICACIÓN DEL IS CON INFORMACIÓN BÁSICA

Con el objeto de generar un análisis más rápido en cuanto a la información primaria se utilizó el *toolboxes* “Curve Fitting Tool”, del *software* Matlab, en la que se estimó una fórmula polinomial, de acuerdo con los datos obtenidos en el desarrollo del trabajo para generar una ecuación empírica que facilite la obtención del índice de severidad a partir de la medición preliminar de los factores asociado al volumen vehicular en la hora de máxima accidentalidad y el número de eventos de accidentalidad presentados en una intersección semaforizada, aplicable a modo genérico en todas la intersecciones viales reguladas por semáforo de la ciudad de Bogotá.



Al calcular las líneas de tendencia para ecuación lineal su R cuadrado es igual a 0,70, lo cual indica que las líneas de tendencia tienen una relación confiable, con respecto a las variables de cálculo, para un estudio académico.

$$IS = 2,018 - 0,001094 (\text{Vol HMA}) + 0,9973 (\text{N}^\circ \text{acc.}) + [(1,551 \times 10^{-07}) \times (\text{Vol HMA})^2] - [(8,261 \times 10^{-05}) \times (\text{Vol HMA}) \times (\text{N}^\circ \text{acc.})]$$

CONCLUSIONES

1. La metodología empleada para la determinación de volúmenes vehiculares a través de registro por video resultó bastante favorable para una evaluación de una hora, debido al ahorro en recursos y a que las labores en campo las puede hacer una sola persona, así como el trabajo de oficina; esto trae consigo un alto grado de certeza en la posterior evaluación de volúmenes, ya que se puede verificar la información o detallar periodos atípicos en los resultados.
2. Se pudo establecer que con los NS=C en las intersecciones semaforizadas se reducen tanto el número de eventos como el índice de severidad. Según los datos obtenidos, el nivel de servicio = B y D incrementa los índices de severidad en las intersecciones, lo cual nos permitiría concluir que debemos mantener las condiciones de operación en nivel C, para disminuir la accidentalidad asociada por altas velocidades generadas a flujo libre de niveles A y B, como también las condiciones de congestión presentes en los niveles D y E, donde el número de eventos simples se incrementa al observarse una reducción en la distancia de seguridad y en el cambio continuo de carriles.
3. Si bien los usuarios pueden calificar el nivel de servicio B como más favorable que el nivel C, porque circula a flujo libre, se debe analizar en detalle esta condición para definir la conveniencia de generar en algunos periodos este nivel de servicio, porque acorde con el estudio realizado, al proveer un mejor nivel de servicio se aumenta el riesgo, reflejado en un mayor número de accidentes de tránsito.
4. De acuerdo con los datos obtenidos en este trabajo pudimos estimar una fórmula matemática en la que se obtienen los índices de severidad a partir de dos variables fácilmente medibles o de fácil obtención, como el volumen vehicular en la hora de máxima accidentalidad y el número de accidentes que se presenta en la HMA evaluada; dicha formulación tiene un coeficiente de determinación (R^2) = 0,70, en el que para fines académicos es un ajuste apropiado, puesto que las líneas de tendencia tienen una relación confiable con respecto a las variables de cálculo.
5. Es conveniente proseguir con la investigación evaluando un mayor número de intersecciones que permita validar los resultados obtenidos, para adoptar medidas tendientes a reducir la accidentalidad.
6. Es viable que en el futuro de otras investigaciones se desarrolle una evaluación de estas mismas intersecciones, de manera que se obtenga una hora de máxima accidentalidad general para todo el corredor vial. Esta hora de máxima accidentalidad se evalúa con el cálculo de UPS y no sólo por medio del número de eventos, y que se obtengan igualmente los factores de estudio de este proyecto, así como que se modele no por intersecciones independientes sino mediante una red; esto con el fin de evaluar si existe una correlación directa de la accidentalidad con otros factores del tránsito, como el nivel de servicio.

REFERENCIAS

- ArcGIS Desktop (s.f.). Las diferencias entre densidad Kernel, de línea y de punto. Ayuda | ArcGIS Desktop. Recuperado el May 14, 2018, from <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/tool-reference/spatial-analyst/differences-between-point-line-and-kernel-density.htm>.
- Cal y Mayor Reyes Spíndola, R., & Cárdenas Grisales, J. (2007). *Ingeniería de tránsito: fundamentos y aplicaciones*. México, D.F.: Alfaomega. Recuperado de <https://es.scribd.com/document/287369051/Ingenieria-de-Transito-Fundamentos-y-Aplicaciones>.
- Carmen, D., Ivorra, D., Félix, J., Ignacio, J., Prieto, F., Carrión, T. P., ... Cremades, E. S. (2002). *Influencia de la geometría en la determinación de los puntos de conflicto en una intersección de viales*. Santander, España. Recuperado de <https://personal.ua.es/es/roberto-tomas/documentos/influencia-de-la-geometria-en-puntos-de-conflicto-de-intersecciones-ingegraf-badajoz.pdf>.
- Chias Becerril, L. (s.f.). *Diagnóstico espacial de los accidentes de tránsito*. Recuperado de http://www.institutoivia.com/cisevponencias/analisis_accidentes_aa/Luis_Chias.pdf.
- Manual de planeación del tránsito* (s.f.). Tomo III. Capítulo 3. Capacidad y niveles de servicio, flujo discontinuo.
- Ministerio de Transporte (2015). *Plan Nacional de Seguridad Vial Colombia 2011-2021*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>.
- Molina Cifuentes, M. T. (2015). *Análisis de puntos críticos y puntos de riesgo*.
- Organización Mundial de la Salud (2015). *Informe sobre la situación mundial de la seguridad vial 2015*.
- Secretaría Distrital de Movilidad (2015). *Movilidad en cifras 2015*. Recuperado de <http://www.simur.gov.co/SimurVisorBoletinWA/2016.pdf>.
- Secretaría Distrital de Movilidad (2017). *Observatorio de Movilidad 2017*.
- Secretaría Distrital de Planeación (2007). *Anexo perfiles viales cartilla de andenes*. Recuperado de http://www.construdata.com/BancoMedios/Documentos PDF/perfiles_en_baja3.pdf?Id_MenuItem=172.
- TRB (2010). *Highway Capacity Manual*.
- Zúñiga Alarcón, V. I. (2010). *Uso de herramientas de microsimulación para la definición de estrategias de control de tránsito para la ciudad de Santiago*. Santiago de Chile. Recuperado de http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/103923/cf-zuniga_va.pdf?sequence=3&isAllowed=y<c.

Evaluación del efecto del cambio climático en la hidrología superficial de la cuenca hidrográfica del lago de Tota (Boyacá)

Evaluation of climate change effects on superficial hydrology of hydrographic basin lake Tota (Boyacá)

JUAN SEBASTIÁN BARRERA SARMIENTO¹ - GERMÁN EDUARDO ACERO RIVEROS²

1. Magíster en Ingeniería Civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Bogotá (Colombia).
2. M.Sc. en Recursos Hidráulicos. profesor investigador del Centro de Estudios Hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Bogotá (Colombia).

juan.barrera-s@mail.escuelaing.edu.co – german.acero@escuelaing.edu.co

Recibido: 15/05/2020 Aceptado: 15/07/2020

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

Resumen

La cuenca del lago de Tota es la principal fuente abastecedora de recursos hídricos para la provincia de Sugamuxi, del departamento de Boyacá (Colombia); suministra agua potable para cerca de 250.000 personas, y surte distritos de riego, industrias y otras actividades económicas de la región.

La cuenca, considerada de alta montaña, se encuentra rodeada por el complejo de páramos Tota-Bijagual-Mamapacha, un ecosistema estratégico por sus servicios ambientales, especialmente la provisión y regulación hídrica, vulnerable ante la incertidumbre de la afectación que pueda traer el cambio climático a sus servicios ecosistémicos. Frente a este problema, se busca determinar cómo afectaría el calentamiento global la hidrología superficial de los caudales de subcuencas instrumentadas, así como la disponibilidad de recurso hídrico a mediano plazo (2020-2049).

Con series de datos de estaciones hidrológicas y climáticas del Instituto de Meteorología, Hidrología y Estudios Ambientales (Ideam) que se encuentran en la cuenca y su zona de influencia, se calibró y validó un modelo hidrológico precipitación-escorrentía basado en la contabilidad de humedad del suelo con el programa HEC-HMS, en las subcuencas del río Hato Laguna, quebrada Los Pozos y río Olarte. Mediante el modelo Autorregresivo de Media Móvil (ARMA p, q) se calcularon posibles cambios de temperatura y precipitación de cada subcuenca, lo que generó el primer escenario de cambio climático, denominado ES1, a la vez que se definieron los escenarios ES2 y ES3 a partir del ensamble multiescenario y RCP 8.5 del informe *Escenarios de cambio climático para precipitación y temperatura para Colombia 2011-2100*, del Ideam.

Se concluye que la oferta hídrica no se verá afectada por el cambio climático global, puesto que se esperan incrementos entre el 5 y 30 % de la precipitación en las subcuencas analizadas, lo que incrementaría los caudales entre un 3 y 37 %, dependiendo del escenario. Por medio del cálculo del índice de retención y regulación hídrica (IRH) se observó que las subcuencas Hato Laguna y Olarte tendrían menor capacidad de regulación, mientras que en la quebrada Los Pozos este indicador mejoraría. Sin embargo, de acuerdo con los resultados obtenidos se observan crecidas de caudal de mayor magnitud que podrían impactar negativamente la agricultura, la industria piscícola y las vías de la región. Así mismo, el incremento de la temperatura aumentaría las pérdidas por evapotranspiración, situación que a largo plazo reduciría el caudal base en temporadas secas de las corrientes que abastecen el lago de Tota.

Palabras claves: modelación hidrológica, cambio climático, recurso hídrico, páramo, lago de Tota.

Abstract

The Lake Tota basin is the principal provider of hydric resources for the Sugamuxi region, department of Boyacá (Colombia), it supplies drinking water for almost 250,000 people, and supplies irrigation districts, industries, and several economic activities of the area.

The basin is considered as a high-altitude mountain, surrounded by Tota-Bijagual-Mamapacha moorland complex, a strategic ecosystem that provides environmental services like hydric provision and regulation, vulnerable to affectation uncertainty that might have climate change on its ecosystem services. Regarding this problematic, the objective is

to determine the effects of global warming on instrumented subbasins superficial hydrology flow, as availability of hydric resources in the medium term (2020-2049).

Data series from the Institute for Meteorological, Hidrological and Environmental Studies (Ideam in Spanish) of the basin and influential zone were acquired, to calibrate and validate the Precipitation – Run-off model on HEC-HMS software based on soil moisture accounting methodology, for Hato Laguna river, Los Pozos creek and Olarte river subbasins. Trough Auto Regressive and Mobile Average Model (ARMA, p, q), probable changes in temperature and precipitation were calculated, to assign the first climate change scenario, denominated ES1; at the same time, scenarios ES2 and ES3 were defined from multi-scenario assemble and RCP 8.5 of Climate change scenarios for precipitation and temperature in Colombia 2011-2100, report of Ideam.

In conclusion, hydric offer would not be negatively affected by global climate change, as precipitation increments around 5 % - 30 % are expected on analyzed subbasins, increasing flow in range 3 % - 37 % depending of the scenario. Through Regulation and Retention Hydric Index (IRH) it was observed that Hato Laguna and Olarte subbasin would loss regulation capability, while Los Pozos creek would improve this index. Nevertheless, according to this study results, floods flow will have greater magnitudes impacting negatively agriculture, fish farms, and roads of the region. Increase in temperature also intensifies Evapotranspiration losses, that in long term will reduce dry seasons baseflow of watercourses that reaches Lake Tota.

Keywords: hydrological modeling, climate change, hydric resources, páramo, lake Tota.

INTRODUCCIÓN

Los páramos son ecosistemas tropicales de alta montaña únicos de Suramérica, de los cuales Colombia posee cerca del 50 %, mientras el resto está repartido en Ecuador, Venezuela, Perú y Costa Rica. Se encuentran en altitudes entre 3000 y 4900 msnm, por lo que el clima tiende a ser extremo debido a la fuerte radiación solar en el día y la baja temperatura en la noche (Llambí, Soto, Celleri et al., 2012; Buytaert et al., 2006). Estos ecosistemas se componen principalmente de vegetación arbustiva baja, y están adaptados para retener agua y resistir las variaciones de temperatura, ya que sus hojas son gruesas y con vellos o pelusa que los protegen del frío y la evapotranspiración (Valencia & Tobón, 2017).

La biodiversidad del ecosistema es bastante grande, pues existen alrededor de 154 especies de aves, 90 especies de anfibios, 70 especies de mamíferos y más de 3400 especies de plantas (Salamanca, Botía & Ardila, 2008). La hidrología del ecosistema es muy variada, ya que se encuentran páramos muy húmedos, con precipitaciones cercanas a los 3000 mm, como en la cordillera Occidental de Colombia, o páramos más secos, con menos de 700 mm de lluvia por año en re-

giones centrales de Ecuador (Buytaert et al., 2006). Por lo general, las lluvias tienden a ser de baja intensidad y larga duración, aun cuando también hay fenómenos de precipitación horizontal en los que la vegetación capta humedad de la niebla, la cual es poco considerada en estudios hidrológicos (Llambí et al., 2012; Buytaert, Celleri, De Bièvre & Cisneros, 2010).

El agua de escorrentía en páramos es generalmente subsuperficial, que corresponde al aporte del agua que, gracias a la capacidad de almacenamiento e infiltración del suelo andosol, caracterizado por estructuras porosas que facilitan la infiltración, permiten retener humedad y saturar el suelo por encima del 80 % de volumen, que escurre posteriormente de las laderas por gravedad, hasta encontrar una capa impermeable de roca y llegar a los arroyos y quebradas (Llambí et al., 2012). La evapotranspiración tiende a ser baja en épocas de lluvias, pero no varía mucho en temporadas secas por las adaptaciones de la vegetación, lo que, sumado al tipo de suelo y demás condiciones climáticas, propicia que la escorrentía tenga un alto y sostenido flujo base (Buytaert, Celleri, De Bièvre & Cisneros, 2010).

La principal característica de los páramos son sus servicios ecosistémicos, como preservación de biodiversidad, almacenamiento de carbono y especialmente provisión y regulación hídrica, que permiten un balance natural de almacenamiento en temporadas lluviosas y liberación de agua en temporadas secas (Vásquez & Buitrago, 2011). El rendimiento hídrico de las cuencas de páramo, es decir, el volumen de agua lluvia que se convierte en caudal superficial, oscila entre 60 y 70 %, por lo que se le considera un ecosistema estratégico para Colombia, pues el 70 % del agua que consumen las ciudades de la zona andina proviene de los páramos (Vásquez & Buitrago, 2011; Llambí et al., 2012).

El ecosistema de páramo ha sido impactado por actividades humanas como la agricultura, la ganadería extensiva, la minería, la deforestación y, más recientemente, el cambio climático (Franco, Delgado & Andrade, 2013). El cambio climático es el resultado del fenómeno de efecto invernadero que atrapa radiación calorífica del Sol por medio de los gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera terrestre, como H₂O, CO₂ y CH₄ (Adedeji, Reuben & Olatoye, 2014).

No obstante, la actividad humana ha incrementado los niveles de CO₂ de 280 a más de 400 partes por millón desde mediados del siglo XIX, calentando la

atmósfera y elevando la temperatura ambiente (IPCC, 2014). El cambio climático repercutirá en los recursos hídricos en todo el mundo, pues se ha observado que a medida que se incrementa la temperatura global del aire se derriten las capas polares, sube el nivel del mar, se hacen más frecuentes inundaciones y sequías, se disminuye la precipitación en algunas zonas geográficas y se incrementa en otras, aumenta la evapotranspiración y se presentan **más problemas de calidad** del agua y de acceso a ésta, entre otros inconvenientes (Adedeji, Reuben & Olatoye, 2014; IPCC, 2014).

En Colombia, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam) ha alertado que la temperatura promedio del aire en el país se incrementará en 1,4 °C para el periodo 2011-2040, en 2,4 °C para 2041-2070 y en 3,2 °C para el 2071-2100, con respecto al periodo de referencia (1976-2005). Además, a lo largo del siglo XXI, los volúmenes de precipitación decrecerían entre un 15 y 36 % para amplias zonas de las regiones Caribe y Andina, y se incrementarían en más del 20 % en el centro de la región Andina y en el norte de la región Pacífica (Ideam et al., 2017).

