

- **Déficits gemelos en Colombia y Latinoamérica.**
- **Inventario de fuentes de abastecimiento de los sistemas de acueducto de las cabeceras municipales de Colombia.**
- **¿Cuáles son los factores que influyen en el éxito de la gerencia de proyectos en las pymes del sector de las TI en Bogotá, D.C.?**
- **Análisis de la relación existente entre los accidentes viales y la señalización vial.**
- **Integración de fuentes no convencionales de energía renovable dentro del mercado eléctrico mayorista.**
- **Evaluación de la evolución de cargas contaminantes aportadas por vertimientos de aguas residuales en un humedal natural.**
- **Comportamiento a flexión pura de muros de mampostería en arcilla, reforzados con barras de FRP.**
- **Evaluación de la resistencia a compresión en morteros de cal, sometidos a diferentes condiciones de curado.**

04
Octubre - diciembre de 2018

ISSN 0121-5132
P.V.P. Colombia \$12.000.00



CONSEJO DIRECTIVO DE LA ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA

PRESIDENTE RICARDO RINCÓN HERNÁNDEZ

VOCALES GERMÁN EDUARDO ACERO RIVEROS
SANDRA XIMENA CAMPAGNOLI MARTÍNEZ
ÁLVARO ANTONIO GONZÁLEZ FLETCHER
ARMANDO PALOMINO INFANTE
RICARDO QUINTANA SIGHINOLFI
JAIRO ALBERTO ROMERO ROJAS
RICARDO SALAZAR FERRO
HENRY MORENO MOSQUERA
(representante de los profesores)
EYDI MARYOLI RIVERA ACERO
(representante de los estudiantes)

RECTOR HÉCTOR ALFONSO RODRÍGUEZ DÍAZ

SECRETARIO RICARDO ALFREDO LÓPEZ CUALLA

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

DIRECCIÓN EDITORIAL CRISTINA SALAZAR PERDOMO

EDICIÓN **DISEÑO Y DIAGRAMACIÓN**
JORGE CAÑAS SEPÚLVEDA
CORRECCIÓN DE ESTILO
ÉLKIN 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 N.º 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

Hacia un currículo por competencias

Claudia Ríos Reyes

7-20

Déficits gemelos en Colombia y Latinoamérica

Eduardo Sarmiento Palacio - Eduardo Sarmiento Gómez - Martha López

Los incrementos en el gasto público para superar las crisis internacionales generan preocupación en torno a los resultados en términos de la sostenibilidad del aumento en los déficits fiscales y en los déficits en cuenta corriente. En este artículo se presenta evidencia al respecto y se encuentra que en Colombia, y en la mayoría de los países de Latinoamérica, en la muestra, estos déficits están relacionados, aunque en la mayor parte de los casos la causalidad es reversa.

21-26

Inventario de fuentes de abastecimiento de los sistemas de acueducto de las cabeceras municipales de Colombia

Natalia Bernate Suárez - Jairo Alberto Romero Rojas

En este artículo se presenta un inventario de las fuentes de abastecimiento, tanto superficiales como subterráneas, de los sistemas de acueducto de las cabeceras municipales de Colombia, a partir de la información reportada por los prestadores del servicio de acueducto en el Sistema Único de Información (SUI), administrado por la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (Superservicios).

27-36

¿Cuáles son los factores que influyen en el éxito de la gerencia de proyectos en las pymes del sector de las TI en Bogotá, D.C.?

Jenifer Alejandra Sánchez Sarmiento - Germán Eduardo Giraldo González

Los autores de este artículo tienen como objetivo identificar, analizar y recomendar factores que influyan en el éxito de la gerencia de proyectos en pymes del sector de las TI en Bogotá, D.C., con el fin de contribuir al aumento de la productividad, competitividad y sostenibilidad de estas organizaciones.

37-43

Análisis de la relación existente entre los accidentes viales y la señalización vial

Romina Katz - Maritza Cecilia Villamizar Roper - Germán Medina

En el presente artículo se analiza la señalización vial existente en cinco de las intersecciones con mayor número de accidentes registrados en los años 2015 y 2016 en la ciudad de Bogotá. El objetivo es establecer la posible relación entre la señalización vial existente o su ausencia, y la grave accidentalidad registrada en esas intersecciones viales.

45-55

Integración de fuentes no convencionales de energía renovable dentro del mercado eléctrico mayorista

Nicolás Bobórzquez - Iván Camilo Durán-Tovar

En este artículo se explora el estado de integración de las fuentes no convencionales de energía renovable (FNCER) al sistema eléctrico colombiano, específicamente al mercado eléctrico mayorista, con el fin de modelar el mercado con estas fuentes de energía emergentes.

57-77

Evaluación de la evolución de cargas contaminantes aportadas por vertimientos de aguas residuales en un humedal natural

Alexandra Marisol Jiménez Ramos - Héctor Matamoros Rodríguez

En el presente estudio se simula el estado actual y el comportamiento asociado de un humedal natural frente a una descarga con carga orgánica ligada a un vertimiento tratado, mediante la implementación de un modelo hidráulico y de calidad de agua con el uso del *software* IBER 2D.

79-88

Comportamiento a flexión pura de muros de mampostería en arcilla, reforzados con barras de FRP

Luis Alfonso Quintana Ruiz - Nancy Torres Castellanos

En este proyecto de investigación se evalúa la capacidad a flexión de la mampostería de arcilla, reforzada internamente con barras de FRP ante cargas perpendiculares al plano, y se dan los primeros pasos para generar un protocolo preliminar de diseño para el futuro, basado en el ACI 440 y el TMS402/ACI 530, dado que aún no existe guía de diseño que contemple el comportamiento de mampostería ante esta sollicitación.

89-98

Evaluación de la resistencia a compresión en morteros de cal, sometidos a diferentes condiciones de curado

Andrés Felipe Espitia Morales - Nancy Torres Castellanos

En este artículo se evaluaron las propiedades mecánicas sobre tres tipos de morteros: uno con cal, y los restantes adicionados con puzolanas como metacaolín y polvo de ladrillo. Adicionalmente, en cada uno de los componentes de los morteros se evaluó la composición química mediante el ensayo de fluorescencia de rayos X.

99 / ALCANCE Y POLÍTICAS

Editorial

Hacia un currículo por competencias

CLAUDIA RÍOS REYES

Vicerrectora académica de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

claudia.rios@escuelaing.edu.co

En cumplimiento de la misión institucional y de las directrices establecidas en el Proyecto Educativo Institucional (PEI), y teniendo siempre como objetivo la búsqueda permanente de la excelencia y la atención de las necesidades del entorno, la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito considera necesarias la revisión y actualización de sus proyectos de formación a través de la realización de un trabajo permanente de revisión y renovación curricular.

Este trabajo, además de resultar indispensable por los constantes cambios sociales, económicos y laborales del entorno, así como por el avance de los conocimientos vinculados con los campos profesionales que se desarrollan en la institución, responde a un interés por llevar a cabo dicho proceso en el marco de las políticas de la Escuela, del Plan de Desarrollo Institucional y de los resultados de los procesos de autoevaluación que se efectúan en cada programa y en la Escuela Colombiana de Ingeniería en su conjunto.

La Escuela ha venido realizando, de manera formal, procesos participativos referidos a revisión, ajustes, actualización y renovación curricular. Es así como durante los años 2013 y 2014 los programas de pregrado, con el apoyo y la participación de los departamentos de Matemáticas, de Ciencias Naturales, y de Humanidades e Idiomas, al igual que de la Unidad de Proyectos, hicieron estudios de evaluación de sus propuestas académicas, de comparación con programas afines nacionales e internacionales, y de identificación de avances científicos

y tecnológicos en cada uno de sus campos propios de conocimiento; por su parte, la Vicerrectoría Académica, junto con un comité asesor, formuló algunos documentos que pueden servir como guías para próximos procesos, con el propósito de complementar el documento de lineamientos curriculares aprobado por el Consejo Directivo en noviembre de 2013, y de definir directrices concretas para la renovación del currículo de los programas.