Cuerpos de agua como los humedales altoandinos son especialmente vulnerables al cambio climático por varios factores, entre éstos ubicación geográfica, régimen hidrológico, capacidad de regulación, estabilidad, humedad del suelo y coberturas vegetales (Franco, Delgado & Andrade, 2013). Adicionalmente, variaciones climáticas como los fenómenos de El Niño y La Niña provocan un déficit y un exceso de lluvias, respectivamente, en zonas montañosas andinas, y como producto del calentamiento global se espera que se incrementen la intensidad y la duración de periodos secos en los páramos (Buytaert, Celleri, De Bievre & Cisneros, 2010; Ruiz, Moreno, Gutiérrez & Zapata, 2008).

Ante la incertidumbre de los efectos del cambio climático sobre los recursos hídricos superficiales de las cuencas de los páramos se decidió modelar el fenómeno de precipitación-escorrentía de la cuenca hidrográfica del lago de Tota, la cual se encuentra rodeada por el complejo de páramos Tota-Bijagual-Mamapacha y aporta una gran cantidad de los recursos hídricos que alimentan el espejo de agua, el principal lago natural de Boyacá y el que tiene mayor volumen de agua en Colombia (Conpes, 2014). La modelación hidrológica es una representación simplificada de un sistema, por lo que los modelos hidrológicos tratan de entender y

representar los parámetros que describen el comportamiento del agua en una cuenca hidrográfica (Devia, Ganasri & Dwarakish, 2015).

Los modelos hidrológicos se pueden dividir en estocásticos y determinísticos, basados en la aleatoriedad de los datos, o en empíricos, conceptuales y físicos, fundamentados en el proceso descriptivo (Singh, 2018). Normalmente, se utilizan programas computacionales para modelar las cuencas hidrográficas, los cuales son agregados como SCS-CN, Ihacres o Watlbal, semidistribuidos como WaSiM, HEC-HMS o Topmodel, y distribuidos como Watflood o Hydrotel (Singh, 2018). Estos modelos se pueden emplear para predecir diferentes fenómenos y comportamientos hidrológicos ante cambios en el suelo, cobertura vegetal, actividades antrópicas y, sobre todo, cambios climáticos.

Precisamente, este trabajo de investigación se hizo por lo descrito con anterioridad, con el fin de determinar la magnitud de los cambios en la disponibilidad (oferta) y permanencia (regulación) de caudales superficiales en esta importante región.

RESULTADOS

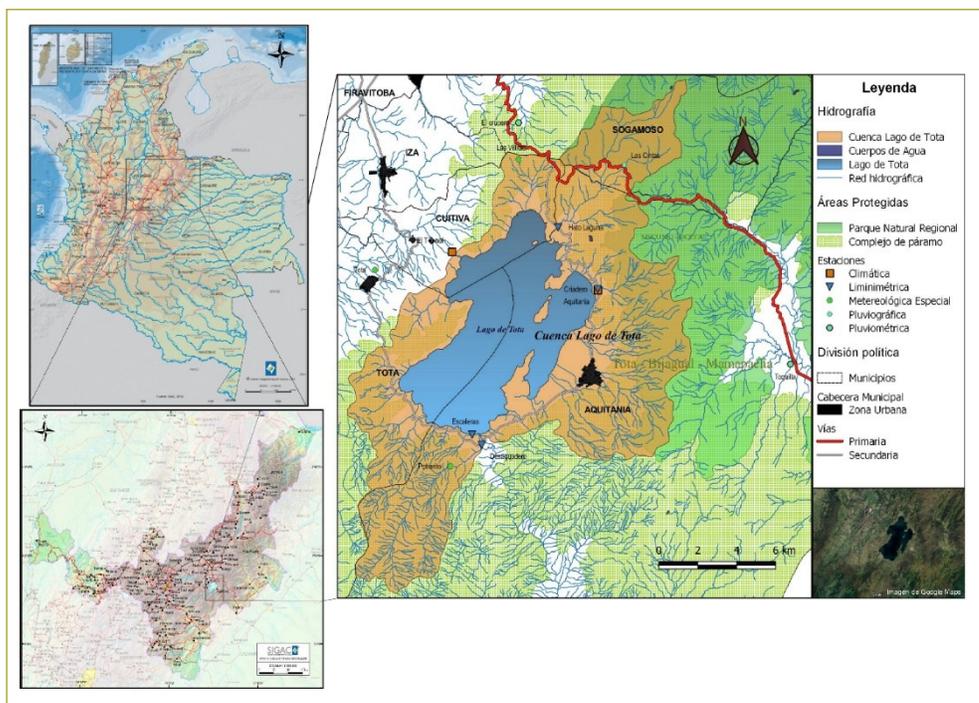
La cuenca del lago de Tota se encuentra localizada en los municipios de Aquitania, Cuítiva, Tota y Sogamoso, pertenecientes al departamento de Boyacá (Colombia). Cuenta con un área de 22.370 ha, a una altura entre 3015 y 3890 msnm; su cuerpo de agua principal es el lago de Tota, que tiene un área superficial de 55 km² y un volumen de almacenamiento aproximado de 1650 Mm³ (Conpes, 2014). La cuenca se encuentra rodeada en sus partes altas por 12.944 ha del complejo de páramos Tota-Bijagual-Mamapacha, una extensión que corresponde al 57 % de la cuenca. La localización geográfica de la cuenca se muestra más adelante (figura 1).

Modelación hidrológica

Para simular el proceso de precipitación-escorrentía de la cuenca se optó por utilizar el programa HEC-HMS 4.1.1, del cuerpo de marina de Estados Unidos (Hydrological Engineering Center, 2018), y mediante el método contabilidad de humedad del suelo (*Soil Moisture Accounting*) (figura 2) se realizó la modelación hidrológica de las subcuencas instrumentadas de la cuenca del lago. Para alimentar el modelo se obtuvo información hidro-

Figura 1. Ubicación geográfica de la cuenca del lago de Tota.

Fuente: Composición hecha a partir de cartografía del IGAC (2012) y Corpoboyacá (2016).



climatológica obtenida por medio de series del banco de datos del Ideam (Ideam, 2020). En la cuenca del lago de Tota hay activas cinco estaciones pluviométricas y climatológicas y tres que se encuentran en la zona de

influencia por su cercanía. En cuanto a las estaciones limnimétricas, existen tres en corrientes tributarias: una que mide la salida del lago y dos que miden el nivel del lago. Más adelante se resumen las principales características de estas estaciones (tabla 1). Dado que sólo existe información de caudal en tres subcuencas del lago, se modela la escorrentía superficial de las corrientes Hato Laguna, Olarte y Los Pozos, únicamente.

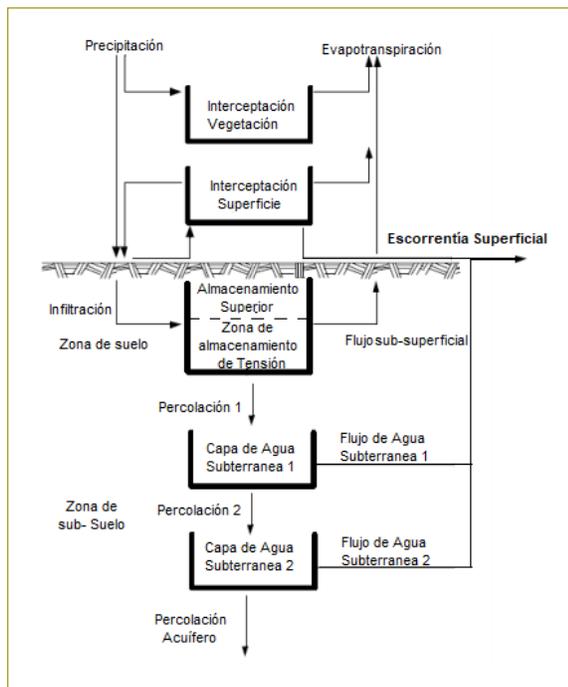


Figura 2. Esquema del modelo *Soil Moisture Accounting* de HEC-HMS.

Fuente: Adaptado de Hydrological Engineering Center (2018).

Sin embargo, los cambios de cobertura del suelo no se consideraron para este estudio, debido a que han sido insignificantes, con incrementos en áreas de páramo apenas de 0,5 % y de coberturas agrícolas de menos del 3 % en 20 años (Mateus, 2014). Hubo que completar los datos faltantes de las estaciones consultadas, por lo que se utilizaron promedios vecinales, regresión lineal ponderada y razón media como métodos de llenado de dichos datos (Unesco, 1982). Para los datos de lluvia diarios de las subcuencas, se utilizaron las estaciones Las Cintas, Toquilla, Potrerito y Guamo de Sisbacá, y los datos de caudal de las estaciones Hato Laguna, Criadero y Desaguadero. Además de la información climática, se necesitó información geográfica de las subcuencas que había que modelar, la cual se obtuvo del Centro de Investigaciones Satelitales de Alaska (Alaska Satellite Facility, ASF), descargando datos de elevación digital con resolución $12,5 \times 12,5$ m de la cuenca (ASF, 2011).

Tabla 1
Estaciones hidroclimatológicas de la cuenca del lago de Tota

Estación	Código	Tipo	Localización		Elevación (msnm)	Subcuenca	Municipio
			Latitud (N)	Longitud (W)			
Las Cintas	35190010	PG	5°36'50,9"	72°52'03,6"	3400	R. Hato Laguna	Sogamoso
Potrerito	35190010	ME	5°28'39,3"	72°56'55,0"	3250	R. Olarte	Aquitania
Las Villitas	35095080	ME	5°37'00,0"	72°55'00,0"	3150	Q. Salitre	Cúitiva
El Túnel	35095030	CO	5°34'29,7"	72°56'51,7"	3020	Lago	Cúitiva
Aquitania	35095120	CO	5°33'26,5"	72°52'48,7"	3025	Lago	Aquitania
Desaguadero	35097010	LM	5°29'14,1"	72°56'02,8"	3017	R. Olarte	Aquitania
Hato Laguna	35097030	LM	5°35'09,0"	72°53'54,6"	3020	R. Hato Laguna	Aquitania
Criadero	35097050	LM	5°33'27,9"	72°52'48,7"	3025	Q. Los Pozos	Aquitania
Escaleras	35097070	LM	5°29'31,0"	72°56'18,6"	3015	Lago	Tota
El Túnel	35165000	LM	5°34'29,9"	72°56'27,6"	3015	Lago	Cúitiva
Estaciones fuera de la cuenca							
Toquilla	35190020	PM	5°31'25,0"	72°47'27,5"	2960	Cusiana	Aquitania
El Crucero	24030760	PM	5°38'00,0"	72°55'00,0"	3225	Chicamocha	Sogamoso
Guamo de Sisbacá	35090070	PM	5°21'59,5"	72°55'20,2"	2575	Upía	Aquitania

Fuente: Adaptado de Núñez et al. (2014). PG = pluviográfica; PM = pluviométrica; CO = climática ordinaria; LM = limnimétrica; ME = meteorológica especial.

Así mismo, se obtuvo información adicional de la red hidrográfica, zonas protegidas, redes viales y coberturas vegetales Corine Land Cover Colombia (CLC) de la cuenca por medio de la Corporación Autónoma Regional de Boyacá (Corpoboyacá). Con esta información se determinó el área de cada cobertura vegetal de las subcuencas y se asignó un coeficiente de cultivo, definidos por la FAO (2006), al igual que el de coberturas de páramo de Buytaert et al. (2005), ponderado por áreas para obtener un coeficiente global en cada subcuenca (tabla 2), datos que se ingresan al modelo hidrológico.

El modelo HEC-HMS tiene cinco componentes en su interfaz. El primero es el modelo de cuenca, compuesto de treinta parámetros divididos en cinco módulos (vegetación, superficie, pérdidas, flujo base y transformación). En éste se seleccionaron un método simple de interceptación de agua de la vegetación, método simple de superficie, contenido de humedad del suelo como método de pérdidas, reservorio lineal como método de flujo base y unidad hidrográfica de Clark como método de transformación.

El siguiente componente es el modelo meteorológico, en el que se escogieron un hietograma especificado por el usuario para las precipitaciones y promedio mensual como método de evapotranspiración potencial (ET_0), obtenido de Ideam (2011).

El componente especificaciones de control corresponde al periodo de la simulación y el intervalo de tiempo de salida de los datos de caudal que son de un día, en tanto que en el componente datos de series temporales se ingresan los datos de precipitación y caudales diarios en el mismo intervalo de tiempo de las especificaciones de control. Finalmente, en el componente datos de terreno se ingresa el modelo de elevación digital de las subcuencas, y en la figura siguiente se muestran las subcuencas en el programa (figura 3).

Tabla 2
Cobertura y del suelo y coeficiente de cultivo (K_c) de subcuencas analizadas

Subcuenca			Hato Laguna		Los Pozos		Olarte	
Código cobertura (CLC)	Leyenda	Coefficiente de cultivo (K_c)	Área (ha)	(%)	Área (ha)	(%)	Área (ha)	(%)
2.1.1	Otros cultivos transitorios	1,11	33	1,09	-	-	-	-
2.1.4.1	Cultivo de cebolla	1,09	30	0,99	-	-	5,11	0,20
2.1.5.1	Cultivo de papa	0,9	-	-	11,60	1,82	-	-
2.3.1	Pastos limpios	1	67,90	2,24	-	-	405,87	15,75
2.4.2	Mosaico pasto-cultivo	0,77	830,51	27,45	140,03	21,99	296,62	11,51
2.4.3	Mosaico pasto-cultivo - esp. natural	0,77	348,88	11,53	74,75	5,45	143,6	5,57
2.4.4	Mosaico pasto-esp. natural	0,77	127,91	4,23	7,66	1,20	157,75	6,12
3.2.1.1.1	Herbazal denso	0,42*	1315,80	43,49	431,20	67,91	1342,13	52,07
3.2.2.1	Arbustal denso	0,7*	271,00	8,96	-	-	7,29	0,29
TOTAL			3025,00	100	665,24	100	2577,26	100
Coeficiente (K_c) subcuenca			0,623		0,522		0,578	

Fuente: Adaptado de Ideam, 2010; FAO 2006.

*Adaptado de Buytaert et al., 2005.

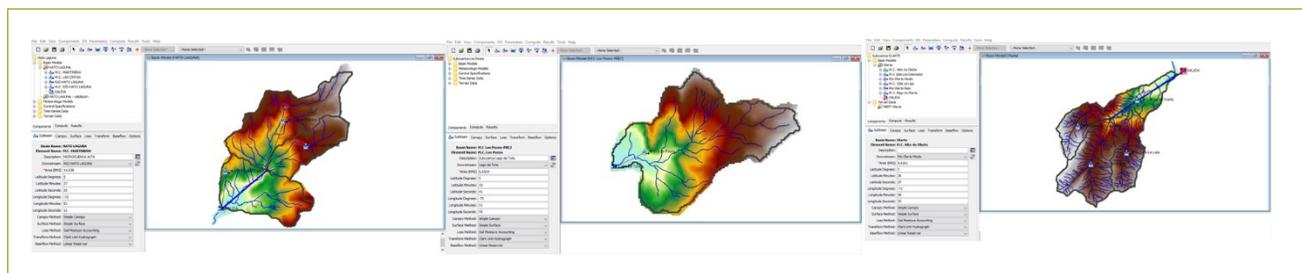


Figura 3. Subcuencas Hato Laguna, Los Pozos y Olarte, delimitadas en HEC-HMS.

Fuente: Elaboración propia.

La tarea de calibración y validación del modelo hidrológico solamente se hace con los parámetros del modelo de cuenca, y como método de evaluación se decidió utilizar Eficiencia de Nash-Sutcliffe (ENS), método estadístico normalizado que muestra el nivel de ajuste entre caudales observados y simulados, el cual se representa como un coeficiente adimensional cuyo resultado ideal es 1 (Nash & Sutcliffe, 1970) (ecuación 1), y sesgo porcentual (*Percent Bias*), que se usa para medir la tendencia general de los datos simulados de ser mayores o menores que los observados, siendo 0 % el resultado ideal (Molnar, 2011) (ecuación 2). También se utilizaron gráficas de flujo simulado vs. observado (figura 4). A continuación se muestran los resultados

de los parámetros optimizados en la calibración, así como las microcuencas identificadas para el análisis hidrológico (tabla 3), al igual que los resultados de la eficiencia del modelo en los periodos de calibración y validación para cada subcuenca (tabla 4).

$$ENS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{si} - Q_{oi})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - \bar{Q}_o)^2} \quad (1)$$

Donde Q_{si} es caudal simulado en el día i , Q_{oi} es caudal observado en el día i y \bar{Q}_o es caudal observado promedio en los n días.