En los años 2015 y 2016 el trabajo se enfocó en el diseño de un currículo enmarcado en el cumplimiento de los lineamientos y criterios curriculares que se centran en la formación por competencias y en la generación de núcleos de formación comunes y particulares de cada programa, en tanto que en 2017 se materializaron los esfuerzos en los nuevos planes de estudios y en los nuevos proyectos educativos de programa que se pusieron a consideración del Ministerio de Educación Nacional. La Escuela recibió las autorizaciones y las resoluciones respectivas durante el segundo semestre de 2017 y a lo largo del primer periodo de 2018, y la oferta de los nuevos planes de estudios para nueve programas de pregrado se inició en 2018-2, periodo en el cual, además, los estudiantes antiguos tuvieron la oportunidad, por intermedio de un plan de transición, de solicitar su cambio a los nuevos planes.

El primer paso se ha completado. En los nuevos planes de estudios de estos nueve programas de pregrado se tienen en cuenta cuatro núcleos de formación:

Núcleo de Formación Común Institucional, Núcleo de Formación Común por Campo de Conocimiento, Núcleo de Formación Básica Profesional y Núcleo de Formación Profesional Específica, todos desarrollados alrededor de un modelo pedagógico que considera al estudiante como el centro de la labor docente y que propicia la formación integral dentro del currículo y fuera de él mediante actividades como Eficiencia, Semana del Emprendimiento Novato, semilleros, seminarios y conferencias, y que le ofrece además al estudiante la posibilidad de interactuar con los posgrados, de acercarse a la investigación y de tener contacto real con el mundo laboral, mediante la selección de una opción de grado.

El siguiente paso es el mayor reto y se refiere a lo que pasa cuando la puerta del salón de clase se cierra;

si bien la mayoría de los microcurrículos o programas de asignaturas ya se han formulado con un enfoque por competencias, se requiere que los profesores tanto de planta como de cátedra se apropien de los nuevos modelos de enseñanza, así como de metodologías innovadoras de enseñanza, aprendizaje y evaluación, que permitan que en el currículo efectivamente se desarrollen y se midan las competencias que se quieren desarrollar en los estudiantes de la Escuela; por esto se deberá apuntar hacia la formación de los profesores en los temas pertinentes al diseño y ejecución de currículos por competencias.

¿Cuánto tiempo llevará llegar a esta meta? Es difícil calcularlo y definirlo. Es más importante trazar el camino y disfrutarlo.

Déficits gemelos en Colombia y Latinoamérica*

Twin Deficits in Colombia and Latin-America

EDUARDO SARMIENTO PALACIO¹ - EDUARDO SARMIENTO GÓMEZ² - MARTHA LÓPEZ³

1. Director del Centro de Estudios Económicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

2. Consultor privado y profesor de cátedra de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

3. Investigadora principal de la Unidad de Investigaciones del Banco de la República.

eduardo.sarmiento@escuelaing.edu.co - eduardo.sarmientog@escuelaing.edu.co - mlopezpi@banrep.gov.co

Recibido: 18/08/2018 Aceptado: 25/08/2018

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

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

Resumen

Desde las recientes crisis internacionales de 2007-2009, la relación de déficits gemelos ha estado en el centro de debates en todo el mundo. Los incrementos en el gasto público para superar las crisis internacionales generan preocupación en torno a los resultados en términos de la sostenibilidad del aumento en los déficits fiscales y en los déficits en cuenta corriente. Existen numerosos estudios al respecto tanto en países europeos como en Asia y Estados Unidos. En el caso de Latinoamérica, particularmente de Colombia, los estudios son escasos. Aquí se presenta evidencia al respecto y se encuentra que en Colombia, y en la mayoría de los países de Latinoamérica, en la muestra, el déficit en cuenta corriente y el déficit fiscal están relacionados, aunque en la mayor parte de los casos la causalidad es reversa.

Abstract

Since the recent international financial crisis of 2007-2009 there has been a global debate about twin deficits. The increase in public expenditure to manage the international crisis has generated uncertainty about the sustainability of fiscal and current account deficits. In Europe, Asia, and the United States there exist numerous studies about the topic. In the case of Latin America and Colombia the studies are scarce. This document shows evidence that in Colombia, and in other Latin American countries, current account and fiscal deficits are related. However, in most cases, causality is reverse.

* Las opiniones de los autores no comprometen ni a la Escuela Colombiana de Ingeniería ni al Banco de la República o su Junta Directiva.

INTRODUCCIÓN

Tanto en economías avanzadas como en economías en desarrollo, durante las últimas décadas se ha observado una estrecha relación entre los déficits en cuenta corriente de la balanza de pagos y los déficits fiscales. Una preocupación que ha surgido durante las recientes crisis internacionales de 2007-2009 ha sido que la elevación del gasto público para reactivar las economías lleve a una profundización en los déficits de cuenta corriente.

La relación entre estos déficits es conocida en la literatura como la hipótesis de los déficits gemelos cuando el balance fiscal determina la cuenta corriente y como causalidad reversa cuando la cuenta corriente determina el balance fiscal. Lo anterior se ha estudiado ampliamente tanto para países desarrollados como para países en desarrollo. No obstante, en el caso de Latinoamérica los estudios son escasos. De esta manera, en nuestro documento pretendemos probar la relación de déficits gemelos en el caso muy particular de Colombia y en algunos países de Latinoamérica.

Presentamos un modelo teórico de transables y no transables de las mismas características que el de Frenkel & Razin (1992), que describe la relación entre los dos déficits y permite la explicación de una causalidad en cualquier dirección de éstos. Complementamos el marco teórico con la presentación del tradicional modelo Mundell-Fleming, en el que se espera una causalidad del déficit público hacia el déficit en cuenta corriente.

El análisis realizado se basa en relaciones de cointegración, cuando las series lo permiten, y en vectores autorregresivos y de causalidad de Granger. Nuestros periodos de análisis son 1970-2016 para Colombia y 1979-2015 para algunos países de Latinoamérica. Adicionalmente, a manera de comparación con otros documentos, presentamos evidencia para Estados Unidos, ya que es el país que cuenta con más estudios al respecto.

Nuestros resultados muestran que en Colombia, México y Estados Unidos los déficits están cointegrados. Además, se confirman la presencia de causalidad bidireccional en el caso de Colombia, hipótesis de déficits gemelos en México y causalidad reversa en Estados Unidos. Para Chile, Uruguay, Argentina y Perú se encontró evidencia de causalidad reversa en los tres primeros y ninguna causalidad en el último.

El documento se divide en seis partes, incluyendo esta introducción. En la segunda se presenta el marco

teórico de la relación de los déficits gemelos y en la tercera los resultados de otros estudios empíricos. En la cuarta se hace un análisis descriptivo de los déficits gemelos en Colombia en 1970-2016 y se presentan los resultados de las estimaciones econométricas para Colombia. En la quinta se extiende el análisis a escala internacional, incluyendo una breve descripción de las cifras de déficits gemelos de 28 países, y luego se realiza una estimación econométrica para algunos países de Latinoamérica y para Estados Unidos. En la última sección se presentan las conclusiones.

MARCO TEÓRICO DE LA RELACIÓN DE LOS DÉFICITS GEMELOS

A continuación se presenta un modelo de transables y no transables, con un periodo y cuatro bienes, consumo de transables privados, consumo de no transables privados, consumo de transables públicos y consumo de no transables públicos, modelo que resulta similar a los presentados en Frenkel & Razin (1992). En éste se obtienen las relaciones teóricas de la interrelación de la hipótesis de los déficits gemelos.

Las ecuaciones para una economía de transables y no transables resultan de la maximización del bienestar y la maximización del valor de la producción. La maximización de bienestar se caracteriza por la optimización del consumo de transables C_t y consumo de no transables C_n , mientras el consumo del Gobierno de transables C_{tg} y no transables C_{ng} es exógeno. Por su parte, el presupuesto que determina el gasto depende del ingreso Y , el déficit del sector privado B_1 y los impuestos T . Los precios corresponden a los transados P_t y los no transados P_n .

$$\text{máx } u(C_t - C_{tg}, C_n - C_{ng}, C_{tg}, C_{ng}) \\ \{C_t, C_n\}$$

$$\text{s.a. } P_t (C_t - C_{tg}) + P_n (C_n - C_{ng}) = Y + B_1 - T$$

A continuación se considera el sistema de ecuaciones de equilibrio general, con transables y no transables. De la maximización anterior se obtienen las ecuaciones (1) y (2). Las funciones de demanda de los transables privados C_{tp} y no transables privados C_{np} dependen de los precios de los transados, precios de los no transados, el ingreso disponible y el déficit del sector privado.