Tabla 3
Resultados de calibración de parámetros de las subcuencas Hato Laguna, Los Pozos y Olarte

Parámetro	Hato Laguna			Los Pozos	Olarte			
	Martinera	Las Cintas	Bajo Hato Laguna	-	Alto Olarte	Los Colorados	La Laja	Bajo Olarte
Vegetación (Canopy)								
Initial Storage (%)	0	0	0	0	0	0	0	0
Max Storage (mm)	0,612	0,221	2,237	0,757	0,648	0,329	0,498	2,443
Crop Coefficient	0,623	0,623	0,623	0,522	0,578	0,578	0,578	0,578
Superficie (Surface)								
Initial Storage (%)	10	10,5	11	9,23	13,4	14,2	18	15
Max Storage (mm)	13,187	5,113	26,211	2,156	12,678	7,68	14,014	36,406
Pérdidas (Loss)								
Initial Soil Content (%)	72,429	68,302	40,794	71,36	76,943	76,902	72,807	35,441
Initial GW1 Content (%)	10,998	2,805	1,880	2,92	2	0,43	1,75	1,675
Initial GW 2 Content (%)	19,450	14,129	2,418	7,58	19,835	1,22	2,56	3,073
Max Infiltration (mm/h)	18,550	20,707	4,149	24,001	15,557	16,57	17,099	7,268
Impervious (%)	0,22	0,25	0	0	0	0	0	0
Soil Storage (mm)	55,467	43,972	125,63	34,320	90,959	83,737	42,604	126,97
Tension Storage (mm)	26,319	32,493	62,81	31,239	58,514	47,271	31,693	62,859
Soil Percolation (mm/h)	0,886	0,352	0,102	0,346	0,100	0,102	0,310	0,018
GW1 Storage (mm)	161,07	179,17	119,06	112,78	107,9	104,58	157,52	131,24
GW1 Percolation (mm/h)	0,821	0,906	0,630	1,320	0,619	0,939	0,324	0,528
GW1 Storage Coefficient (h)	962,75	541,85	416,55	73,949	141,61	80,867	87,089	102,90
GW2 Storage (mm)	321,09	376,08	384,91	358,06	361,70	460,7	392,40	326,64
GW2 Percolation (mm/h)	0,696	0,666	0,579	0,205	0,612	0,914	0,167	0,428
GW2 Storage Coefficient (h)	1028,9	1270,0	1730,2	700,47	2437,3	2429,2	2448,8	2224,6
Transformación (Transform)								
Time of Concentration (h)	25,820	24,153	24,087	25,054	24,365	25,566	24,310	32,683
Storage Coefficient (h)	52,232	68,140	29,073	26,842	36,839	43,144	40,413	44,256
Flujo Base (Baseflow)								
GW1 Initial Discharge (m ³ /s)	0,02	0,015	0,001	0,03	0,006	0,009	0,006	0,001
GW2 Initial Discharge (m ³ /s)	0,04	0,04	0,009	0,07	0,034	0,021	0,014	0,009
GW1 Fraction	0,6	0,75	0,5	0,05	0,3	0,5	0,5	0,5
GW1 Coefficient (h)	26,379	24,822	29,038	28,706	25,246	30,853	25,864	30,029
GW1 Steps	1	1	1	1	1	1	1	1
GW2 Fraction	0,35	0,2	0,45	0,9	0,65	0,45	0,45	0,45
GW2 Coefficient (h)	1321,0	2171,0	1687,2	1128,5	1644,5	1618,8	862,15	521,12
GW2 Steps	2	2	2	2	2	2	3	3

Fuente: Elaboración propia.

$$PBias = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_{si})}{\sum_{i=1}^n Q_{oi}} * 100 \quad (2)$$

Donde Q_{si} es caudal simulado en el día i y Q_{oi} es el caudal observado en el día i .

Figura 4. Caudales observados y simulados en calibración-validación del modelo HEC-HMS, subcuencas Hato Laguna, Los Pozos y Olarte.

Fuente: Elaboración propia.

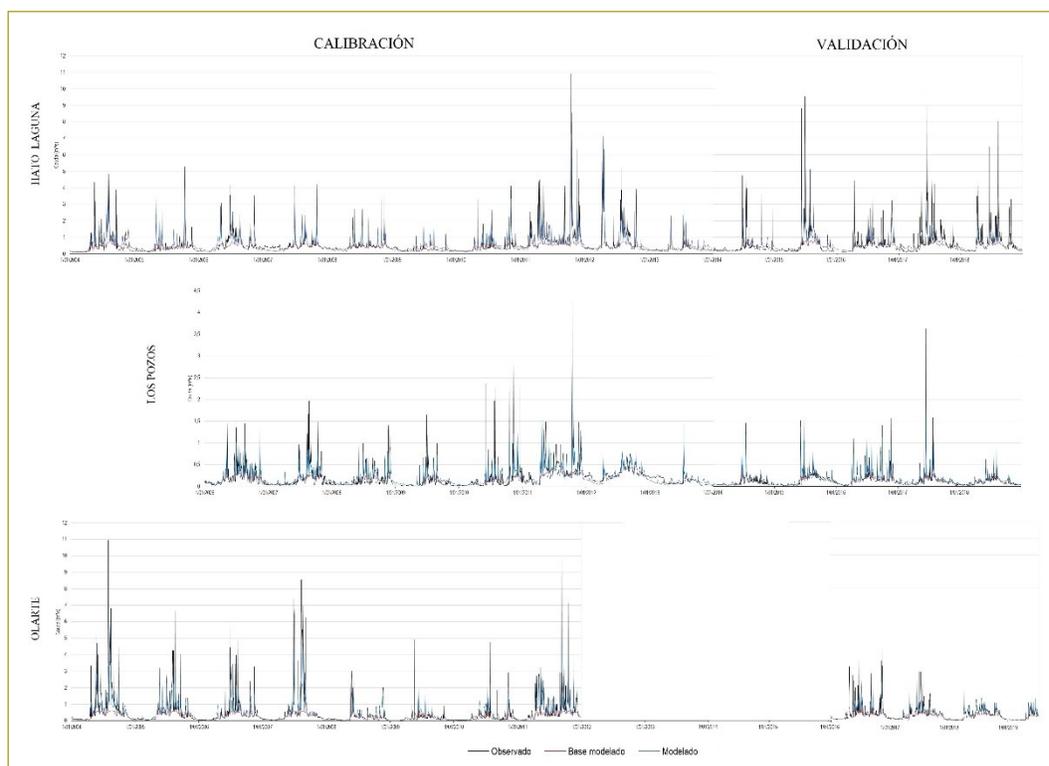


Tabla 4

Eficiencias del modelo hidrológico subcuencas Hato Laguna, Los Pozos y Olarte

Método	Hato Laguna		Los Pozos		Olarte	
	Calibración	Validación	Calibración	Validación	Calibración	Validación
ENS	0,651	0,606	0,639	0,632	0,670	0,660
PercentBias	0,93 %	-11,27	-0,74 %	6,43 %	-3,71 %	0,44 %

Fuente: Elaboración propia.

Agregado al análisis hidrológico de la modelación, se calcularon los volúmenes de flujo total del proceso precipitación-escorrentía en los periodos de calibración y validación del modelo, y así obtener el coeficiente de escorrentía de cada subcuenca (tabla 5). El rendimiento hídrico para la subcuenca del río Hato Laguna se encuentra en valores de 0,450 en promedio; 0,429 año seco y 0,514 año húmedo. Para la quebrada Los Pozos, el coeficiente de escorrentía fue 0,831 en promedio; 0,760 en año seco y 0,861 en año húmedo. En la subcuenca del río Olarte, el coeficiente de escorrentía fue de 0,658 en promedio; 0,554 en año seco y 0,693 en año húmedo.

Escenarios de cambio climático

Se definieron para las tres principales variables del modelo hidrológico durante el periodo de evaluación comprendido entre 2020 y 2049. Estos parámetros son temperatura, precipitación y evapotranspiración potencial, cuyos resultados se definen de acuerdo con tres escenarios posibles: el primero, calculado de la tendencia de la cuenca con respecto a sus series históricas (ES1), mientras el segundo (ES2) y el tercero (ES3) se definen en relación con el ensamble multiescenario y el RCP 8.5, respectivamente, aplicado en la tercera comunicación del cambio climático para precipitación y temperatura en Colombia (Ideam et al., 2015).

La temperatura media anual del periodo de referencia 1989-2018 es de 11,71 °C, que es la línea base de los

Tabla 5

Volumen de flujo acumulado simulado en calibración-validación de las subcuencas Hato Laguna, Los Pozos y Olarte

Parámetro	Hato Laguna		Los Pozos		Olarte	
	Calibración	Validación	Calibración	Validación	Calibración	Validación
Precipitación (mm)	12.784,40	6375,40	9435,7	4216,3	7099,80	2692,79
Volumen descarga (mm)	5770,56	2830,61	7941,09	3398,82	4759,52	1689,15
Volumen flujo base (mm)	4350,06	2236,39	6457,39	2872,76	2601,68	1115,18
Flujo base (%)	75,38	79,00	81,31	84,52	54,66	66,02
Volumen de escorrentía directa (mm)	1420,50	594,21	1483,70	526,06	2157,84	573,97
Escorrentía directa (%)	24,62	21,00	18,69	15,48	45,34	33,98
Coefficiente de escorrentía	0,451	0,444	0,841	0,806	0,670	0,627

Fuente: Elaboración propia.

escenarios de cambio de temperatura. Para la elaboración de las series mensuales proyectadas de temperatura se empleó el modelo ARMA (p, q) (*AutoRegressive Moving Average*, Autorregresivo de Media Móvil) utilizando el *software gretl 2020d*, (programa GNU de regresión, econometría y librería de series de tiempo, en inglés) que se puede ver en la ecuación 3 (Cottrell & Lucchetti, 2020).

$$y_t = x_t \gamma + \phi_1 y_{t-1} + \phi_p y_{t-p} + \theta_1 \varepsilon_{t-1} + \theta_q \varepsilon_{t-q} + \varepsilon_t \quad (3)$$

Donde Φ y θ son parámetros del modelo, p y q son el orden de regresión y media móvil, respectivamente, y_t es la variable dependiente, x_t es la variable temporal y ε_t es ruido blanco de la serie. Agregando un error aleatorio (ε), se multiplicó este factor a los residuos generados por el modelo ARMA (1, 1) ($\Phi = -0,3427$ y $\theta = 0,4852$). Con lo anterior se obtuvo la serie de ES1, por lo que para ES2 y ES3 se agregó un incremento gradual y se

obtuvo la temperatura de aumento a partir de los datos de los escenarios de cambio climático del Ideam (2015). Sin embargo, el periodo de referencia del documento es de 1976-2005, por lo que se ajustaron los incrementos para concordar con el periodo 1989-2018 (ecuación 4).

$$T_i = \frac{T_{aum} - 12,023}{2n} + T_{i-1} \quad (4)$$

Donde T_i es el incremento de temperatura en el mes i , T_{aum} es temperatura incrementada con respecto al periodo de referencia (1976-2005), $12,023$ es temperatura media (2006-2018) y n es número de datos de la serie. Los resultados de los escenarios arrojaron que para el año 2049 en ES1 el incremento medio será de $0,63$ °C, en ES2 es de $1,19$ °C y en ES3 es de $1,96$ °C. A renglón seguido se muestran gráficamente los cambios medios mensuales para cada escenario, comparados con el periodo de referencia (figura 5).

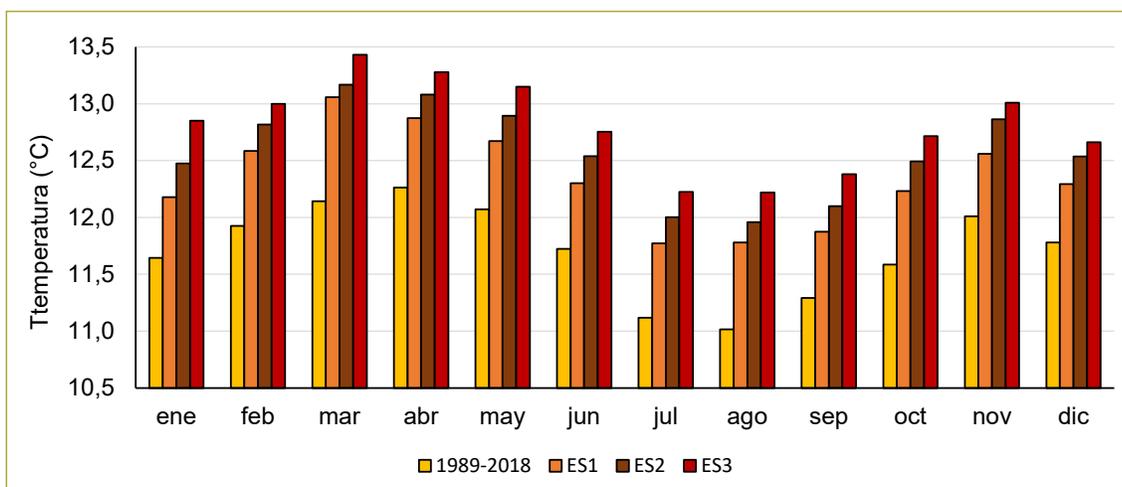


Figura 5. Comparativo del aumento de temperatura en ES1, ES2 y ES3 con respecto al periodo 1989-2018.

Fuente: Elaboración propia, a partir de Ideam, 2020.

Tabla 6
Precipitación media mensual y anual (mm) en estaciones de estudio

Estación	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Anual
Las Cintas	21,446	35,033	65,230	122,11	124,69	148,85	176,38	140,50	100,86	109,76	96,223	38,053	1179,1
Toquilla	14,411	22,554	58,592	114,11	161,96	190,93	201,99	168,34	130,67	105,48	78,120	26,689	1273,8
Potrerito	12,688	24,112	49,274	96,439	102,68	99,812	107,18	89,388	79,531	80,283	67,691	22,373	831,46
Guamo	17,345	31,278	67,545	122,22	186,63	210,07	225,15	199,47	163,70	121,73	82,522	29,260	1456,9

Fuente: Elaboración propia a partir de Ideam, 2020.

La distribución media mensual y anual de la precipitación en las estaciones utilizadas en este estudio se muestra en la tabla siguiente (tabla 6). Para obtener las series proyectadas de precipitación se utilizó el modelo ARMA (1, 1) al igual que con las series de temperatura, y se hizo un análisis de anomalías de las series históricas de precipitación de las estaciones, al normalizar las series históricas alrededor de la media ($\mu = 0$) y la desviación estándar ($\sigma = 1$), para determinar la probabilidad de años secos y húmedos en las series proyectadas (figura 6).