$$C_{tp} = C_{tp}(P_t, P_n, Y + B_1 - T) \quad (1)$$

$$C_{np} = C_{np}(P_t, P_n, Y + B_1 - T) \quad (2)$$

El consumo total en transados es igual a la suma del consumo privado en transados y el consumo del Gobierno en transados, mientras que el consumo total en los no transados es igual a la suma del consumo privado en no transados y el consumo del Gobierno en no transados (ecuaciones 3 y 4).

$$C_t = C_{tp} + C_{tg} \quad (3)$$

$$C_n = C_{np} + C_{ng} \quad (4)$$

La oferta de transados Q_t y de no transados Q_n depende de los precios, y se obtienen de la maximización del valor de la producción (ecuaciones 5 y 6).

$$\begin{aligned} & \text{máx } P_t Q_t + P_n Q_n \\ & \{Q_t, Q_n\} \\ \text{s.a. } & Q = Q(P_t, P_n) \\ & Q_t = Q_t(P_t, P_n) \end{aligned} \quad (5)$$

$$Q_n = Q_n(P_t, P_n) \quad (6)$$

En la ecuación (7) el valor de la producción es igual al ingreso, y en la (8) se tiene equilibrio entre la producción y el consumo de los no transados.

$$Y = P_t Q_t + P_n Q_n \quad (7)$$

$$Q_n = C_n \quad (8)$$

Por último, en la ecuación (9) el déficit comercial B_2 es igual a la suma del déficit privado y el déficit público.

$$B_2 = B_1 + P_t C_{tg} + P_n C_{ng} - T \quad (9)$$

Este tiene nueve ecuaciones y nueve endógenas: $\{C_t, C_n, C_{tp}, C_{np}, Q_t, Q_n, Y, B_2, P_n\}$. El precio de los transados es exógeno.

Enseguida se considera el efecto de un aumento del consumo del Gobierno en los no transados, sin subir los impuestos, sobre los déficits gemelos, definidos como el déficit fiscal y el déficit de la balanza comercial. En los no transados se cumple la igualdad de la identidad entre el consumo y la producción, en tanto que en los transados se asume déficit comercial.

Se presume que el aumento del consumo del Gobierno causa déficit fiscal, ya que no es equiparado por un incremento de los impuestos.

Los resultados del déficit fiscal son un mayor déficit de la balanza comercial, una mayor revaluación del tipo de cambio real (con respecto al caso en el cual aumente el gasto y se mantenga fijo el déficit público), el incremento en el consumo total y la reducción del consumo privado en los no transados, el aumento en la producción de no transados y la reducción en la producción de transados, y el incremento en el consumo privado y total de transados.

El mayor déficit de la balanza comercial se debe a que éste es la suma del déficit privado y el público, y al aumentar el consumo público en los no transados sin incrementar los impuestos sube el déficit público, en tanto que el privado se asume fijo.

En el caso anterior, el mayor gasto público no tiene una contrapartida en el aumento de los impuestos o una variación del déficit privado, por lo cual el incremento del déficit fiscal es equivalente al de la balanza comercial. En la medida en que resultara una variación en el déficit privado, la variación del déficit fiscal sería diferente de la del déficit comercial.

La revaluación del tipo de cambio real se obtiene por el aumento en la demanda de los no transados con respecto a la oferta al subir el gasto público en los no transados. El incremento del gasto público en los no transados, a su vez, ocasiona el aumento del consumo total y la producción de los no transados, y la reducción de la producción de transados.

En la medida en que el déficit comercial aumenta resulta el incremento en el consumo total y privado en transados. En caso de un incremento de los impuestos que compensara el aumento del gasto público en los no transados, la reducción del gasto del sector privado ocasionaría una reducción del consumo total y privado de los transados. Mientras, con la revaluación del tipo de cambio, y el déficit inmodificado del sector privado, aumenta el consumo privado y total de los transados.

A continuación se muestra el efecto del aumento del gasto público en los no transados sin subir los impuestos, sobre el equilibrio inicial y final, respectivamente, en el consumo público de transados y no transados en E_g y E'_g , la producción total de transados y no transados en E_q y E'_q , y el consumo total de transados y no transados en E_c y E'_c (gráfico 1).

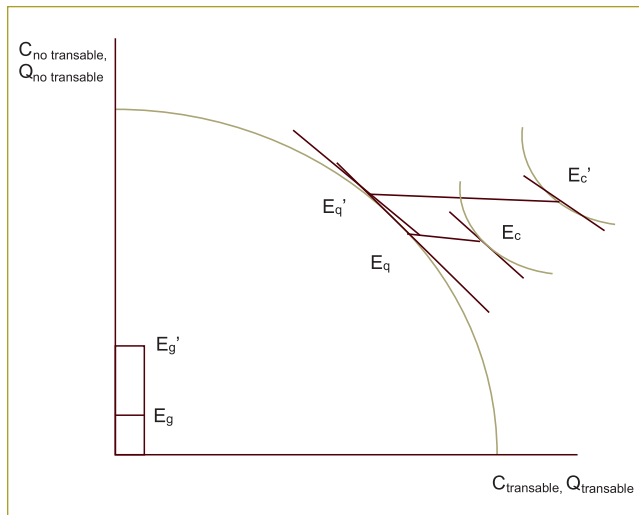


Gráfico 1. Aumento del gasto público en no transados.

Los resultados del modelo anterior corresponden a la hipótesis de déficits gemelos. Por su parte, se considera a continuación un caso en el cual se obtiene causalidad reversa, en las economías pequeñas, cuando se exportan bienes que inciden en el déficit fiscal.

Para establecer el efecto se considera un tercer bien que sólo se exporta Q_e y genera ingresos fiscales, el cual tiene un precio P_e . En los otros bienes transables se tienen el consumo total C_{ot} , la producción Q_{ot} , el consumo privado C_{otp} , el consumo del Gobierno C_{otg} y los precios P_{ot} .

El déficit de la balanza comercial es igual al consumo de los transados, menos la producción de transados (ecuación 10). El aumento del precio de los bienes exportados reduce el déficit en la balanza comercial.

$$B_2 = P_{ot} C_{otp} + P_{ot} C_{otg} - P_e Q_e - P_{ot} Q_{ot} \quad (10)$$

En los ingresos de la venta del producto exportable se asume que una proporción t son del sector público (ecuación 11).

$$B_2 = (P_{ot} C_{otp} + P_n C_{nnp} - P_e Q_e - P_{ot} Q_{ot} - P_n Q_n + T + tP_e Q_e) + (P_{ot} C_{otg} + P_n C_{nng} - T - tP_e Q_e) \quad (11)$$

$$\text{Déficit balanza comercial} = \text{Déficit privado} \\ + \text{Déficit público}$$

Cuando los mayores ingresos de un aumento en el precio del bien exportable que terminan en el sector privado sean gastados en su totalidad por éste y el consumo público se mantenga igual, la reducción de la

balanza comercial será igual a la reducción del déficit fiscal. Cuando el incremento de los ingresos también reduzca el déficit privado, la reducción del déficit de la balanza comercial será mayor que la reducción del déficit fiscal.

En la misma forma, la hipótesis de los déficits gemelos se puede considerar en modelos de Mundell-Fleming de tipo de cambio flexible y tipo de cambio fijo. Enseguida se presentan las funciones consumo C , inversión I , importaciones Z y exportaciones X . Estas dependen del ingreso Q , los impuestos T , el interés real r , la tasa de cambio real TCR y el producto foráneo Q^f .

$$C = c_1 + c_2(Q - T) - c_3 r$$

$$I = i_1 + i_2 Q - i_3 r$$

$$Z = z_1 + z_2 Q - z_3 r - z_4 TCR$$

$$X = x_1 + x_2 TCR + x_3 Q^f$$

La IS se obtiene de la identidad macroeconómica en la cual el producto es la suma del consumo, la inversión, el gasto público G y las exportaciones, menos las importaciones (ecuación 12).

$$Q = C + I + G + X - Z \quad IS \quad (12)$$

En la LM, la oferta real de dinero M/P es igual a la demanda real de dinero (ecuación 13).

$$\frac{M}{P} = m_1 + m_2 Q - m_3 r \quad LM \quad (13)$$

La balanza de pagos se encuentra en equilibrio cuando el interés interno es igual al interés foráneo r^f (ecuación 14).

$$r = r^f \quad (14)$$

Por otro lado, la balanza comercial BP son las exportaciones menos las importaciones (ecuación 15).

$$B = X - Z \quad BC \quad (15)$$

Endógenas tipo de cambio flexible: $\{Q, r, TCR, B\}$

Endógenas tipo de cambio fijo: $\{Q, r, M, B\}$

Con tipo de cambio flexible, un aumento del déficit fiscal por el mayor gasto público sin subir los impuestos

desplaza la IS a la derecha por el efecto directo y a la izquierda por el indirecto de la revaluación del tipo de cambio, mientras la BC se desplaza a la izquierda. En el nuevo equilibrio con mayor déficit fiscal, se ocasiona un déficit en la balanza comercial por la revaluación del tipo de cambio (gráfico 2).

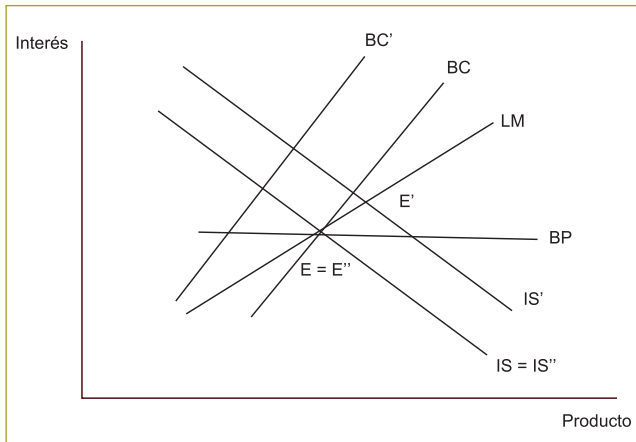


Gráfico 2. Mundell-Fleming, tipo de cambio flexible (aumento de gasto público sin impuestos).

Con tipo de cambio fijo, un aumento del déficit fiscal por el mayor gasto público, sin subir los impuestos, desplaza la IS a la derecha por el efecto directo y a la LM también a la derecha por la entrada de capitales cuando aumenta el interés. La BC se mantiene fija, pero resulta un déficit comercial en el nuevo equilibrio por el aumento del producto (gráfico 3).

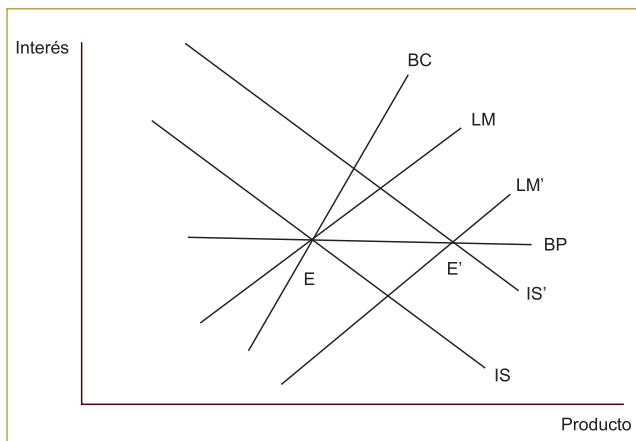


Gráfico 3. Mundell-Fleming, tipo de cambio fijo (aumento de gasto público sin impuestos).

Cuando el balance fiscal determina positivamente la cuenta corriente se considera una relación Keynesiana

de la hipótesis de los déficits gemelos, mientras en el caso en el cual no están relacionados se atribuye una relación de equivalencia ricardiana, en la cual el mayor déficit fiscal es compensado por el ahorro del sector privado. Por su parte, cuando la cuenta corriente determina positivamente el balance fiscal, se tiene causalidad reversa.

RESULTADOS EN OTROS ESTUDIOS EMPÍRICOS

La relación empírica de la cuenta corriente con el balance fiscal comúnmente se evalúa con procedimientos como la cointegración, pruebas de causalidad de Granger y vectores autorregresivos. Cuando se aplican vectores autorregresivos, se hacen análisis de descomposición de varianza e impulsos-respuesta.

La hipótesis de déficits gemelos consiste en señalar que los incrementos en el balance fiscal son equiparados por aumentos en la cuenta corriente, y en el caso de la cointegración existe una relación a largo plazo entre las variables. Sin embargo, la interdependencia puede ser en una o en ambas direcciones. En el caso en el cual la cuenta corriente determine el balance fiscal, se tiene causalidad reversa.

Las relaciones pueden estimarse en valores constantes o en su relación con el producto. Con base en el modelo teórico de la sección anterior, puede ser posible tanto una causalidad del balance fiscal a la cuenta corriente, como una causalidad reversa.

En el caso de la cointegración se requiere que las variables tengan una raíz unitaria para encontrar su relación a largo plazo, por lo cual generalmente se hace la estimación más a precios constantes que en términos de su relación con el producto.

En algunos casos se interrelacionan solamente las dos variables, mientras que en otros se evalúa su dependencia con otras, como el interés real, el producto y la tasa de cambio real. Al considerar sólo las dos variables la relación es directa, mientras que al considerar el interés real, producto y tasa de cambio, se atribuye una relación indirecta a través de las anteriores.

Por su parte, los déficits gemelos se consideran para un país o varios países, y para un periodo o varios periodos. En el caso de varios países se tiene la opción de realizar una relación de panel o país por país.

Los siguientes estudios corresponden a la evidencia de los déficits gemelos para Estados Unidos:

- Holmes (2010) encuentra cointegración entre el déficit fiscal y el déficit de cuenta corriente en 1960-2007, en tanto que Leachman & Francis (2002) subdividen el análisis en dos subperiodos en 1948-1992 y encuentran evidencia leve de la relación a largo plazo entre las dos variables.
 - Hatemi-J. & Shukur (2002) realizan pruebas de causalidad de Granger para 1975-1998 al dividir la muestra en dos subperiodos, en los cuales en uno el déficit fiscal causa el déficit de cuenta corriente y en otro el déficit de cuenta corriente causa el déficit fiscal.
 - Abell (1990) hace un análisis de vectores autorregresivos para 1979-1985 y entre las variables incluye, además de los déficits gemelos, el dinero, la tasa de interés, la tasa de cambio, el ingreso disponible y los precios. En la descomposición de varianza encuentra que el déficit fiscal explica el 25 % de la varianza de las tasas de interés. Lo anterior indica la causalidad del déficit fiscal sobre el déficit de la cuenta corriente a través de la tasa de interés y la tasa de cambio.
 - Dibooglu (1997) hace también un análisis de descomposición de varianza para 1960-1994 considerando otras variables, además de los déficits gemelos: gasto público, tasa de interés, tasa de cambio, productividad e ingreso nacional y foráneo. En los resultados, el déficit en cuenta corriente se relaciona con el déficit fiscal, la tasa de interés y los términos de intercambio.
 - Kim & Roubini (2008) utilizan modelos de vectores autorregresivos para 1973-2004 y encuentran que los déficits fiscales mejoran los déficits de cuenta corriente y deprecian el tipo de cambio a corto plazo. En éstos, el signo de la causalidad de los déficits gemelos es opuesta a la de los otros estudios.
- Para otros países se encuentran estudios como los siguientes:
- Islam (1998) evalúa la hipótesis de déficits gemelos para Brasil en 1973-1991 y encuentra una causalidad bidireccional entre el déficit fiscal y el déficit en cuenta corriente.
 - Sobrino (2013) analiza la hipótesis de déficits gemelos en Perú durante 1980-2012, y encuentra causalidad reversa entre la cuenta corriente y el balance fiscal en las pruebas de causalidad, descomposición de varianza e impulsos-respuesta.
 - Ramos & Rincón (2000) no encuentran cointegración en los déficits gemelos para Colombia en 1950-1998. Entonces, los autores hacen análisis de vectores autorregresivos para realizar pruebas de causalidad de Granger. En éstas encuentran una causalidad reversa.
 - Senadza & Aloryito (2016) consideran la relación entre el déficit de la cuenta corriente y el déficit fiscal para Ghana en 1980-2014 y mediante modelos de corrección de errores encuentran causalidad reversa. Los autores atribuyen el resultado a que Ghana es una economía abierta pequeña, en que los ingresos del comercio exterior mejoran no sólo la cuenta corriente, sino también el déficit fiscal.
 - Se tienen estudios de Mukhtar et al. (2007) para Pakistán en 1975 - 2005 y de Marinheiro (2008) para Egipto en 1974 - 2003. En el primero se encuentra una relación de cointegración y de causalidad bidireccional, mientras que en el segundo hay una relación de cointegración y de causalidad reversa.
 - Los países europeos se dividen entre los que han mantenido disciplina en sus déficits fiscal y de cuenta corriente, y en los cuales éstos se han mantenido altos, como en el caso de Grecia, en el que los déficits gemelos de la última década han llevado a una crisis de endeudamiento externo. Para Grecia han hecho estudios Panagiotis et al. (2009) del lapso 1960-2007 y Vamvoukas (1999) para 1948-1994. En ambos se aplican técnicas de cointegración para hallar causalidad sólo del déficit fiscal a la cuenta corriente a corto y largo plazo.
 - Kearney & Monadjemi (1990) realizan un análisis del periodo 1972-1987 para varios países desarrollados: Australia, Reino Unido, Canadá, Francia, Alemania, Irlanda, Italia y Estados Unidos. Con relaciones impulso-respuesta y descomposición de varianza encuentran una relación a corto plazo de los déficits gemelos que no necesariamente persiste en el tiempo. Según los autores, la política fiscal no es suficiente por sí sola para controlar el déficit en cuenta corriente.
 - Corsetti & Muller (2006) realizan un estudio para Estados Unidos, Reino Unido, Canadá y Australia, con impulsos-respuesta para 1980 - 2005. En los resultados en las economías más cerradas, como Estados Unidos y Australia, el déficit fiscal tiene baja incidencia en el déficit de cuenta corriente y la inversión se reduce, mientras que en Reino Unido