Es así como, para los escenarios de cambio de precipitación, todas las estaciones tienen probabilidades de que ocurran cinco años más lluviosos y cinco años menos lluviosos, con al menos un año en el que coincidan condiciones muy húmedas y un año de condiciones muy secas en las cuatro estaciones durante el periodo 2020-2049. ES1 de cambios de precipitación se generó por la proyección del modelo ARMA, mientras que ES2 y ES3 se generaron de la proyección de los escenarios de cambio climático del Ideam (2015). Además, para ajustar los cambios medios anuales para concordar con el periodo de referencia 1989-2018 se utilizó la siguiente ecuación (ecuación 5).

$$P_i(\%) = \left[\frac{P_{pos} \times 100}{P_{ref}} - 100 \right] + P_{es}(\%) \quad (5)$$

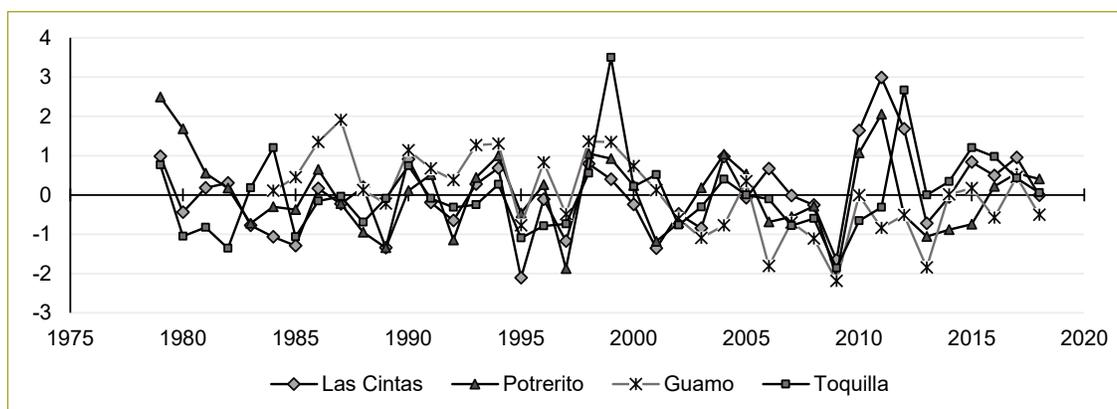
Donde P_i es el porcentaje de cambio promedio de precipitación, P_{pos} es precipitación media del periodo 2006-2018, P_{ref} es la precipitación media del periodo de referencia (1976-2005) y P_{es} corresponde al porcentaje de cambio de precipitación del escenario Ideam. Más adelante se muestran los resultados del modelo ARMA y los cambios esperados en la precipitación de las estaciones (tabla 7).

La ET_0 media mensual de las subcuencas se obtuvo a partir de los promedios climatológicos de estaciones de la cuenca (Ideam, 2011). Sin embargo, para las proyecciones de ET_0 se optó por utilizar la fórmula de Turc modificada para condiciones húmedas ($HR > 50\%$), propuesta por Turc (1961) (ecuación 6). Los datos de radiación global se calcularon con la fórmula de Ångström (ecuación 7) y, por lo tanto, la proyección de ET_0 depende directamente de la temperatura.

$$ETP = K \left(\frac{T}{T+15} \right) (RG + 50) \quad (6)$$

Figura 6. Anomalías de precipitación en estaciones de estudio (1979-2018).

Fuente: Elaboración propia.



Donde ETP es evapotranspiración potencial mensual en mm, K es el factor mensual (0,4 para meses de 30 y 31 días, 0,37 para febrero), T es temperatura media mensual en °C y RG corresponde a radiación global en (Cal/cm²-día).

$$RG = RA \left(a + b \left(\frac{n}{N} \right) \right) \quad (7)$$

Donde RA significa radiación extraterrestre en la atmósfera superior (Cal/cm²-día), n es el número de horas de insolación (horas decimales), N es insolación posible por duración del día (horas decimales), y a y b son factores empíricos.

Para aplicar la ecuación 7, los coeficientes a y b fueron 0,25 y 0,54, respectivamente, tomados de los valores reportados en trabajos de investigación para zonas de alta montaña en Colombia (Marín Valencia, 2010; Guzmán et al., 2013; Zuluaga Pulgarín, 2018). Así mismo, se debió corregir la temperatura en función

de la altitud media de las subcuencas, la cual se reduce aproximadamente 0,61 °C por cada 100 msnm (Castro, Agualimpia & Sánchez, 2016). Para obtener ET_0 del periodo de referencia, se comparó la fórmula de Turc con los resultados de ET_0 reportados por Ideam (2011) para poder compararlos y ajustarlos mediante un factor mensual.

A continuación se muestra un resumen de los resultados de los escenarios de cambio climático por parámetro y subcuenca (tabla 8).

Efectos del cambio climático en la disponibilidad y permanencia de caudales

Con los datos de precipitación y evapotranspiración obtenidos, se corre el modelo hidrológico HEC-HMS en cada subcuenca, mediante una simulación de proyección, analizando periodos de diez años (2020-2029, 2030-2039, 2040-2049). Los resultados de volúmenes simulados, la proporción del caudal base, de escorrentía

Tabla 7
Resultados del modelo ARMA y cambios de precipitación para ES1, ES2 y ES3

Parámetro	Las Cintas	Potrerito	Toquilla	Guamo
ARMA (1,1)				
Φ	-0,1501	-0,8509	-0,4557	-0,4776
θ	0,1510	0,9837	0,5322	0,3569
Precipitación media anual 1989-2018 (mm)	1211,93	828,32	1303,86	1456,95
Cambio de precipitación ES1 (%)	14,0	5,0	8,6	-18,4
Precipitación media anual ES1 (mm)	1381,60	869,73	1415,99	1188,87
Cambio de precipitación ES2 (%)	12,6	33,6	9,1	-11,1
Precipitación media anual ES2 (mm)	1364,63	1161,96	1422,51	1290,79
Cambio de precipitación ES3 (%)	10,6	25,1	7,1	-13,9
Precipitación media anual ES3 (mm)	1340,39	1088,03	1396,43	1254,43

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8
Cambios de temperatura, precipitación y ET_0 en ES1, ES2 y ES3, para subcuencas de estudio

Parámetro	Hato Laguna			Los Pozos			Olarte		
	ES1	ES2	ES3	ES1	ES2	ES3	ES1	ES2	ES3
Temperatura (°C)	+0,63	+1,19	+1,96	+0,63	+1,19	+1,96	+0,63	+1,19	+1,96
Precipitación (%)	+ 14	+ 12,6	+ 10	+ 21,6	+ 20,7	+ 20,1	+ 5,1	+ 29,7	+ 22,1
Evapotranspiración Potencial (%)	+ 4,3	+ 5,9	+ 7,3	+ 4,4	+ 5,8	+ 7,3	+ 4,7	+ 6,3	+ 7,9

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9

Volumen de flujo acumulado simulado de las subcuencas Hato Laguna, Los Pozos y Olarte para ES1, ES2 y ES3

Escenario	Precipitación (mm)	Volumen descarga (mm)	Volumen flujo base (mm)	Flujo base (%)	Vol. Escorrentía directa (mm)	Escorrentía directa (%)	Coef. escorrentía
Hato Laguna							
Referencia (2004-2018)	19.159,80	8601,17	6586,45	76,57	2014,71	23,43	0,449
ES1							
2020-2029	12.895,53	5891,27	4498,96	76,36	1392,31	23,63	0,457
2030-2039	14.535,28	6900,15	5021,12	72,77	1879,03	27,23	0,475
2040-2049	14.045,28	6609,01	4798,06	79,06	1810,94	20,94	0,471
ES2							
2020-2029	12.615,91	5774,66	4294,56	74,37	1480,10	25,63	0,458
2030-2039	14.328,91	6950,62	4790,05	68,91	2160,57	31,09	0,485
2040-2049	13.968,68	6620,70	4681,02	70,70	1939,67	29,30	0,474
ES3							
2020-2029	13.796,11	6440,79	4699,22	72,96	1741,57	27,04	0,467
2030-2039	12.964,95	5817,35	4293,70	73,81	1523,65	26,19	0,448
2040-2049	13.669,60	6458,21	4521,17	70,00	1937,04	30,00	0,472
Los Pozos							
Referencia (2006-2018)	13.652,0	11.339,91	9330,15	82,27	2009,76	17,73	0,831
ES1							
2020-2029	11.974,88	9812,66	8857,82	90,27	954,84	9,73	0,819
2030-2039	13.399,33	11.161,86	10.108,89	90,56	1052,97	9,44	0,833
2040-2049	12.951,95	10.677,27	9283,55	86,95	1393,71	13,05	0,825
ES2							
2020-2029	12.079,24	10.002,06	9089,38	90,87	912,68	9,13	0,828
2030-2039	12.808,08	10.568,70	9205,36	87,10	1363,34	12,90	0,825
2040-2049	13.153,31	10.808,30	9361,61	86,61	1446,68	13,39	0,822
ES3							
2020-2029	12.371,21	10.152,96	8877,94	87,44	1275,02	12,56	0,821
2030-2039	12.326,80	10.075,66	8769,08	87,03	1306,58	12,97	0,817
2040-2049	12.546,14	10.307,71	8737,32	84,76	1570,39	15,24	0,821
Olarte							
Referencia (2004-11, 16-19)	9792,59	6448,67	3716,86	57,63	2731,81	42,36	0,658
ES1							
2020-2029	9008,51	5888,14	3748,20	63,65	2139,94	36,35	0,654
2030-2039	9272,51	6021,52	3777,33	62,73	2244,19	37,27	0,649
2040-2049	8577,01	5408,39	3362,54	62,17	2045,85	37,83	0,631
ES2							
2020-2029	10.297,88	6987,57	4009,28	57,37	2977,29	42,62	0,679
2030-2039	11.334,01	7932,47	4122,90	51,97	3809,57	48,03	0,700
2040-2049	11.506,89	8068,20	4129,65	51,18	3938,55	48,82	0,701
ES3							
2020-2029	10.165,08	6891,86	3875,11	56,23	3016,75	43,77	0,678
2030-2039	10.420,68	7015,99	3916,65	55,82	3099,34	44,17	0,673
2040-2049	10.611,69	7104,87	3895,73	54,83	3209,14	45,17	0,669

Fuente: Elaboración propia.

directa y el rendimiento hídrico se comparan entre cada escenario. Adicionalmente, se hace una comparación del caudal descargado durante el periodo de calibración-validación del modelo y el periodo proyectado, para evaluar el cambio en la oferta hídrica de las subcuencas (tabla 9).

Posteriormente, se calculó el índice de retención y regulación hídrica (IRH) de las subcuencas, un índice adimensional calculado a partir del volumen parcial inferior al caudal medio diario, dividido entre el volumen total equivalente bajo el área de la curva de duración de caudales medios diarios. Tiene valores entre 0 y 1, considerando valores inferiores a 0,50 como retención muy baja, valores entre 0,51 y 0,65 como retención baja, valores entre 0,66 y 0,75 como retención moderada, valores entre 0,76 y 0,85 como retención alta y valores mayores de 0,86 como retención muy alta, según la metodología del Ideam (2016) detallada en las ecuaciones siguientes (ecuaciones 8 y 9).

$$V_t = \Delta P_{exc} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{(Q_i + Q_{i+1})}{2} \quad (8)$$

$$\Delta P_{exc} = P_{exci+1} - P_{exci}$$

$$P_{exc} = \frac{m}{n}$$

Donde Q_i es el caudal medio diario en la posición i , de una serie ordenada de caudales de mayor a menor (m^3/s), Q_{i+1} es el caudal medio diario en la posición $i + 1$, de una serie ordenada de caudales de mayor a menor (m^3/s), P_{exci+1} = probabilidad de excedencia del caudal medio diario en la posición $i + 1$ (%), P_{exci} es la probabilidad de excedencia del caudal medio diario en la posición i (%), ΔP_{exc} es la diferencia entre probabilidades de excedencia (este delta es constante) (%), n es el número de datos de la serie de caudal o longitud de la serie y m es el índice de orden del caudal en la serie ordenada.

$$V_p = \Sigma(V_{p1} + V_{p2}), \begin{cases} V_{p1} = (P_{exc\ med} \cdot Q_{medio}) \\ V_{p2} = \sum_{i=m_{medio}}^n \Delta P_{exc} \cdot \frac{(Q_{medio} - Q_m)}{2} \end{cases}$$

$$P_{exc\ med} = P_{exc\ m} + \frac{(P_{exc\ m+1} - P_{exc\ m}) \cdot (Q_{medio} - Q_m)}{(Q_m - Q_{m+1})} \quad (9)$$

Donde Q_{medio} es caudal promedio de la serie de datos de caudal (m^3/s), $P_{exc\ med}$ es la probabilidad de excedencia del caudal promedio de la serie de caudales (%), $P_{exc\ m}$ es la probabilidad de excedencia del caudal medio diario inmediatamente menor que el caudal promedio (%), $P_{exc\ m+1}$ es la probabilidad de excedencia del caudal medio diario inmediatamente mayor que el caudal promedio (%), Q_m es el caudal medio diario inmediatamente inferior al caudal promedio de la serie ordenada de caudales (m^3/s) y Q_{m+1} es el caudal medio diario o mensual inmediatamente mayor que el caudal promedio de la serie ordenada de caudales (m^3/s).

Adicionalmente, como método de análisis de permanencia del flujo superficial se calculó un caudal ambiental aproximado a partir de la curva de duración de caudales diarios de las subcuencas, considerando el valor característico Q85 (caudal igualado o superado el 85 % del tiempo); si el IRH supera el valor 0,7 y si el índice es menor, el valor característico Q75 (caudal igualado o excedido el 75 % del tiempo) será considerado el caudal ambiental (Ideam, 2019). Los resultados del índice de regulación hídrica y caudal ambiental se muestran a renglón seguido (tabla 10).

Es así como se pueden observar cambios en diferentes magnitudes de los caudales para cada subcuenca, puesto que las lluvias no se distribuyen uniformemente en la cuenca del lago. Los cambios de los caudales medios se encuentran en 3 % durante ES1, 36,8 % en ES2 y 24,9 % durante ES3 para la subcuenca del río Olarte, mientras que en la subcuenca Los Pozos será mayor en 21,3 % durante ES1, alrededor de 20,2 % durante ES2 y cerca de 17,5 % durante ES3; a su vez, en la subcuenca del río Hato Laguna el caudal medio sería mayor un 15,7 % en ES1, alrededor de 15,3 % en ES2 y aproximadamente 11,5 % en ES3. Estos incrementos de caudal no son proporcionales a los incrementos de precipitación, lo que está relacionado con el IRH de las subcuencas, puesto que la quebrada Los Pozos y el río Olarte en los tres escenarios tienen un mejor indicador; caso contrario es el del río Hato Laguna, donde sería menor la capacidad de regulación. Sin embargo, las subcuencas Los Pozos y Hato Laguna tienen una calificación moderada, mientras que la subcuenca Olarte es baja, lo que indica que la homogeneidad de los caudales es mejor en las dos primeras y exhiben características de regulación que permiten absorber gran cantidad de lluvias torrenciales y liberarlas en temporadas más secas (Ideam, 2016).

Tabla 10
IRH y caudal ambiental en las subcuencas Hato Laguna, Los Pozos y Olarte para ES1, ES2 y ES3

Parámetro	Hato Laguna				Los Pozos				Olarte			
	Refer.	ES1	ES2	ES3	Refer.	ES1	ES2	ES3	Refer.	ES1	ES2	ES3
Caudal medio (m ³ /s)	0,536	0,620	0,618	0,598	0,183	0,222	0,220	0,215	0,429	0,442	0,587	0,536
IRH	0,744	0,751	0,720	0,701	0,673	0,760	0,746	0,737	0,595	0,648	0,627	0,627
Calificación	Media	Media	Media	Media	Media	Alta	Media	Media	Baja	Baja	Baja	Baja
Caudal ambiental (m ³ /s)	0,230	0,272	0,247	0,261	0,068	0,085	0,078	0,075	0,073	0,093	0,146	0,108

Fuente: Elaboración propia.

Otro factor que hay que considerar son las depresiones del terreno, que forman por lo general pequeñas lagunas, humedales y turberas, bastante comunes en la alta montaña y que contribuyen en muy buena medida a la regulación hídrica del páramo (Buytaert et al., 2010; Llambí et al., 2012). Los parámetros de superficie de la modelación hidrológica indican que las microcuencas bajo río Olarte y bajo río Hato Laguna retienen más agua en su superficie, debido tal vez a que son altamente cultivadas, y las parcelas tienen surcos en los que se retiene el agua lluvia (Daza, Hernández & Triana, 2014). Las microcuencas con un valor intermedio de almacenamiento de agua en superficie son Martinera, alto río Olarte y Las Lajas, que según el análisis del modelo HEC-HMS tienen más sumideros (*sinks*), mientras que Los Pozos y Los Colorados presentaron menos áreas con depresiones.

El caudal ambiental incrementa también todos los escenarios y subcuencas, siendo ES2 el escenario con mayor caudal ambiental en Olarte, en tanto que ES1 es donde este caudal más aumenta en las subcuencas Hato Laguna y Los Pozos, con respecto al periodo de referencia. Este incremento supone una mayor permanencia de los caudales mínimos, influenciado en gran medida por las características del suelo de los páramos; generalmente son de tipo andosol, rico en materia orgánica y estructura porosa, lo que permite que el contenido de agua en suelo saturado sobrepase el 80 % de volumen, en comparación con los valores de 30 a 40 % de suelos agrícolas (Llambí et al., 2012).