y Canadá, que son más abiertas, el efecto es mayor y la inversión responde menos. En la literatura, al relacionar los déficits se consideran otras variables, como el interés y la tasa de cambio; en este caso, se considera la inversión.

- Teniendo en cuenta cambios de régimen, Daly & Siddiki (2009) consideran si el déficit fiscal y la tasa de interés tienen una relación a largo plazo con la cuenta corriente en 23 países de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) para 1960 - 2000 (según la disponibilidad de cifras de los países). Esta relación a largo plazo se encuentra en 13 de 23 países, y la relación de cointegración es más frecuente cuando se consideran cambios de régimen.

Como se evidencia en la literatura, los resultados por países y periodos son variados. Cuando se toman muestras de varios países, es común que se presente causalidad en algunos. La hipótesis de los déficits gemelos y la causalidad reversa puede o no cumplirse para diferentes países y periodos.

En el caso del estudio para Colombia en el periodo 1950-1998 hecho por Ramos & Rincón (2000), se rechaza la cointegración entre los déficits y se señala causalidad reversa. En el estudio presentado por nosotros se considerarán los resultados para un periodo más reciente (1970-2016).

ANÁLISIS DE LAS INTERRELACIONES DE LOS DÉFICITS GEMELOS EN COLOMBIA

Hechos estilizados

En Colombia, durante 1970 - 2016, la proporción en el producto del superávit o déficit del Gobierno Nacional Central (GNC) y la cuenta corriente se correlacionaron en forma positiva (gráfico 4).

En el periodo 1970-1980 se obtuvo superávit del GNC en 1976-1978, mientras que los déficits no superaron el 2 % del producto con este valor en 1980. La tendencia del superávit o déficit del GNC fue similar a la obtenida en la cuenta corriente. El déficit de la cuenta corriente fue decreciendo hasta 1976, cuando fue superavitario, manteniéndose así hasta 1980. Lo anterior se explicó a partir de 1976 por el alza de los precios del café, principal producto de exportación en Colombia en este periodo.

El déficit del GNC subió significativamente en el lapso 1981-1985, así como también el déficit de la cuenta corriente, en medio de la crisis del endeudamiento con el sector externo de América Latina.

Durante 1986-1992 la economía tuvo una recuperación de los saldos significativamente negativos de la cuenta corriente, en tanto que los déficits del GNC se mantuvieron por debajo del 2 % del producto.

Desde 1991 tuvieron lugar la apertura económica y los hallazgos de petróleo, resultando entradas de capital que revaluaron el tipo de cambio. Durante 1993-1998 subieron los déficits de la cuenta corriente alrededor

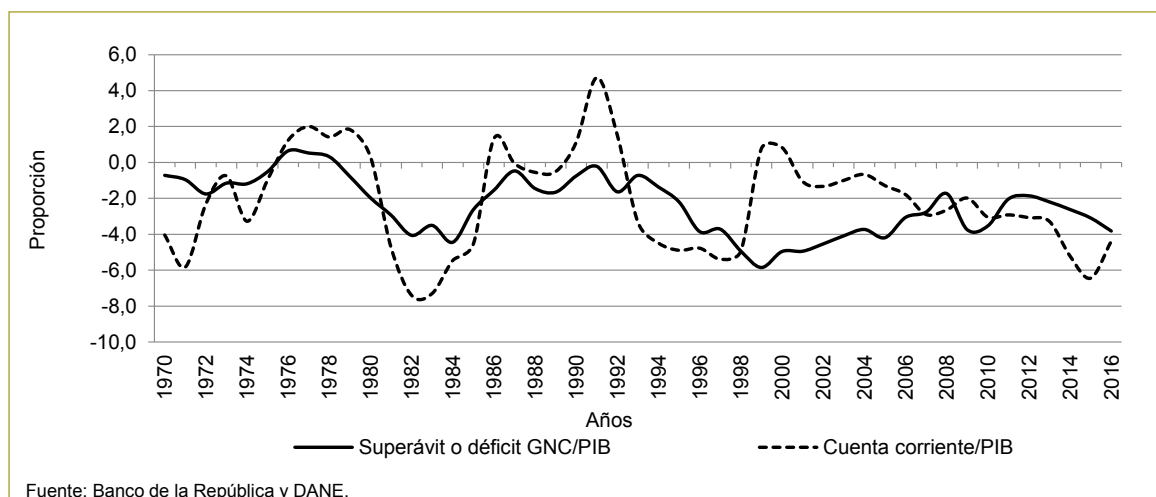


Gráfico 4. Colombia. Superávit o déficit GNC/PIB y cuenta corriente/PIB 1970-2016.

de 4 y 5 %. En un comienzo, los déficits del GNC no subieron, pero a partir de 1995 hasta 1998 superaron el 2 % y al final se acercaron al 5 %.

Durante 1999-2006 se controlaron los déficits de la cuenta corriente, mientras que los déficits del GNC fueron altos, disminuyéndose la correlación positiva entre las variables. Este periodo corresponde a los años de recesión económica en Colombia, agudizada con la reducción de la actividad económica de los países emergentes con la crisis de los países del Sureste Asiático.

Del 2004 al 2014 subieron los precios internacionales del petróleo, revaluando el tipo de cambio y con entradas masivas de capitales. Para 2015-2016, cuando se revierten los precios del petróleo, a pesar de la devaluación del tipo de cambio, los déficits gemelos son considerables por la reducción de los ingresos fiscales del petróleo y la falta de la reacción de las exportaciones a los términos de intercambio.

Del mismo modo, las dos series a precios constantes presentan una fuerte correlación positiva en el lapso 1970-2016, con excepción de 1999-2006.

La igualdad macroeconómica y los déficits gemelos se explican en los libros de texto dentro del marco de tasas de interés flexibles y alta elasticidad de respuesta al tipo de cambio. La tasa de interés garantiza el balance interno y el tipo de cambio avala el balance externo, y los dos déficits se mueven en la misma dirección. El comportamiento es muy distinto con tasas de interés cero y baja respuesta de la balanza de pagos al tipo de cambio. En tales condiciones, los balances dejan de cumplirse y el vínculo entre los déficits gemelos se debilita.

Los déficits gemelos están relacionados por la igualdad macroeconómica, en la cual se establece que el déficit fiscal más el déficit privado son iguales al déficit en cuenta corriente. Cuando el déficit fiscal es exógeno, su ampliación ocasiona la reducción del déficit privado y un aumento menos que proporcional del déficit en cuenta corriente. Los dos déficits están relacionados en la misma dirección.

La otra posibilidad es que el déficit en cuenta corriente sea determinado en el exterior y resulte diferente de las metas deseables y de las posibilidades de financiación. El Gobierno no tiene más alternativa que ajustar el déficit fiscal para mantener las cuentas externas dentro de las posibilidades reales, pero carece del control para hacerlo efectivo. Los dos déficits quedan a la deriva y la igualdad macroeconómica deja de cumplirse. En consecuencia, la economía entra en un estado de

estancamiento que reduce el déficit en cuenta corriente y aumenta el déficit fiscal, y no se sabe cómo termina.

La primera hipótesis se validó en Colombia durante la mayor parte del periodo comprendido entre 1970 y 2016, y la segunda se observó entre 1999 y 2006.

El hallazgo descrito constituye una clara evidencia de que la igualdad macroeconómica no es una identidad, como aparece en textos connotados de macroeconomía. Como lo dice su nombre, se trata de una igualdad que se presenta en condiciones regulares, pero que puede no cumplirse. Así mismo, se confirma que los déficits en cuenta corriente son recesivos y no se pueden compensar con las políticas fiscales y monetarias convencionales.

Evaluación econométrica de la relación de los déficits gemelos en Colombia

En primera instancia, se tienen en cuenta el nivel de integración de las variables de la cuenta corriente (CORR) y el balance fiscal del GNC (FISC), considerándolas en precios constantes para el periodo 1970-2016. Estas variables serán las utilizadas para realizar el análisis de déficits gemelos de cointegración. Aplicando la prueba de raíz unitaria de Phillips-Perron, se obtiene que ambas variables están integradas de orden 1 (tabla 1).

Tabla 1
Colombia. Raíz unitaria

Método	Phillips-Perron
Variable	p-valor
CORR	0,6503
D.CORR	0,0003
FISC	0,9451
D.FISC	0,0000

Fuente: Cálculos de los autores.

Para Colombia se evalúan las hipótesis de déficits gemelos y causalidad reversa, aplicando pruebas de cointegración y el modelo de corrección de errores (MCE) de Johansen (1988, 1990). Primero se coloca la cuenta corriente como dependiente y el balance fiscal del GNC como independiente, y luego el balance fiscal como dependiente y la cuenta corriente como independiente (tabla 2).

Para la evaluación de la cointegración se utilizó la prueba de rango de cointegración no restringida de Johansen (traza), en la cual al 5 % de significancia se

Tabla 2
Colombia. Modelo de corrección de errores y prueba de cointegración

Método	MCE	MCE
Variable dependiente	D.CORR	D.FISC
Equacoint	-0,30 (-2,71)	-0,13 (-3,23)
Constante	-43,59 (-0,04)	-931,94 (-1,82)
D.CORR(-1)	0,43 (2,38)	-0,17 (-1,83)
D.FISC(-1)	0,31 (1,11)	-0,06 (-0,39)
R2	0,19	0,20
Variable dependiente	CORR	FISC
Constante	-1568,97	2158,85
CORR		1,38 (5,42)
FISC	0,73 (3,12)	
Prueba de rango de cointegración no restringida de Johansen (traza) (p-valor)		
Ninguno	0,0176	0,0176
Máximo 1	0,7520	0,7520
Causalidad	Bidireccional	Bidireccional
LM autocorrelación 1 rezago (p-valor)	0,4008	0,4008
LM autocorrelación 2 rezagos (p-valor)	0,4864	0,4864
Heteroscedasticidad de White (p-valor)	0,5909	0,5909
Normalidad Jarque-Bera (p-valor)	0,0001	0,0001

Los estadísticos-t son reportados en paréntesis.

Fuente: Cálculos de los autores.

encuentra un vector de cointegración. Para establecer los rezagos del vector de corrección de errores se usó el criterio de Akaike.

En la ecuación de cointegración de ambas regresiones el efecto de la variable independiente sobre la dependiente es positivo y significativo, con un coeficiente de 0,73 del balance fiscal a la cuenta corriente y de 1,38 de la cuenta corriente al balance fiscal.

En ambas regresiones la velocidad de ajuste tiene el signo negativo esperado y significativo. La velocidad de ajuste resultó en la cuenta corriente 30 % y en el balance fiscal 13 %. En los resultados se obtiene causalidad bidireccional a largo plazo.

Con respecto a las relaciones a corto plazo, éstas resultan no significativas tanto de la balanza fiscal a la cuenta corriente, como de la cuenta corriente al balance fiscal. En cambio, resulta significativo y positivo el efecto de la diferencia de la cuenta corriente rezagada a la diferencia de la cuenta corriente actual.

También se realizan pruebas de autocorrelación, heteroscedasticidad y normalidad. Al 5 % no se rechaza

la hipótesis nula de no autocorrelación con uno y dos rezagos, y de no heteroscedasticidad. Sin embargo, la regresión presenta deficiencias en la normalidad de los errores, ya que al 5 % se rechaza la hipótesis nula de normalidad de los errores.

Enseguida se presenta otra metodología para evaluar la cointegración correspondiente a mínimos cuadrados ordinarios totalmente modificados (FMOLS, por su sigla en inglés). Ésta tiene la ventaja de su flexibilidad para incorporar variables *dummy*, lo cual se aplica para el periodo 1999-2006, ya que en éste, como se presentó en el análisis de las cifras, se obtuvo una pérdida de la relación de cointegración con respecto al resto de los periodos de 1970 - 2016 (tabla 3).

En la regresión de FMOLS, el efecto del balance fiscal sobre la cuenta corriente fue positivo y significativo, como también el de la *dummy*. Esta última se espera positiva, ya que en el lapso 1999-2006 los déficits del balance fiscal fueron altos, mientras la cuenta corriente se mantuvo relativamente balanceada. El R² de la regresión fue 0,71.

En las pruebas de cointegración, la hipótesis nula es cointegración en las de Hansen y variables adicionales de Park, mientras que en las de Engle-Granger y Phillips-Ouliaris la hipótesis nula es no cointegración. En todos los casos se encuentra cointegración entre las variables al 5 % de significancia.

Tabla 3
Colombia. Mínimos cuadrados ordinarios totalmente modificados

Método Variable dependiente	FMOLS CORR
Constante	2238,90 (1,17)
FISC	1,42 (9,11)
Dummy (1999-2006)	22.204,04 (5,84)
R2	0,71
Prueba de Hansen (p-valor)	0,0918
Prueba de variables adicionales de Park (p-valor)	0,2063
Prueba de Engle-Granger tau (p-valor)	0,0037
Prueba de Engle-Granger z (p-valor)	0,0021
Prueba de Phillips-Ouliaris tau (p-valor)	0,0037
Prueba de Phillips-Ouliaris z (p-valor)	0,0029
Normalidad Jarque-Bera (p-valor)	0,3861

Los estadísticos-t son reportados en paréntesis.

Fuente: Cálculos de los autores.

A diferencia de las ecuaciones del modelo de corrección de errores, en ésta se logra un mejor resultado en cuanto a la obtención de normalidad de los errores, al no rechazar la hipótesis nula de normalidad al 5 % de significancia.

EVALUACIÓN DE LA RELACIÓN DE LOS DÉFICITS GEMELOS EN EL ÁMBITO INTERNACIONAL

Balance fiscal y cuenta corriente

A escala internacional, la proporción en el producto del gasto del Gobierno general (incluyendo las territoriales) oscila según los países entre 20 y 60 %, pero tiende a ser mayor en los países desarrollados. Algunos indicadores para 2015, de acuerdo con cifras del Fondo Monetario Internacional (FMI), fueron Francia (57,0 %), Finlandia (56,5 %), España (43,3 %), Turquía (38,9 %), Estados Unidos (36,0 %), Colombia (33,8 %) y Chile (25,0 %).

En la tabla siguiente se presenta el promedio durante 1979-2015 del balance fiscal del Gobierno general y de

la cuenta corriente, como proporción del producto, para 28 países (tabla 4).

Durante 1979 - 2015 el promedio del balance fiscal fue positivo en Noruega (7,4 %), Corea del Sur (1,6 %), Chile (1,2 %) y Finlandia (1,1 %), en los cuales la cuenta corriente también fue positiva, con excepción de Chile.

Tabla 4
Indicadores internacionales. Balance fiscal y cuenta corriente 1979 - 2015 (promedio)

Países	Balance fiscal/PIB	Cuenta corriente/PIB
Estados Unidos	-4,1	-2,5
Reino Unido	-4,0	-2,0
Francia	-3,3	0,1
Finlandia	1,1	1,0
Alemania	-2,3	2,3
Italia	-6,5	-0,4
Holanda	-3,0	4,5
Portugal	-5,8	-4,8
España	-4,1	-2,5
Canadá	-3,2	-1,4
Israel	-7,5	-0,7
Corea del Sur	1,6	0,6
Noruega	7,4	6,7
Suecia	-3,2	2,4
India	-8,1	-1,4
Indonesia	-0,8	-0,7
Filipinas	-0,9	-1,1
Tailandia	-1,2	-0,7
Turquía	-4,9	-2,5
Ghana	-6,0	-5,6
Sudáfrica	-3,8	-1,0
Argentina	-1,2	-1,1
Chile	1,2	-2,8
Colombia	-1,8	-2,3
Perú	-1,7	-3,7
México	-4,1	-1,9
Venezuela	-3,0	4,1
Uruguay	-2,1	-1,7

Fuente: FMI, Banco Mundial y Mauro et al. (2013).