Los niveles de humedad en suelo de las subcuencas simulados en HEC-HMS sobrepasaban en ocasiones el 80 %, resultados similares a los reportados por otros autores (Torres Romero & Proaño Santos, 2018; Daza, Hernández & Triana, 2014; Moyano Pérez, 2018). Estos niveles de humedad también se relacionan con la capa-

dad de almacenamiento y la capacidad de infiltración del suelo, pues la infiltración de agua es la que alimenta el flujo base de los caudales superficiales en cuencas de alta montaña; en las zonas norte y oriental de la cuenca del lago de Tota son de muy alta y alta potencialidad de almacenamiento e infiltración, mientras que el sur es de alta y media potencialidad. Esto se debe a que en la cuenca existen depósitos aluviales y predominancia de arenitas de alta porosidad, que permiten retener altas cantidades de agua (Corpoboyacá & Humboldt, 2015).

Por otra parte, la cobertura vegetal desempeña un papel clave en la capacidad de regulación hídrica de las cuencas de páramo, pues suelos de páramo con vegetación nativa permiten mayor almacenamiento e infiltración de agua que los cultivos y pastos (Arcos, 2010; Daza, Hernández & Triana, 2014; Torres Romero & Proaño Santos, 2018).

Igualmente, la vegetación puede retener cierta cantidad de precipitación, y según los parámetros del modelo hidrológico, algunas microcuencas simuladas coinciden con lo reportado por Valencia-Leguizamón y Tobón (2017), en el que coberturas de frailejónal, chuscal y pajónal en condiciones de dosel seco interceptan en promedio 0,06-0,42 mm y un máximo de 5,6 mm de lluvia, dependiendo de la intensidad de precipitación. En el caso de coberturas de vegetación secundaria y agropecuaria, la interceptación de lluvia está en rangos de 2,17-2,3 mm (Ramos & Armenteros, 2019), valores similares a las microcuencas con mayor actividad agropecuaria.

Los coeficientes de escorrentía de las subcuencas del lago de Tota muestran un comportamiento muy relacionado con las coberturas vegetales, puesto que las microcuencas con más cobertura de páramo tuvieron mejor rendimiento hídrico, debido a que la subcuenca del río Hato Laguna presentó el rendimiento más bajo,

mejoró en la subcuenca del río Olarte y el más alto se presentó en la quebrada Los Pozos. Normalmente, una cuenca de páramo no intervenida presenta un alto rendimiento hídrico ($> 60\%$), comparado con cuencas en altitudes menores con rendimientos más bajos, a causa principalmente de la baja evapotranspiración del clima frío y húmedo, la retención de agua del suelo y las características de la vegetación (Llambí et al., 2012). Debido a la alteración humana del ecosistema, se ha perdido casi la mitad del área de páramo en las subcuencas Olarte y Hato Laguna, por lo que los procesos hidrológicos se trastornan y provocan crecidas más fuertes y reducciones de caudal base en temporadas secas, como las observadas en el río Olarte, y un rendimiento hídrico menor, como se observó en el río Hato Laguna. En las tablas siguientes se observan los conflictos del uso del suelo en las subcuencas analizadas (tabla 11), así como algunos de los coeficientes de escorrentía de varias cuencas de páramo comparadas con las de este estudio, donde por diferentes factores estos resultados

difieren, pues la percolación del agua subterránea puede ser menor al 5 %, hasta representar más del 60 % de las pérdidas (tabla 12) (Crespo et al., 2014; Torres Romero & Proaño Santos, 2018).

Otro de los parámetros que pueden influenciar el rendimiento hídrico es la evapotranspiración potencial, que en cuencas de alta montaña en Colombia se mide en rangos desde 770 hasta 1000 mm anuales (Jaramillo Robledo, 2006; Ideam, 2011). Sin embargo, la evapotranspiración real en páramos puede ser mucho menor, entre 225 y 330 mm/año, aproximadamente (Valencia & Tobón, 2017). El factor aplicado a la ET_0 en la modelación hidrológica hace que se aproxime más a la evapotranspiración real de estas subcuencas, aunque ésta sigue siendo mayor que las de otros puntos de monitoreo del Ideam (2011). La ET_0 predicha en los escenarios de cambio climático depende en gran medida del incremento de la temperatura, resultados similares a los de otros estudios en los que se proponen rangos de incrementos entre 3 y 10 % (Castañeda Morales,

Tabla 11
Conflictos en el uso del suelo de las subcuencas Hato Laguna, Olarte y Los Pozos

Subcuenca	Área (ha)	Área agropecuaria (ha)	Área actual páramo (ha)	Área declarada páramo (ha)	Diferencia áreas páramo (ha)
Hato Laguna	3025,00	1438,22	1586,78	2906,83	1320,05
Los Pozos	665,24	234,04	431,2	598,00	166,8
Olarte	2577,26	1227,87	1349,39	2328,30	978,91
Total	6267,5	2900,13	3367,37	5833,13	2465,76

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 12
Coeficientes de escorrentía en algunas cuencas de páramo

Cuenca	Ubicación	Altitud (msnm)	Coefficiente de escorrentía	Autor(es)
R. Hato Laguna	Boyacá (Colombia)	3015-3990	0,49	Este estudio
Q. Los Pozos			0,81	
R. Olarte			0,65	
R Carchi	Galeras (Ecuador)	2932-4188	0,51	Guerra Amán (2019)
R. Quinuas	Cuenca (Ecuador)	3612-4400	0,46	Timbe, Cabrera y Crespo (2019)
Alto R. Jatunhuaycu	Antisana (Ecuador)	4036-4520	0,16	Torres & Proaño (2018)
Q. Cárdenas	Quindío (Colombia)	3800-4730	0,51	Gutiérrez Uribe, (2016)
Alto R. Tunjuelo	Sumapaz (Colombia)	2960-3450	0,49	Lizarazo Rincón (2018)
Q. La Chucua	Chingaza (Colombia)	2464-3541	0,73	Gil Morales (2012)
R. Gacheneca	Boyacá (Colombia)	2700-3350	0,57	Beltrán García (2018)

Fuente: Elaboración propia.

2016; Gutiérrez Uribe, 2016; Lizarazo & Peña, 2019). Aunque son proporcionales, los incrementos de ET_0 no son iguales a los de temperatura debido probablemente al incremento de la humedad relativa, causado por fenómenos de neblina continua que reducen la tasa de evapotranspiración hasta un 63 %, bloqueando los rayos del sol, los cuales evaporan el agua de la superficie y las plantas (Tobón, 2019).

La oferta hídrica de las subcuencas se incrementará en la mayoría de los escenarios y décadas (tabla 13). El flujo acumulado total del volumen de escorrentía indica que en las tres subcuencas se mantendría la disponibilidad hídrica, con excepción de la subcuenca del río Olarte, en la que puede haber descensos de flujo en la década 2040-2049 en ES1. El porcentaje de flujo base muestra que la mayoría del caudal es subsuperficial, situación bastante común en microcuencas de páramo donde predominan fenómenos de rápida infiltración del agua a las capas profundas, liberadas lentamente en temporadas secas (Crespo et al., 2014).

El caso de la subcuenca Olarte sugiere una rápida colmatación del suelo en temporadas lluviosas, por lo que genera mayor volumen de escorrentía directa en proporción a Los Pozos y Hato Laguna, ya que las dos muestran rangos similares a otros estudios (Gil Morales, 2016; Timbe, Cabrera & Crespo, 2019; Crespo et al., 2014). Los excesos de caudal base están relacionados igualmente con el incremento de ET_0 , pues mientras más cálido esté el escenario de cambio climático hay menores incrementos en el flujo base, como se observa

en las subcuencas Hato Laguna y Los Pozos, pero en la subcuenca Olarte los excesos de precipitación superan los aumentos de ET_0 en ES2 y ES3. La escorrentía directa que corresponde al exceso de precipitación que se convierte en escorrentía directa tiene comportamientos diversos, pues en Hato Laguna y Olarte hay incrementos muy importantes en los escenarios, excepto en ES1 de Olarte, en tanto que la subcuenca Los Pozos estos volúmenes disminuyen, aunque dichos descensos no alteran el flujo total de la subcuenca (tabla 13).

Estas predicciones tienen una incertidumbre de alrededor de $\pm 4,3$ % en la subcuenca del río Hato Laguna, $\pm 2,9$ % en la quebrada Los Pozos y $\pm 2,8$ % en la subcuenca Olarte, ya que el porcentaje de sesgo y ENS de la calibración-validación del modelo hidrológico son satisfactorios para la representación hidrológica de las subcuencas, tras superar el valor de 0,6 en ENS y de menor ± 15 % en porcentaje de sesgo (Molnar, 2011). En las curvas de duración de caudales medios diarios que se muestran en la figura siguiente (figura 7), se puede observar que en la subcuenca Hato Laguna los comportamientos son muy semejantes entre escenarios, aun cuando hay caudales mayores en los caudales máximos (del 5 al 35 %, aproximadamente) y mínimos (del 70 al 85 %). En Los Pozos los caudales máximos no aumentan en mayor medida en ninguno de los escenarios, pero sí incrementan los caudales medios y más bajos (entre el 20 y 100 %), por lo que la permanencia de los caudales superficiales se vería impactada positivamente. En la subcuenca del río Olarte hay mayores caudales en

Tabla 13
Cambios de volumen de flujo total en las subcuencas Hato Laguna, Los Pozos y Olarte en ES1, ES2 y ES3

Periodo	Hato Laguna			Los Pozos			Olarte		
Flujo total (%)									
	ES1	ES2	ES3	ES1	ES2	ES3	ES1	ES2	ES3
2020-2029	+2,7	+0,7	+12,3	+12,5	+14,7	+16,4	+5,0	+24,6	+22,9
2030-2039	+20,3	+21,2	+1,4	+27,9	+21,2	+15,5	+7,4	+41,4	+12,3
2040-2049	+15,2	+15,4	+12,6	+22,4	+23,9	+18,2	-3,5	+36,7	+26,7
Flujo base (%)									
	ES1	ES2	ES3	ES1	ES2	ES3	ES1	ES2	ES3
2020-2049	+8,7	+4,5	+2,3	+31,2	+28,4	+22,5	+12,3	+26,4	+20,5
Flujo escorrentía directa (%)									
	ES1	ES2	ES3	ES1	ES2	ES3	ES1	ES2	ES3
2020-2049	+26,1	+38,4	+29,1	-26,6	-19,7	-10,47	-9,8	+50,5	+30,8

Fuente: Elaboración propia.

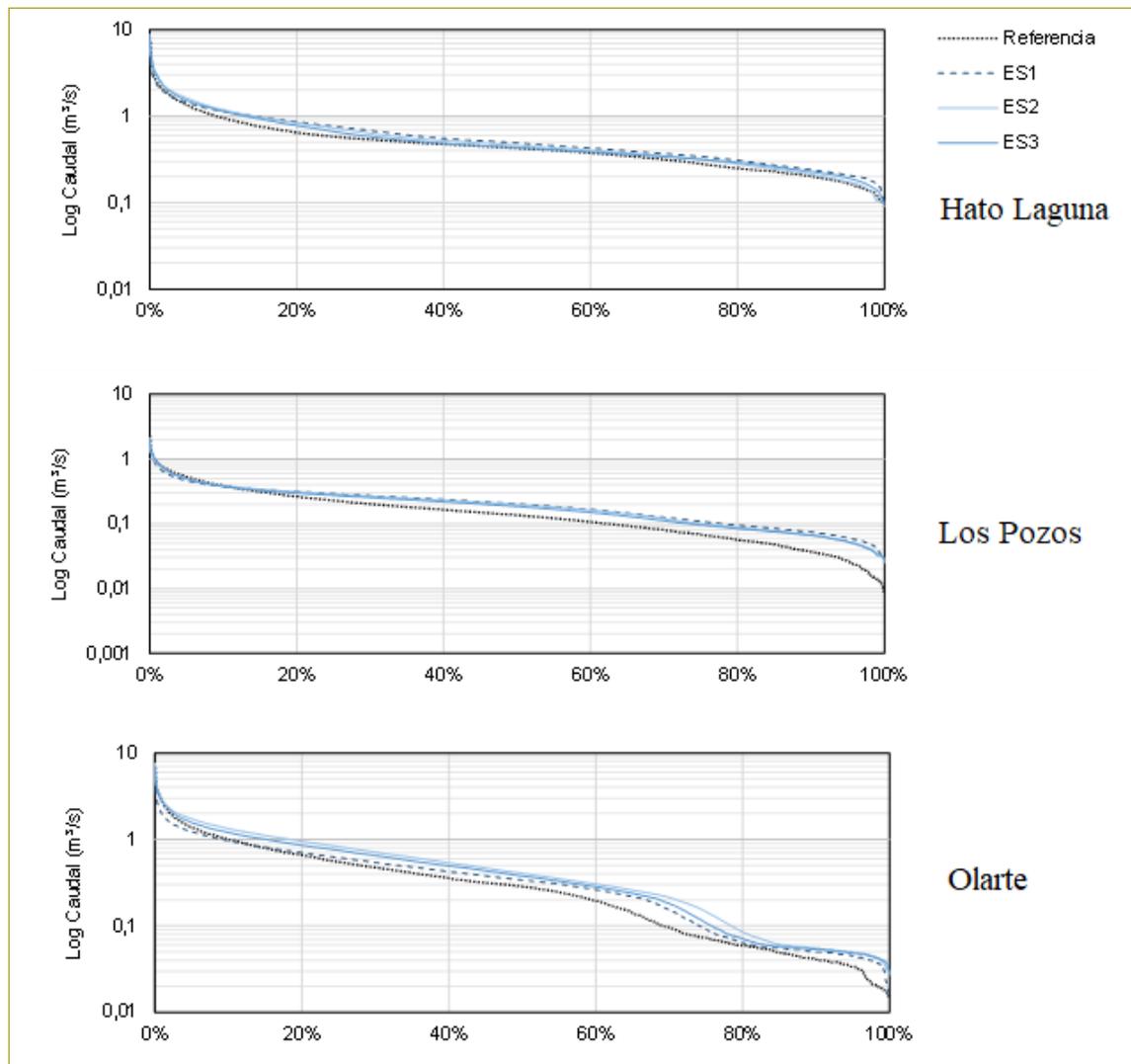


Figura 7. Curvas de duración de caudales medios diarios Hato Laguna, Los Pozos y Olarte; periodo de referencia vs ES1, ES2 y ES3.

Fuente: Elaboración propia.

los tres escenarios, en especial entre el 50 y 80 % de las excedencias, encontrando caudales mínimos similares entre ES2 y ES3, y los de ES1 un poco menores. Esto indica que el incremento en las lluvias podría incidir positivamente en la permanencia del caudal superficial del río Olarte, sobre todo en los caudales medios y mínimos, ya que el exceso de lluvia se convierte en flujo base más estable.

CONCLUSIONES

El modelo hidrológico, acorde con la metodología de evaluación de eficiencia utilizada, es apropiado para

representar el flujo precipitación-escorrentía de las subcuencas instrumentadas analizadas, y a la vez se demuestra que el *software* HEC-HMS es un programa adecuado para simulaciones en ecosistemas de páramo. La calibración y validación del modelo usando la metodología *Soil Moisture Accounting* tiende a sobrestimar los caudales base durante temporadas de baja precipitación en las subcuencas Hato Laguna y Los Pozos, mientras que se comporta más adecuadamente en la subcuenca Olarte. Así mismo, se observó una inclinación a subestimar los caudales de crecida en todas las subcuencas simuladas.

Las diferencias halladas entre el coeficiente de escorrentía de periodos secos y húmedos están relacionadas

con el volumen de lluvia precipitada, afectando en mayor medida la oferta hídrica disponible en los años secos que en los años lluviosos; las diferencias entre subcuencas se deben principalmente a la cobertura vegetal, pues a mayor área con vegetación de páramo (arbustal y herbazal denso del código Corine Land Cover Colombia), mayor rendimiento hídrico en la subcuenca, puesto que los conflictos de uso del suelo medidos en la diferencia entre uso actual y uso potencial del suelo es de 45,4 %, 42,1 % y 29,7 % en las subcuencas Hato Laguna, Olarte y Los Pozos, respectivamente. Estos cambios, que mejorarán la cobertura vegetal de páramo, incidirán en posibles incrementos en el rendimiento hídrico de la subcuenca del río Hato Laguna, al tiempo que mejorarían la regulación hídrica del río Olarte (tema para una futura investigación).

Según los escenarios de cambio climático propuestos, se observan incrementos de caudal en todas las subcuencas, relacionados con el aumento de las lluvias que se esperan en tres de las cuatro estaciones analizadas. Los caudales de flujo base simulados se incrementan en los tres escenarios en todas las subcuencas, pero no en la misma proporción, puesto que en la subcuenca del río Hato Laguna, mientras más cálido sea el escenario, el caudal base será relativamente menor, situación similar a la ocurrida en la quebrada Los Pozos. Esto se relaciona con el aumento de la ET_0 y la disminución de la precipitación en los escenarios de mayor temperatura observados en las subcuencas, puesto que la evapotranspiración, al depender de la temperatura, provocará mayores pérdidas de agua en los meses más secos y cálidos (diciembre, enero y febrero), cuando el caudal base baja.

La estabilidad de los caudales ambientales observados, junto con el caudal medio y el IRH, indica que la subcuenca del río Olarte es más vulnerable en temporadas secas, mientras que Los Pozos y Hato Laguna son menos propensos a tener caudales mínimos demasiado bajos. La variabilidad climática, que supone escenarios con aumentos más drásticos de temperatura, se traduce en climatología más inestable y con probabilidades de eventos de precipitación más extremos a medida que la temperatura aumenta; por lo tanto, implica que los eventos de inundación no serán más frecuentes, pero sí más intensos, en las subcuencas Hato Laguna y Olarte.

La disponibilidad del recurso hídrico calculada mediante la oferta hídrica media para las tres subcuencas

sería de 40,49 Mm³/año para ES1, 44,93 Mm³/año para ES2 y 42,54 Mm³/año para ES3; esto da a entender que ES2 es el escenario más favorable para la oferta hídrica, mientras que ES3 sería menos favorable y ES1 sería el más desfavorable. En todos los casos hay un incremento con respecto a la oferta hídrica de caudales superficiales actual, que en el futuro sería aproximadamente 56,71 Mm³/año en ES1, 62,93 Mm³/año en ES2 y 59,57 Mm³/año en ES3 para toda la cuenca del lago de Tota.

En términos generales, la oferta hídrica superficial de las quebradas y ríos que dependen del páramo de la cuenca del lago de Tota no se verán afectados por el cambio climático global. Los incrementos de temperatura que se esperan para esta región de alta montaña incidirán positivamente en la distribución de precipitaciones de la cuenca del lago y, sin embargo, eventos de variabilidad climática pueden extender los periodos secos (fenómeno de El Niño) o contribuir con precipitaciones muy intensas (fenómeno de La Niña), como se ha registrado en las últimas dos décadas. En consecuencia, el aumento de la escorrentía superficial total podría agravar el problema del arrastre de nutrientes (nitrógeno y fósforo), residuos de pesticidas e incremento de sólidos suspendidos que se depositarían en el espejo del lago de Tota, contaminantes que afectan la salud de la población que se abastece del agua de la cuenca y favorecen la eutroficación del lago (Espinosa, 2018).

Se debe agregar que el incremento de precipitaciones en exceso puede anegar las zonas bajas y llanas cultivadas de las subcuencas, dañar la infraestructura vial por eventuales crecientes, provocar fenómenos de remoción en masa más frecuentes, afectar el turismo y generar pérdidas económicas para la región. Al mismo tiempo, los incrementos de temperatura de escenarios más cálidos ponen en riesgo, a largo plazo, los niveles de caudal mínimo en las quebradas y ríos, favorecen los incendios forestales especialmente en el páramo y generarían conflictos sociales por la utilización del agua en épocas de sequía.

REFERENCIAS

- Adedeji, O., Reuben, O., & Olatoye, O. (2014). Global Climate Change. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 02(02), 114-122. doi: <http://dx.doi.org/10.4236/gep.2014.22016>.
 Alaska Satellite Facility (2011). *Conjunto de datos ALOS Palsar Radiometric Ground Corrected (RTC)*. Plancha AP_24449_FBD_F0090_RT1. Tomado de 10.5067 / Z97HFCNKR6VA.

- Arcos, M. E. (2010). *Influencia de la cobertura vegetal en la capacidad de infiltración de agua en suelos de páramo* (trabajo de grado, pregrado en licenciatura en Educación Ambiental. Universidad San Francisco de Quito, Quito, Ecuador). <http://repositorio.usfq.edu.ec/bitstream/23000/1070/1/99554.pdf>.
- Beltrán García, L. E. (2018). *Efecto de las variables climáticas y uso del suelo sobre la oferta hídrica en la cuenca del río Gachaneca (Boyacá, Colombia) como escenario para la gestión integral del recurso hídrico* (trabajo de investigación, magíster en Ciencias Ambientales, Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales UDCA, Bogotá, D.C.).
- Buytaert, W., Célleri, R., De Bièvre, B., & Cisneros, F. (2010). Hidrología del páramo andino: propiedades, importancia y vulnerabilidad. 26 pp.
- Buytaert, W., Célleri, R., De Bièvre, B., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J., & Hofstede, R. (2006). Human impact on the hydrology of the Andean páramos. *Earth-Science Reviews*, 79(1-2), 53-72. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.earsci-rev.2006.06.002>.
- Buytaert, W., Célleri, R., & Timbe, L. (2009). Predicting climate change impacts on water resources in the tropical Andes: effects of GCM uncertainty. *Geophysical Research Letters*, 36(7).
- Buytaert, W., & De Bièvre, B. (2012). Water for cities: the impact of climate change and demographic growth in the tropical Andes. *Water Resources Research*, 48(8). W08503, doi: 10.1029/2011WR011755.
- Buytaert, W., Wyseure, G., De Bièvre, B., & Deckers, J. (2005). The effect of land-use changes on the hydrological behavior of Histic Andosols in south Ecuador. *Hydrological Processes*, 3985-3997.
- Castañeda Morales, Y. (2016). *Modelación del efecto del cambio de uso del suelo en la cuenca del río Coello, bajo escenario de cambio climático, a través de la aplicación del modelo hidrológico SWAT* (trabajo de grado, ingeniero forestal, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, D.C.).
- Castro Méndez, C., Agualimpia Dualiby, Y., & Sánchez Sánchez, F. (2016). Modelo climático de los páramos de la cordillera Oriental colombiana, aplicado a regímenes de temperatura del suelo. *Perspectiva Geográfica*, 21(1), 33-62. <https://doi.org/10.19053/01233769.4541>.
- Consejo Nacional de Política Económica y Social (Conpes) (2014). *Manejo ambiental integral de la cuenca hidrográfica del lago de Tota: documento Conpes 3801*. Bogotá, D.C.: Departamento Nacional de Planeación. Recuperado de <http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/conpes/12-Conpes%20No.%203801-2014.pdf>.
- Corpoboyacá & Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (2015). Estudios técnicos, económicos, sociales y ambientales para la identificación y delimitación del complejo Tota-Bijagual-Mamapacha a escala 1:25.000 (479 pp.). Tunja: Corpoboyacá.
- Cottrell, A., & Lucchetti, R. (2020). *Gretl User's Guide*. Capítulo 30: Modelos univariados de series de tiempo. Tomado de <http://www.gnu.org/licenses/fdl.html>.
- Crespo, P. et al. (2014). Impactos del cambio de uso de la tierra sobre la hidrología de los páramos húmedos andinos. En F. Cuesta, J. Sevink, L. D. Llambí, B. de Bièvre & J. Posner (eds.), *Avances en investigación para la conservación de los páramos andinos*. Lima: Condesan.
- Daza Torres, M. C., Hernández Flórez, F., & Triana, F. A. (2014). Efecto del uso del suelo en la capacidad de almacenamiento hídrico en el páramo de Sumapaz, Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía*, 67(1), 7189-7200. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=1799/179930032006>.
- Devia, G. K., Ganasri, B. P., & Dwarakish, G. S. (2015). A review on hydrological models. *Aquatic Procedia*, 4, 1001-1007. doi: <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.126>.
- Espinosa R., A. J. (2018). *El agua, un reto para la salud pública. La calidad del agua y las oportunidades para la vigilancia en salud ambiental* (tesis de doctorado en Salud Pública, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, D.C.). Tomado de [http://bdigital.unal.edu.co/63280/1/PhD %20Adriana %20 %20EspinosaRamirez.pdf](http://bdigital.unal.edu.co/63280/1/PhD%20Adriana%20%20EspinosaRamirez.pdf).
- Franco Vidal, L., Delgado, J., & Andrade, G. I. (2013). Factores de la vulnerabilidad de los humedales altoandinos de Colombia al cambio climático global. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 22 (2), 69-85. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v22n2.37018>.
- Gil Morales, E. G. (2012). *Modelación hidrológica de los páramos andinos con Topmodel: páramo de Chingaza, Colombia* (tesis de Maestría en Bosques y Conservación Ambiental, Universidad Nacional de Colombia, Medellín).
- Guerra Amán, M. J. (2019). *Estimación de la variabilidad espacial y temporal de la escorrentía en microcuencas de páramos del Ecuador* (proyecto de investigación, maestría en Ingeniería Civil, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador).
- Gutiérrez Uribe, M. (2016). *Sensibilidad del recurso hídrico en el páramo Romerales ante el cambio climático* (trabajo de grado, magíster en Ingeniería de Recursos Hidráulicos, Universidad Nacional de Colombia, Medellín).
- Guzmán M., O., Baldión R., J. V., Simbaqueva F., O., Zapata, H. J., & Chacón C., C. (2013). Coeficientes para estimar la radiación solar global a partir del brillo solar en la zona cafetera colombiana. *Revista Cenicafe*, 64(1): 60-76.
- Hydrological Engineering Center (HEC) (2018). User's Manual for HEC-HMS V4.4.1. Tomado de <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/hmsdocs/hmsum/4.4>.
- Ideam, PNUD, MADS, DNP, Cancillería (2017). Resumen ejecutivo de la tercera comunicación nacional de Colombia a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC). Bogotá, D.C., Colombia.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam) (2011). Promedios climatológicos en Colombia. Período 1981-2010, 6 pp. Tomado de <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/clima>.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam) (2015). *Escenarios de cambio climático para precipitación y temperatura para Colombia, 2011-2100. Herramientas científicas para la toma de decisiones. Estudio técnico completo*. Bogotá, D.C.: Una Tinta Medios.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam) (2016). Formato común de hoja metodológica de indicadores ambientales: índice de retención y regulación hídrica (vers. 1, 16 pp.). Bogotá, D.C.: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam) (2019). *Estudio Nacional del Agua 2018*. M. García Herrán, N. O. Vargas Martínez, O. Jaramillo Rodríguez & J. P. Marín Salazar (eds.) (1ª ed., vol. 1, 452 pp.). Bogotá, D.C.: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam) (2020). Base de datos hidroclimatológicos de Colombia. Consultado el 15/12/2019, de Ideam <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) (2012). Mapas físico-políticos del territorio colombiano. Escala 1:100.000. Recuperado de Mapas Departamentales Físico Políticos | GEOPORTAL (igac.gov.co).

- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2014). *Climate change 2014: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Ginebra, Suiza: IPCC.
- Jaramillo Robledo, A. (2006). Evapotranspiración de referencia en la región andina de Colombia. *Cenicafé (Colombia)*, 57(4), 288-298. [https://www.cenicafe.org/es/publications/arc057\(04\)288-298.pdf](https://www.cenicafe.org/es/publications/arc057(04)288-298.pdf).
- Lizarazo Rincón, Y. M. (2018). *Análisis hidrológico de la cuenca alta del río Tunjuelo en el páramo Sumapaz y predicción ante escenarios climáticos* (trabajo de grado, magister en Ciencias Ambientales, Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Bogotá, D.C.). Recuperado de <http://hdl.handle.net/20.500.12010/3401>.
- Llambí, L. D., Soto, A., Celleri, R., De Bievre, B., Ochoa, B., & Borja, P. (2012). *Ecología, hidrología y suelos de páramos: Proyecto Páramo Andino* (1ª ed.): Quito: Condesan.
- Marín Valencia, V. (2010). *Evaluación de la relación entre la evapotranspiración potencial teórica y la evaporación registrada en los departamentos de Cundinamarca y Valle del Cauca* (trabajo de grado, pregrado en Ingeniería Civil, Universidad Pontificia Javeriana, Bogotá, D.C.).
- Mateus, M. C. (2014). Análisis de la cobertura vegetal, uso del suelo y su impacto en la desecación del lago de Tota (18 pp). Recuperado de <http://hdl.handle.net/10654/11585>.
- Molnar, P. (2011). Calibration. *Watershed modelling*, SS 2011. Suiza: Institute of Environmental Engineering, Chair of Hydrology and Water Resources Management, ETH Zürich.
- Moyano Pérez, J. S. (2018). *Método de correlación de humedad edáfica en suelos intervenidos forestalmente y protegidos en el páramo de Siscunsi, Boyacá* (trabajo de grado en Ingeniería Ambiental, Universidad Santo Tomás, Bogotá, D.C.). <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/10663/2018jua nmoyano.pdf?sequence=4&isAllowed=y>.
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual model. Part 1A. Discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10, 282-290. [http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6).
- Núñez, L., Triana, J. V., Verdugo, N., Sopó, G., & Martínez, Ó. (2014). *Informe batimetría lago de Tota* (40 pp.). Bogotá, D.C.: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam).
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) (2006). Evapotranspiración del cultivo en condiciones no estándar (cap. IV). *Evapotranspiración del cultivo* (pp. 161-208). Roma: FAO.
- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (Unesco) (1982). *Guía metodológica para la elaboración del balance hídrico de América del Sur*. Oficina Regional de Ciencias y Tecnología de la Unesco para América Latina y el Caribe. Montevideo: Unesco.
- Ramos Franco, A. L., & Armenteros Pascual, D. (2019). Intercepción y escorrentía del bosque altoandino en la reserva forestal protectora El Malmo. *Acta Biológica Colombiana*, 24(1), 97-108. <https://dx.doi.org/10.15446/abc.v24n1.67039>.
- Ruiz, D., Moreno, H. A., Gutiérrez, M. E., & Zapata, P. A. (2008). Changing climate and endangered high mountain ecosystems in Colombia. *Science of the Total Environment*, 398(1-3), 122-132. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.02.038>.
- Singh, A. (2018). A concise review on introduction to hydrological models. *Global Research and Development Journal for Engineering*, 3(10), 14-19. https://www.grdjournal.com/article?paper_id=GRDJEV031100020.
- Timbe Castro, L., Crespo Sánchez, P., & Cabrera-Balarezo, J. (2019). Evaluación del modelo HEC-HMS para la simulación hidrológica de una cuenca de páramo. *DYNA*, 86(210), 338-344. doi: <https://doi.org/10.15446/dyna.v86n210.70738>.
- Torres Romero, S. F., & Proaño Santos, C. O. (2018). Componentes del balance hídrico en los páramos de Jatunsacha, Ecuador. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*, 28(2): 52-66. <http://doi.org/10.17163/lgr.n28.2018.04>.
- Valencia Leguizamón, J., & Tobón Marín, C. (2017). Influencia de la vegetación en el funcionamiento hidrológico de cuencas de humedales de alta montaña tropical. *Revista Ecosistemas*, 26(2), 10-17. doi: 10.7818/ECOS.2017.26-2.02.
- Vásquez Cerón, A., & Buitrago Castro, A. C. (2011). *El gran libro de los páramos*. Bogotá, D.C.: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt: Proyecto Páramo Andino.
- Zuluaga Pulgarín, D. P. (2018). *Evaluación de metodologías de interpolación de radiación solar en Colombia* (trabajo de grado, pregrado en Ingeniería Ambiental, Escuela de Ingeniería de Antioquia, Envigado, Antioquia).