Los países con mayores déficits en el balance fiscal fueron India (-8,1 %), Israel (-7,5 %), Italia (-6,5 %), Ghana (-6,0 %), Portugal (-5,8 %) y Turquía (-4,9 %), mientras que los mayores déficits en la cuenta corriente resultaron en Ghana (-5,6 %), Portugal (-4,8 %) y Turquía (-2,5 %).

En Estados Unidos el balance fiscal fue -4,1% y la cuenta corriente -2,5 %. En Colombia ambos fueron moderados, con -1,8 % el fiscal y -2,3 % la cuenta corriente.

En otros países de Latinoamérica se obtuvo el menor balance fiscal en México (-4,1 %) y Venezuela (-3,0 %),

con sus resultados de cuenta corriente de -1,9 % y 4,1 %, respectivamente. A su vez, la cuenta corriente más negativa fue la de Perú (-3,7 %), con balance fiscal de -1,7 %.

En los países europeos, aparte de Finlandia, Noruega, Portugal e Italia, que se describieron anteriormente, no se obtiene una correspondencia entre los dos déficits; por ejemplo, en Francia y Alemania se obtuvo superávit de cuenta corriente 0,1 % y 2,3 %, respectivamente, y déficit fiscal de -3,3 % y -2,3 %, en ese orden.

Análisis para algunos países de Latinoamérica y para Estados Unidos

Para evaluar la cointegración a escala internacional se consideraron Estados Unidos y los países de Latinoamérica: Chile, México, Uruguay, Perú y Argentina. Sin embargo, al tomar los valores del balance fiscal y la cuenta corriente en precios constantes para el periodo 1979-2015 no fue posible hacer el análisis de cointegración para todos los países, ya que el requerimiento de obtener raíz unitaria no se cumplía para algunos. Este tipo de análisis solamente se realizó para Estados Unidos y México, en los cuales se encontró raíz unitaria en las series con un nivel de significancia de 5 % (tabla 5).

Tabla 5
Estados Unidos y México. Raíz unitaria

Países	Estados Unidos	México
Método	Phillips-Perron (p-valor)	
Variable		
CORR	0,4934	0,0501
D.CORR	0,0009	0,0000
FISC	0,2762	0,1012
D.FISC	0,0119	0,0001

Fuente: Cálculos de los autores.

En Estados Unidos y México se encontró evidencia de cointegración. En ambos, el coeficiente de la velocidad de ajuste es del signo esperado y significativo. Sin embargo, en la relación a largo plazo sólo se verificó la hipótesis de los déficits gemelos en México (balance fiscal a cuenta corriente), mientras resultó causalidad reversa en Estados Unidos (tabla 6).

Con respecto a las relaciones a corto plazo resulta significativo y positivo el efecto de la diferencia del balance fiscal rezagado a la diferencia del balance fiscal

actual en Estados Unidos. Por otro lado, la incidencia a corto plazo en México resulta significativa, pero del signo opuesto, en la cuenta corriente al balance fiscal.

En los demás países, Chile, Argentina, Uruguay y Perú se procedió a realizar un análisis de causalidad de Granger e impulsos-respuesta, utilizando las cifras de 1979-2015 de la relación de la cuenta corriente en el producto CORRPIB y la relación del balance fiscal en el producto FISCPIB.

Tabla 6
Estados Unidos y México: modelo de corrección de errores

Países	Estados Unidos	México
Método	MCE	MCE
Variable dependiente	D.FISC	D.CORR
Equicoeficiente	-0,32 (-3,58)	-0,26 (-2,75)
Constante	-0,06 (-0,29)	-0,06 (-0,33)
D.FISC(-1)	0,42 (2,65)	-0,49 (-3,29)
D.FISC(-2)		-0,26 (-1,56)
D.CORR(-1)	-0,54 (-1,03)	-0,13 (-0,77)
D.CORR(-2)		0,03 (0,22)
R ²	0,40	0,37
Variable dependiente	FISC	CORR
Constante	-1,45	1,21
FISC		0,93 (2,16)
CORR	0,80 (2,16)	
Prueba de rango de cointegración no restringida de Johansen (traza) (p-valor)		
Ninguno	0,0100	0,0094
Máximo 1	0,0830	0,0049
Causalidad	Reversa	Hipótesis déficits gemelos

Los estadísticos-t son reportados en paréntesis.

Fuente: Cálculos de los autores.

En la página siguiente se muestra que se obtuvo causalidad reversa para Chile, Argentina y Uruguay, mientras que no se obtuvo relación en Perú (tabla 7).

Los correspondientes impulsos-respuesta se presentan en el gráfico siguiente (gráfico 5), en el que se

Tabla 7
Chile, Argentina, Uruguay y Perú. Pruebas de causalidad

Causalidad	FISCPiB a CORRPIB (p-valor)	CORRPIB a FISCPiB (p-valor)	Tipo de causalidad
Método	Granger-Wald		
Países			
Chile	0,8840	0,0006	Reversa
Argentina	0,7419	0,0092	Reversa
Uruguay	0,0904	0,0290	Reversa
Perú	0,7177	0,3920	Ninguna

Fuente: Cálculos de los autores.

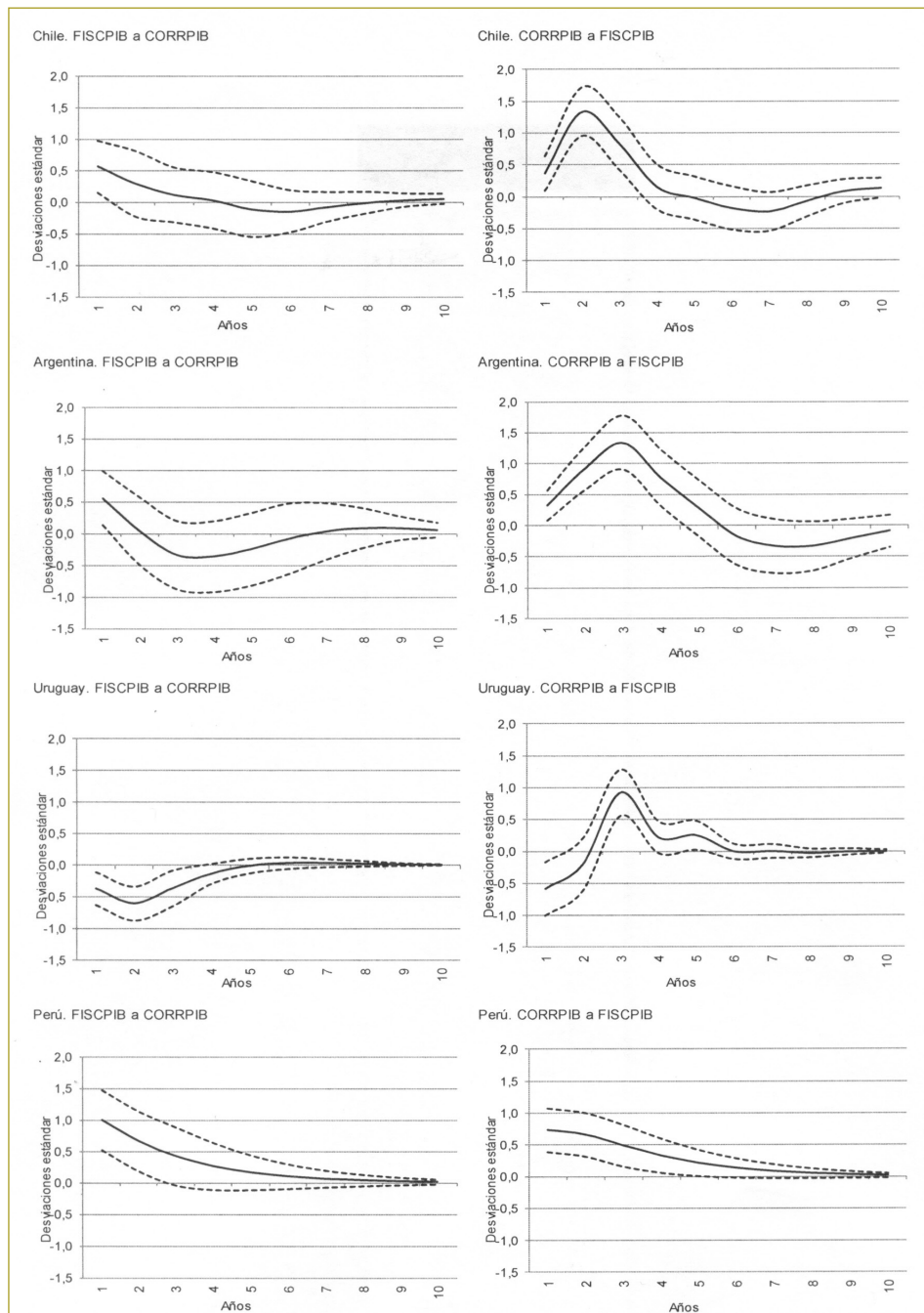


Gráfico 5. Chile, Argentina, Uruguay y Perú. Impulsos-respuesta.