Evaluación de la cáscara de plátano (*Musa AAB Simmonds*) como coagulante natural para la clarificación y remoción de hierro en agua

Evaluation of plantain peel (*Musa AAB Simmonds*) as a natural coagulant for the clarification and removal of iron in water

MARIO FERNANDO ORTIZ CARVAJAL¹ - MARÍA PAULINA VILLEGAS DE BRIGARD²

1. Magíster en Ingeniería Civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Bogotá, Colombia.

2. Magíster (DEA) en Ciencias y Técnicas del Agua. Profesora titular del Centro de Estudios Ambientales de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Bogotá, Colombia.

mario.ortiz-c@mail.escuelaing.edu.co - maria.villegas@mail.escuelaing.edu.co

Recibido: 20/05/2020 Aceptado: 30/07/2020

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

Resumen

El plátano, en sus diversas variedades, se cultiva ampliamente en Colombia por ser un recurso de fácil adquisición y bajo costo; gracias a sus concentraciones de almidón y a las características propias coagulantes reportadas por varios autores, así como también a su amplia zona de siembra y producción, que abarca la casi totalidad del territorio, se tomó la cáscara de este vegetal en la variedad *Musa AAB Simmonds*, que es la más común y comercializada en Colombia, como óptima para la revisión de un posible sustituto o coadyuvante orgánico de los coagulantes tradicionales, en tratamientos de agua, en el territorio colombiano.

Se hicieron ensayos de jarras con una solución generada a partir de la cáscara de plátano, siguiendo metodologías de estudios similares; como resultado de estos ensayos se evidenció que en ninguna de las aguas, ni tampoco en ninguna de las concentraciones de coagulante natural a base de cáscara de plátano, se formó floc, eliminando de tajo la hipótesis planteada; sin embargo, al realizar ensayos en aguas con concentraciones de hierro de 200 mg/L, se encontró que la solución a base de cáscara de plátano tiene propiedades bioadsorbentes para la eliminación de hierro (Fe) en soluciones acuosas con pH mayores de 8,0, reduciendo hasta en un 99,99 % la concentración de hierro en el agua, viéndose un mejor comportamiento con la concentración de 90 mg/L de la solución bioadsorbente.

Palabras claves: cáscara de plátano, bioadsorbente, remoción de hierro, coagulante natural.

Abstract

Plantain, in its diverse varieties, is widely cultivated in Colombia; thanks to its starch concentrations and the coagulant characteristics reported by various authors and to its wide area of sowing and production that covers almost the entire territory, which makes this a resource of easy acquisition and low cost. The peel of this vegetable from the *Musa AAB Simmonds* variety, which is the most common and commercialized in Colombia, was set as optimal for the review of a possible substitute or organic adjuvant of traditional coagulants in water treatments, in the Colombian territory.

Jar tests were performed with a solution generated from plantain peel following similar study methodologies; as a result of these tests, it was evidenced that, in none of the waters, with any of the concentrations of natural coagulant based on plantain peel, floc was formed, eliminating the hypothesis raised. However, when carrying out tests in water with iron concentrations of 200 mg / L, it was found that the plantain peel-based solution has bioadsorbent properties, for the elimination of iron (Fe) in aqueous solutions with a pH greater than 8.0, reducing the iron concentration in the water by up to 99.99 %, evidencing a better performance with the concentration of 90 mg / L of the bioadsorbent solution.

Keywords: banana peel, bioadsorbent, iron removal, natural coagulant.

INTRODUCCIÓN

El uso de los coagulantes químicos se asocia con altos costos de adquisición, producción de grandes volúmenes de lodo, alteración del pH del agua y subproductos indeseables que pueden tener un efecto adverso en la salud de los consumidores. Tal es el caso del sulfato de aluminio, el cual, a pesar de su excelente eficiencia en la remoción de materiales orgánicos y microorganismos, se asocia a enfermedades óseas, así como al Alzheimer y el cáncer (Miller, Ezekiel, Oyanedel, Smith & Zimmerman, 2008; Gurdíán-López & Coto-Campos, 2011, citados en Molina, 2016). Por tal razón, se hace necesario buscar alternativas como los coagulantes de origen natural, que son menos tóxicos, tanto para los seres humanos como para el medio ambiente (Guzmán, Villabona, Tejada & García, 2013, citados en Carrasquero, Montiel, Parra, Marín & Díaz, 2017, p. 91), y también menos costosos, si son producidos localmente (García-Fayos, Arnal Arnal & María, 2015).

Coagulantes para tratamiento de aguas

Entre los productos utilizados en los procesos de tratamiento de aguas se encuentran los coagulantes-floculantes, que se clasifican en tres tipos: coagulantes a base de sales metálicas, coagulantes a base de polímeros sintéticos y coagulantes de origen natural (Tafur & Quevedo, 2014, citados en Fúquene & Yate, 2018). Los coagulantes de origen natural y sus posibles beneficios, como menor producción de lodos, baja modificación del pH y bajo costo, hacen interesante su investigación, al igual que la búsqueda de lograr un óptimo entendimiento de sus capacidades reales en diversas condiciones y tipos de aguas.

Coagulantes-floculantes naturales

La historia del empleo de coagulantes naturales es larga. Los polímeros orgánicos naturales se han utilizado durante más de 2000 años en India, África y China como coagulantes efectivos y ayudas coagulantes en turbidez alta del agua (Asrafuzzaman, Fakhruddin & Hossain, 2011, p. 1; García-Fayos, Arnal Arnal & María, 2015, p. 150). No obstante, desde hace poco tiempo (aproximadamente desde la década de los setenta) se han llevado a cabo varios estudios en pro de la validación del potencial de nuevos coagulantes y coadyuvantes orgánicos para

el tratamiento de diversos tipos de aguas (Aguilar, Sáez, Lloréns, Soler & Ortuño, 2002, p. 17).

Entre los coagulantes naturales se encuentran los derivados del almidón y la celulosa, extractos vegetales, alginatos, ciertas gomas y quitosán (Aguilar, Sáez, Lloréns, Soler & Ortuño, 2002, p. 59), taninos, moringa oleífera y cactus (Guzmán, Villabona, Tejada & García, 2013). Éstos pueden tener propiedades catiónicas, como el quitosán, los taninos y el almidón; aniónicas, como los polisacáridos sulfatados y sus derivados, y no iónicas, como algunos derivados del almidón, derivados de celulosa, galactomanosa y gelatinas (Aguilar, Sáez, Lloréns, Soler & Ortuño, 2002).

El plátano como agente para el tratamiento de aguas

Con el plátano en sus diversas variedades, ya sea con el fruto o con los desechos, se han efectuado varios estudios, entre éstos su empleo como biosorbente de uranio; se han reportado también las propiedades que posee la biomasa del banano en la remoción de arsénico; la capacidad de adsorción de la cáscara del banano de elementos como plomo, hierro y manganeso; la capacidad del tanino extraído de la savia del tallo del banano para la clarificación de aguas; la remoción de turbidez y de sulfatos, cobre, cromo, zinc y plomo, con cáscaras de banano; la clarificación de aguas utilizando pulpa de banano; la capacidad de remoción de la turbidez de la cáscara del plátano en aguas residuales de la industria láctea, empleando polímeros aniónicos como coadyuvantes, y la capacidad de la biomasa de la cáscara del banano (*Musa paradisiaca*), en la remoción de plomo (Pb).

Plátano (*Musa AAB Simmonds*)

La planta del plátano y la planta del banano son monocotiledóneas, y forman parte de la familia de las musáceas, de donde se desprenden dos especies: la *Musa acuminata*, de la cual se desprenden los bananos, y la *Musa balbisiana*, que en cruces interespecíficos con los *Musa acuminata* da origen al subgrupo de los plátanos (Belalcázar Carvajal, 1991, p. 50).

En líneas generales, una planta de plátano está formada por el sistema radicular, el tallo y sus yemas, el sistema foliar y la inflorescencia que da origen al racimo (Belalcázar Carvajal, 1991, p. 58).

Tabla 1
Variedades de plátanos cultivados en Colombia

Nombre vulgar	Grupo	Subgrupo	Genoma predominante	Altitud ideal de cultivo	Utilización	
					Verde	Maduro
Hartón	(AAB)	Plátano tipo (<i>Horn</i>)	Acuminata	0-1000 msnm	Patacones, sancochos	Tajadas
Dominico hartón	(AAB)	Plátano tipo (<i>Horn</i>)	Acuminata	0-1500 msnm	Patacones, sancochos	Tajadas
Dominico	(AAB)	Plátano tipo (<i>French</i>)	Acuminata	0-2000 msnm	Patacones, sancochos, harinas	Tajadas
Cachaco o popocho	(ABB)	Plátano tipo (<i>Bluggoe</i>)	Balbisiana	0-2000 msnm	Harina para alimentación animal	Tajadas
Pelipita	(ABB)	Plátano tipo (<i>Bluggoe</i>)	Balbisiana	0-2000 msnm	Patacones	Tajadas

Fuente: Tabla elaborada por el autor, con base en la información extraída de Belalcázar Carvajal (1991).

Según Quiceno, Giraldo & Villamizar (2014), las características fisicoquímicas del fruto del plátano al momento de la cosecha son 66,2 % de agua, 0,3 % de grasa, 1,3 % de proteínas, 1,1 % de fibra, 0,8 % de vitamina y cenizas, y 30,7 % de carbohidratos, en su mayoría en forma de almidón en el fruto verde y en forma de azúcares invertidos en el maduro.

En Colombia se siembran diferentes clones de plátanos comestibles, pero los más consumidos y explotados son los cinco que se presentan en la tabla siguiente (tabla 1).

La producción mundial de musáceas en 2007 se estimó en 104 millones de toneladas. Colombia se

ubicó como el séptimo productor del planeta con seis millones de toneladas, después de India, Uganda, Brasil, China, Filipinas y Ecuador; más de la mitad de esta producción (3,1 millones de toneladas) corresponde al grupo de musáceas Plantain (AAB) (Castellanos & Lucas, 2011); en 2015 esta cifra subió a 3,4 millones de toneladas, en 2016 a 3,9 millones de toneladas, en 2017 a 4,2 millones y en 2018 llegó a 4,3 millones de toneladas (Minagricultura, 2018).

En el año 2016, Colombia ya ocupaba el cuarto lugar en producción, rendimiento y área sembrada de plátano a escala mundial, confirmando el crecimiento sostenido que ha tenido su cultivo en el país año tras año, como se evidencia en la figura siguiente, en la que se encuentran los datos de la producción de plátano en Colombia en el periodo 2008-2018, así como las hectáreas de tierra requeridas para estas cosechas (figura 1).

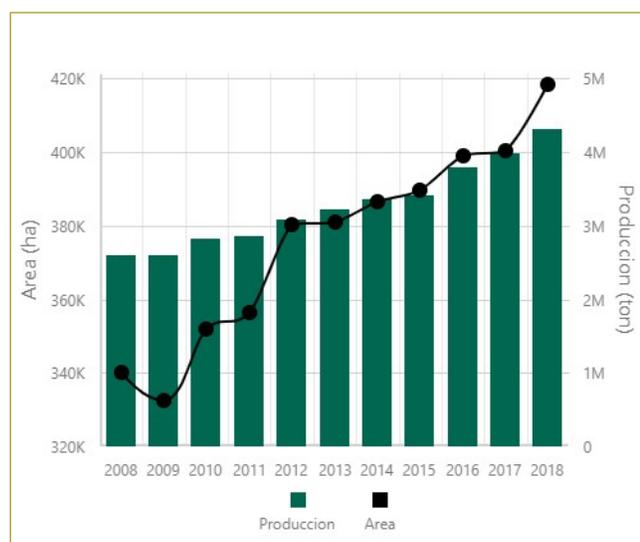


Figura 1. Producción y área cosechada de plátano en Colombia.

Fuente: Área cosechada y producción; búsqueda periodo 2008-2018 (Agronet, 2020).

Cáscara de plátano (*Musa AAB Simmonds*)

La cáscara corresponde al 31,51 % del peso total del fruto del plátano, en plátanos de segundas y terceras, y aproximadamente al 39 % en plátanos de primeras (Mazzeo, Alzate & Marín, 2008, p. 64). Esto permite estimar que de los 4,3 millones de toneladas de plátano que se produjeron en el año 2018 en Colombia, entre 1,4 y 1,6 millones de toneladas eran cáscara de plátano, que se convertirían eventualmente en desechos.

Según lo referenciado por Mazzeo, Alzate & Marín (2008), el plátano producido en Colombia genera grandes cantidades de desechos y volúmenes de residuos poscosecha durante la comercialización; estos residuos son en su mayoría frutos verdes o inmaduros, con

grandes contenidos de almidón que, de ser extraído correctamente, podría funcionar como una alternativa de comercialización para pequeños productores; dichos residuos equivalen al 10 % de la producción, representados en pérdidas por patologías, pérdidas por daños mecánicos y frutos desechados por tamaño y apariencia.

Como anteriormente se estimó, las cáscaras del plátano representan un desecho de algo más del 30 % del total de la producción, cifra que indica que el análisis de estos residuos de cáscara tiene un peso un poco más relevante que el de los desechos poscosecha, si se quiere llegar a una solución de eliminación o recuperación de residuos con amplio impacto ambiental en la producción, comercialización y uso del plátano.

RESULTADOS

Se procede a la fase de investigación experimental, que comienza con la obtención del coagulante a base de cáscara de plátano, al cual se le establece su capacidad de coagulación utilizando el ensayo de jarras. Para este proceso se requieren como datos previos mínimos los valores de pH, turbiedad, color y alcalinidad del agua cruda (Romero, 2002).

El agua problema seleccionada se toma del lago ubicado en las instalaciones de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Se hacen diluciones previas para mantener turbiedad y color aproximadamente constantes en el agua cruda para los ensayos de jarras.

Los ensayos para la fase de experimentación se efectuaron en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

Preparación del agua problema

La Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito está situada en la localidad de Suba, en el norte de Bogotá. En sus instalaciones se encuentra un lago, el cual tiene un espejo de agua de unos 1500 m², del que se tomó el agua para la realización de los ensayos, haciendo en laboratorio diluciones en volúmenes similares para mantener turbiedad, color y pH aproximadamente iguales para todos los ensayos.

Preparación de la solución coagulante

Varios autores han hecho trabajos de obtención de almidones a partir del plátano o el banano; sin embargo, para la ejecución de este trabajo se optó por realizarlo mediante una metodología seca, basada en los beneficios enunciados por Mazzeo, Alzate & Marín (2008) que concluyen lo siguiente: “La recuperación del almidón del plátano por el método seco requiere menores costos de inversión en áreas y equipos de proceso, y menor impacto ambiental respecto al método húmedo”.

A continuación se detalla el proceso para obtener el coagulante a partir de la cáscara de plátano:

- Recolección de las cáscaras del plátano verde.
- Lavado y secado.
- Trozado de las cáscaras.
- Deshidratación de las cáscaras.
- Molienda.
- Tamizado con malla número 40.

A continuación se pueden ver las bandejas de aluminio desechables, con cáscaras de plátano verde trozadas (figura 2).



Figura 2. Cáscaras de plátano, trozadas, dispuestas en bandejas.

Fuente: Elaboración del autor.

En la figura siguiente (figura 3) se puede ver el material tamizado, dispuesto en envases plásticos propios para el almacenamiento.



Figura 3. Polvo base para la solución coagulante.

Fuente: Elaboración propia.

Con base en la información recopilada antes y después de la deshidratación de la cáscara de plátano, se obtuvieron los pesos en gramos (g) de cada una de las cuatro bandejas.

En promedio, se evidencia que de la cáscara de plátano el 82 % corresponde a agua y el 18 % restante a la masa seca. En cuanto al rendimiento, es de 93 g por kg de cáscara sin procesar.

Así mismo, con el polvo seco tamizado de las cáscaras de plátano se procedió a preparar la solución coagulante de 10 g/L, según el siguiente procedimiento:

- Pesar 2,5 g del polvo obtenido de la cáscara de plátano.
- Disolver los 2,5 g de polvo de plátano con agua destilada en un vaso de boca ancha de 100 ml, ayudándose de una varilla de vidrio.
- Traspasar la totalidad de la mezcla del vaso a un balón volumétrico de 250 mL y aforar.
- Tapar el balón y agitar vigorosamente durante diez minutos.
- Dejar reposar durante cinco minutos.
- Filtrar a través de papel de filtro y obtener la solución de coagulante de cáscara de plátano.

La solución resultante tiene un color dorado (figura 4), así como un olor frutal agradable y suave; esta solución se utiliza el mismo día en los ensayos de jarras

proyectados (Paca Telenchano, 2017); sin embargo, otros autores han determinado su uso 48 horas después de conservada en nevera.



Figura 4. Solución coagulante filtrada.

Fuente: Elaboración propia.

Caracterización del agua problema

Sobre el agua cruda y el agua coagulada en los ensayos de jarras se determinaron el pH, la conductividad, el color, la turbiedad y la alcalinidad.

Ensayos hechos al agua problema con coagulantes

Se hicieron ensayos de jarras, con dosis entre 10 y 2000 mg/L de coagulante, sin obtener formación de floc.

Posteriormente, se agregó cal al agua para subir el pH hasta un valor aproximado de 10 y se ensayaron dosis entre 10 y 300 mg/L. En estos ensayos tampoco se encontraron resultados favorables.

De manera paralela, se evaluó si el agua problema coagulaba razonablemente con un coagulante convencional, como el sulfato de aluminio, y se determinó una dosis óptima de 40 mg/L, con coagulación positiva.

Dados los resultados negativos de la solución como coagulante, se realizaron nuevos ensayos para evaluar su funcionamiento como ayuda de coagulación. Se utilizó entonces en proporción 50:50, con sulfato de aluminio. Los resultados se presentan a continuación (tablas 2 y 3).

Tabla 2
Resultados de ensayo con coagulante de polvo de cáscara de plátano y alumbre

Jarra		Cruda	1	2	3	4	5	6
Sulfato de aluminio, mg/L			10	20	30	10	20	30
Cáscara de plátano, mg/L		n/d	n/d	n/d	n/d	10	20	30
color	Unidades	55	n/d	n/d	7,5	n/d	n/d	15
pH	pH	8,78	n/d	n/d	6,35	n/d	n/d	5,6
Turbiedad	NTU	17,5	n/d	n/d	1,62	n/d	n/d	2,16
Conductividad	(μ S/cm)	199,5	n/d	n/d	194,3	n/d	n/d	197,2
Alcalinidad	mg/L-CaCO ₃	52	n/d	n/d	38	n/d	n/d	30
Tiempo de aparición del floc	minutos	n/d	n/d	n/d	0,5	n/d	n/d	0,5
Caracterización del floc	Índice de Willcomb	n/d	0	0	10	0	0	8

Solamente se formó floc en las jarras 3 y 6.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3
Resultados de ensayo con coagulante de polvo de cáscara de plátano y alumbre

Jarra		Cruda	1	2	3	4	5	6
Sulfato de aluminio, mg/L		n/d	40	50	60	40	50	60
Cáscara de plátano, mg/L		n/d	n/d	n/d	n/d	40	50	60
ml		n/d	2	2,5	3	2	2,5	3
color	Unidades	55	5	15	7,5	5	15	15
pH	pH	8,69	6,59	6,28	6,18	6,24	5,16	5,85
Turbiedad	NTU	17,3	0,67	0,93	0,68	0,89	1,78	2,42
Conductividad	(μ S/cm)	198,5	190,1	200,5	227	225	203,1	210,4
Alcalinidad	mg/L	52	30	28	26	29	28	25
Tiempo de formación del floc	minutos	n/d	0,5	1	1	0,5	1	1
Caracterización del floc	Índice de Willcomb	n/d	10	8	8	10	8	8

Se formó floc en todas las jarras. El floc presente en las jarras está en forma de filamentos.

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados muestran que la adición de la solución de cáscara de plátano no mejoró los parámetros de turbiedad, color o conductividad, con respecto a la utilización del coagulante convencional solo.

En vista de que la solución de cáscara de plátano no produjo coagulación alguna en el agua natural ni sirvió como ayuda de coagulación; no obstante, teniendo en cuenta varios estudios (Rodríguez Boniolo, 2008; Gamarra, 2014, y Campos & Porrás, 2019), se probó su eficiencia en la remoción de aguas con alto contenido de hierro. Para ello se preparó una solución de 200 mg/L-Fe a partir de sulfato ferroso (FeSO₄·7H₂O) agregado al agua problema.

Se llevaron a cabo dos ensayos: uno sobre el agua con hierro, cuyo pH era 4,6, y el otro ajustando el pH a 9,0 con cal. En este último se observó cómo el agua se oscureció por efecto del hierro y el pH se elevó (figura 5). Ambas soluciones de hierro se trataron con el coagulante natural a base de cáscara de plátano, con dosis entre 30 y 180 mg/L.

En el agua con pH 4,6 no se observó formación de floc, mientras que en la de pH 9,0 todas las dosis mostraron buena coagulación y sedimentación, como se puede observar a renglón seguido (figura 6).

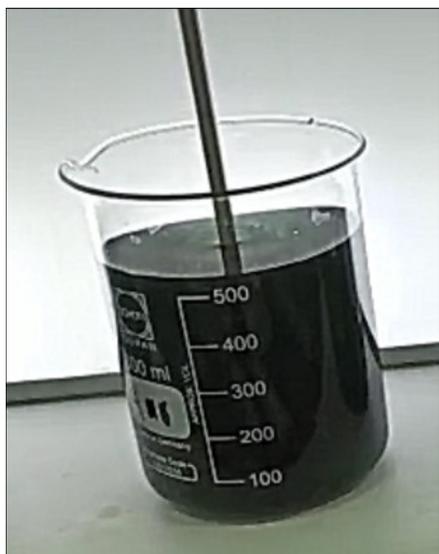


Figura 5. Agua problema con pH alto y hierro.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 6. Agua clarificada al final de la sedimentación.

Fuente: Elaboración propia.

Si se toman en cuenta la concentración inicial de hierro y la concentración residual después de los ensayos de jarras con el coagulante natural a base de cáscara de plátano, y habiendo elevado el pH a 9,0, la remoción de hierro es prácticamente total (tabla 4 y figura 7).

Tabla 4

Porcentaje de remoción del contenido de hierro en agua con pH 9,0

Dosis coagulante natural (mg/L)	Concentración de hierro inicial (mg/L)	Concentración de hierro agua coagulada (mg/L)	Remoción %
30	200	0,03	99,98 %
60	200	0,02	99,99 %
90	200	0,01	99,99 %
120	200	0,02	99,99 %
150	200	0,02	99,99 %
180	200	0,05	99,97 %

Fuente: Elaboración propia.



Figura 7. Contenido de hierro residual usando la solución de cáscara de plátano como coagulante.

Fuente: Elaboración propia.

Análisis de resultados

Por cada kg de cáscara de plátano se obtienen 93 g de polvo coagulante. Este rendimiento es mayor que el 2,5 % reportado (Paca Telenchano, 2018, p. 9) con cáscara de plátano seda.

La concentración de hierro residual presente en todas las dosis ensayadas con este metal demuestra la capacidad de remoción de hierro usando el coagulante natural preparado a partir de la cáscara de plátano, siempre y cuando se eleve suficientemente el pH. Incluso

se obtuvieron valores de concentración muy inferiores a los mínimos aceptables por el RAS (Minvivienda, 2017, p. 66), que considera como admisibles en aguas para consumo humano valores de 0,3 mg/L, aunque recomienda valores inferiores a 0,2 mg/L.

Los resultados obtenidos en la remoción de hierro por parte de la solución a base de cáscara de plátano (*Musa AAB Simmonds*) corroboran lo enunciado por Ríos (2014), para quien algunos componentes de las cáscaras de banano, fruto que también forma parte de la familia de las musáceas, logran la adsorción de metales presentes en el agua; así mismo, estos resultados confirman lo concluido por Campos y Porras (2019), quienes lograron retener hierro y manganeso utilizando un filtro casero que incluía polvo de cáscara de plátano, y apoyan también la hipótesis (Rodríguez Boniolo, 2008) acerca del potencial de la cáscara de banano en la adsorción de metales, ya que el plátano comparte muchas similitudes con éste, pues ambos son parte de la familia de las musáceas.

La efectividad de la cáscara de plátano en la remoción de aguas con alto contenido de hierro evidenciada en los ensayos también corrobora lo informado por (Ríos, 2014, p.13), quien menciona la favorabilidad en la adsorción de cationes por parte de los bioadsorbentes en soluciones acuosas de pH superiores a 4,5.

CONCLUSIONES

El coagulante obtenido a partir de la cáscara de plátano no demostró capacidad para coagular aguas naturales, dado que en los componentes de la cáscara de plátano predomina la carga eléctrica negativa, semejante a la de los coloides predominantes en el agua.

En el estudio se demostró que el coagulante a base de cáscara de plátano es efectivo para la remoción de altas concentraciones de hierro (Fe) en soluciones acuosas con pH superiores a 8,0.

Con base en los óptimos resultados mostrados de la solución coagulante en la remoción de hierro, se recomienda realizar estudios para la remoción de otros metales, preferiblemente con aguas residuales de industrias en las que se encuentren problemas de altas concentraciones de estos.

REFERENCIAS

- Agronet* (agosto de 2020). *Agronet* (Minagricultura, ed.). Recuperado en agosto de 2020, de *Agronet*: <https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=1#>.
- Aguilar, M., Sáez, J., Lloréns, M., Soler, A., & Ortuño, J. (2002). *Tratamiento físico-químico de aguas residuales: coagulación-floculación*. Murcia: Universidad de Murcia.
- Araúz, F., Julianis, B., Bósquez, M., Evelyn, C., González, Y., Martínez, E., & Héctor, R. (2015). Tratabilidad de efluentes residuales por medio de un coagulante natural a base de tanino del pseudotallo del plátano. *Revista de Iniciación Científica*, 1(1), 51-55.
- Asrafuzzaman, F., & Hossain, A. (2011). Reduction of turbidity of water using locally available natural coagulants. *International Scholarly Research Notices*. Obtenido de <https://doi.org/10.5402/2011/632189>.
- Banerjee, A. V., & Duflo, E. (2019). *Repensar la pobreza* (1ª ed.) (M. D. F. Javier, trad.). Bogotá, D.C.: Penguin Random House.
- Belalcázar Carvajal, S. L. (1991). *El cultivo del plátano (Musa AAB Simmonds) en el trópico* (ICA, ed.) Armenia: Talleres gráficos de Impresora Feriva Ltda. Recuperado en julio de 2020, de <http://hdl.handle.net/20.500.12324/12434>.
- Bryce, J., Boschi-Pinto, C., Shibuya, K., Black, R. E., & Group, T. W. (2005). WHO estimates of the causes of death in children. *Lancet*, 365, 1147-1152.
- Campos, H., & Porras, J. (2019). *Evaluación de eficiencia de la harina de cáscara de plátano (Musa spp) utilizando un filtro casero, para la adsorción de hierro y manganeso en agua para consumo humano, barrio Miramayo, distrito de Yantaló - Moyobamba - San Martín* [tesis, Universidad Nacional de San Martín, Facultad de Ecología, Moyobamba, Perú].
- Carrasquero, S. J., Montiel, S. F., Parra, P. M., Marín, J. C., & Díaz, A. R. (2017). Efectividad de coagulantes obtenidos de residuos de papa (*Sonalum tuberosum*) y plátano (*Musa paradisiaca*) en la clarificación de aguas. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 13(2), 90-99. Obtenido de <https://doi.org/10.18359/rfcb.1941>.
- Castellanos, F., & Lucas, J. (2011). Caracterización física del fruto en variedades de plátano cultivadas en la zona cafetera de Colombia. *Acta Agronómica*, 60(2), 176-182.
- Cutler, D., & Miller, G. (2005). El papel de las mejoras en la salud pública en los avances de la salud: los Estados Unidos del siglo XX. *Demografía*, 42(1), 1-22.
- Fúquene, D., & Yate, A. (2018). Ensayo de jarras para el control del proceso de coagulación en el tratamiento de aguas residuales industriales. *Ecapma, Working Papers*, 2(1).
- Gamarra, F. (2014). *Evaluación del uso de cáscaras de banano (Musa Paradisiaca sp.) para la descontaminación del agua con metales pesados de la cuenca de Milluni-La Paz* [tesis, Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de Agronomía, La Paz, Bolivia].
- García-Fayos, B., Arnal Arnal, J. M., & María, S. (2015). Uso de coagulantes naturales para la potabilización del agua en países en vías de desarrollo. En R. Puchades Pla, & C. D. Desarrollo (ed.), *Adiseo cooperación: experiencias de investigación del desarrollo humano* (pp. 145-162). Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Gurdián-López, R., & Coto-Campos, J. (2011). Estudio preliminar del uso de la semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*) en la coagulación-floculación de aguas residuales. *Revista Tecnología en Marcha*, 24(2), 18-26.
- Guzmán, A., & Guzmán, S. (2016). *Evaluación de la eficiencia de la utilización de residuos orgánicos de cáscara de banano como alternativa en la descontaminación de metales pesados en el agua del cauce del río Bogotá antes de su desembocadura en*

- el río Magdalena, en el municipio de Girardot [tesis, Universidad Piloto de Colombia, Facultad de Ingeniería Civil, Bogotá].
- Guzmán, L., Villabona, Á., Tejada, C., & García, R. (2013). Reducción de la turbidez del agua usando coagulantes naturales: una revisión. *UDCA. Actualidad y Divulgación Científica*, 16(1), 253-262.
- Kakoi, B., Wambua, J., Ndiba, P., & Thiong'o, G. (2016). Banana pith as a natural coagulant for polluted river water. *Ecological Engineering*, 95, 699-705. doi:https://doi.org/10.1016/j.ecoeng.2016.07.001.
- Mazzeo, M., Alzate, A., & Marín, M. (2008). Obtención de almidón a partir de residuos poscosecha del plátano dominico hartón (*Musa AAB Simmonds*). *Vector*, 57.
- Miller, S., Ezekiel, F., Oyanedel, V., Smith, J., & Zimmerman, J. (2008). Toward understanding the efficacy and mechanism of *Opuntia spp.* as a natural coagulant for potential application in water treatment. *Environmental Science & Technology*, 42(12), 4274-4279. doi:10.1021/es7025054.
- Minagricultura (octubre de 2018). *Indicadores e instrumentos cadena plátano* (Gobierno de Colombia, ed.) Recuperado en agosto de 2020, de <https://sioc.minagricultura.gov.co/Platano/Documentos/2018-10-30%20Cifras%20Sectoriales.pdf>.
- Minvivienda (2017). *Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico. Título C. Reglamento*, Ministerio de Vivienda, Bogotá.
- Molina, E. J. (2016). *Evaluación de coagulantes naturales en sistemas de flujo continuo, como sustituto del $Al_2(SO_4)_3$ para clarificación de aguas* [tesis de maestría, Universidad Popular del Cesar].
- Paca Telenchano, F. (2018). *Obtención del polisacárido (almidón) de la cáscara *Musa paradisiaca* L., como coagulante natural para el tratamiento del río Monjas* [tesis, Universidad Internacional SEK, Facultad de Ciencias Naturales y Ambientales, Quito, Ecuador].
- Quiceno, M. C., Giraldo, G., & Villamizar, R. (2014). Caracterización fisicoquímica del plátano (*Musa paradisiaca sp. AAB, Simmonds*) para la industrialización. *UGciencia*, 20, 48-54.
- Rice, E., Baird, R., & Eaton, A. (2017). Standard methods for the examination of water and wastewater. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation.
- Ríos, P. (2014). *Cinética de bioadsorción de arsénico utilizando cáscara de banano maduro en polvo* [tesis, Universidad Técnica de Machala, Unidad Académica de Ciencias Químicas y de la Salud, Machala, El Oro, Ecuador].
- Rodrigues Boniolo, M. (2008). *Biossorção de urânio nas cascas de banana* [tesis, Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Biogeoquímica Ambiental, São Paulo]. doi:10.11606/D.85.2008.tde-19082009-155206.
- Romero, J. A. (2002). *Calidad del agua*. Bogotá, D.C.: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Tafur, L., & Quevedo, R. (2014). *Alternativa para el tratamiento de aguas residuales cromadas* [tesis, Universidad del Tolima, Facultad de Ingeniería Agronómica, Ibagué].
- Trujillo, D., Duque, L. F., Arcila, J. S., Rincón, A., Pacheco, S., & Herrera, O. F. (2014). Remoción de turbiedad en agua de una fuente natural mediante coagulación/floculación usando almidón de plátano. *Ion*, 27(1), 17-34. Recuperado en julio de 2020, de http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0120-100X2014000100003&script=sci_arttext&lng=pt.
- Vejarano, R., Gurreonero, J., & Castillo, A. (2018). Adsorción de plomo (Pb) de aguas contaminadas mediante cáscara de plátano (*Musa paradisiaca*). *16th Laccei International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: "Innovation in Education and Inclusion"* (pp. 1-4). Lima: Laccei.
- Whittington, D., Hanemann, W. M., Sadoff, C., & Jeuland, M. (2004). Sanitation and water. *Challenge Paper*, 21.

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