puede observar la relación positiva de CORRPIB a FISCPIB en Chile, Argentina y Uruguay, verificándose la causalidad reversa. Por otro lado, en Perú no se encontró causalidad, con impulsos-respuesta positivos de CORRPIB a FISCPIB, aunque no muy significativos.

CONCLUSIONES

En este documento se prueba la hipótesis de déficits gemelos, causalidad reversa y bidireccional, según el caso, para Colombia y otros países de Latinoamérica. Adicionalmente, a manera de comparación se considera Estados Unidos, ya que como es el país con más estudios al respecto, lo podemos tomar como término de referencia.

De acuerdo con el marco teórico presentado en el documento, es posible encontrar causalidad del déficit fiscal al de la cuenta corriente o viceversa.

Aplicamos pruebas de cointegración de Johansen entre el déficit fiscal y la cuenta corriente, tanto para el caso específico de Colombia como para el caso de México y Estados Unidos, ya que las series tienen raíz unitaria.

En el caso de Colombia, encontramos que las variables están cointegradas y que existe una causalidad bidireccional entre éstas en las regresiones del modelo de corrección de errores. Por otro lado, para 1999 - 2006 se introdujo una *dummy* en la regresión de mínimos cuadrados ordinarios totalmente modificados para evaluar la relación de cointegración para el periodo 1970-2016, con la cuenta corriente como dependiente y el balance fiscal como independiente.

La información colombiana de los últimos 45 años contribuye a despejar el enigma de la igualdad macroeconómica. La relación se cumple como igualdad cuando el déficit fiscal es exógeno. Si el déficit en cuenta corriente es determinado en el exterior, la expresión deja de cumplirse como igualdad. La consistencia macroeconómica no puede lograrse con las políticas convencionales. Se requiere una amplia coordinación monetaria, fiscal y comercial para mantener y conciliar el balance interno y el externo.

En el caso de Estados Unidos encontramos evidencia de cointegración, en consonancia con los estudios más recientes para este país, y la causalidad encontrada fue reversa. En México también se encontró cointegración, además de que la hipótesis de déficit gemelos se cumple.

En los casos de Chile, Uruguay, Argentina y Perú se realizó un análisis de vectores autorregresivos y pruebas de causalidad de Granger, mediante el cual se encontró que para la mayoría de los casos existe una causalidad reversa.

Cuando se cumple la hipótesis de los déficits gemelos, implica que el déficit fiscal incide en el déficit de cuenta corriente. En el caso de tipo de cambio flexible de Mundell-Fleming el mayor gasto público revalúa el tipo de cambio, la política es inefectiva sobre el producto y el déficit en la cuenta corriente aumenta. En tal caso, el déficit fiscal inefectivo sólo se puede contrarrestar con el control del tipo de cambio. En el caso de Mundell-Fleming de tipo de cambio fijo la política fiscal deficitaria resulta efectiva. La relación de los déficits en Mundell-Fleming es indirecta a través del producto, el interés y el tipo de cambio.

La hipótesis de déficits gemelos también resulta en forma directa cuando el ahorro del sector privado no compensa al sector público deficitario. Por lo anterior, una forma de balancear ambos déficits de la economía es controlando el déficit fiscal. Entre los efectos del déficit fiscal se encuentran la revaluación del tipo de cambio como en el modelo de transables y no transables del marco teórico.

En el caso de la causalidad reversa, la relación de los déficits gemelos se obtiene a través de los ingresos fiscales de una economía pequeña, en la cual cierto bien primario tiene un impacto fiscal. Adicionalmente, como también puede ser el caso de Estados Unidos, es posible que se produzca la causalidad reversa cuando se utiliza la política fiscal para contrarrestar la reducción del producto ocasionada por el déficit en cuenta corriente.

En este documento se puede apreciar amplia evidencia de la presencia de relación entre los déficits; sin embargo, en algunas economías ésta no se presenta, caso en el cual resulta inefectivo controlar ambos déficits utilizando como instrumento uno de éstos.

En el ámbito global, los déficits gemelos pueden causar inestabilidad; sin embargo, la disciplina excesiva reduce la capacidad de las economías de aprovechar la oportunidad de lograr mayor crecimiento del producto, flexibilizando los controles con déficits moderados. Entre los desequilibrios principales y más conocidos de los déficits se encuentran las crisis de endeudamiento tanto externo como del Gobierno.

REFERENCIAS

- Abell, J. (1990). Twin deficits during the 1980's: an empirical investigation. *Journal of Macroeconomics*, 12 (1).
- Corsetti, G. & Muller, G. (2006). Budget deficits and current accounts: openness and fiscal persistence. *Economic Policy*, 21 (48).
- Daly, V. & Siddiki, J. U. (2009). The twin deficits in OECD countries: cointegration analysis with regime shifts. *Applied Economics Letters*, 16.
- Dibooglu, S. (1997). Accounting for US current account deficits: an empirical investigation. *Applied Economics*, 29.
- Frenkel, J. & Razin, A. (1992). *Fiscal policies and the world economy*. Segunda edición. MIT Press.
- Hatemi-J, A. & Shukur, G. (2002). Multivariate-based causality tests of twin deficits in the US. *Journal of Applied Statistics*, 29 (6).
- Holmes, M. (2010). A reassessment of the twin deficit relationship. *Applied Economics Letters*, 17.
- Islam, F. (1998). Brazil's twin deficits: an empirical examination. *Atlantic Economic Journal*, 26 (2).
- Johansen, S. (1988). Statistical analysis of cointegration vectors. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 12.
- Johansen, S. & Juselius, C. (1990). Maximum likelihood estimation and inference on cointegration with applications to the demand for money. *Oxford Bulletin of Economics and Statistics*, 52.
- Kearney, C. & Monadjemi, M. (1990). Fiscal policy and current account performance: international evidence on the twin deficits. *Journal of Macroeconomics*, 12 (2).
- Kim, S. & Roubini, N. (2008). Twin deficit divergence? Fiscal policy, current account, and exchange rate in the US. *Journal of International Economics*, 74.
- Leachman, L. & Francis, B. (2002). Twin deficits: apparition or reality? *Applied Economics*, 34.
- Marinheiro, C. F. (2008). Ricardian equivalence, twin deficits, and the Feldstein - Horioka puzzle in Egypt. *Journal of Policy Modeling*, 30.
- Mauro, P., Romeu, R., Binder, A. & Zaman, A. (2013). A modern history of fiscal prudence and profligacy. *IMF Working Paper*, 13/5.
- Mukhtar, T., Zakaria, M. & Ahmed, M. (2007). An empirical investigation for the twin deficits hypothesis in Pakistan. *Journal of Economic Cooperation*, 28 (4).
- Panagiotis, P., Emmanouil, T., Athanasios, A. & Constantinos, K. (2009). On the dynamics of the Greek twin deficits: empirical evidence over the period 1960 - 2007. *International Journal of Economic Sciences and Applied Research*, 2 (2).
- Ramos, J. & Rincón, H. (2000). El balance fiscal y el balance de la cuenta corriente en Colombia: canales de transmisión y causalidad. *Borradores de Economía*, N.º 166. Banco de la República.
- Senadza, B. & Aloryito, G. K. (2016). The twin deficit hypothesis: evidence from Ghana. *International Journal of Business and Economic Sciences Applied Research*, 9 (3).
- Sobrino, C. (2013). The twin deficits hypothesis and reverse causality: a short-run analysis of Peru. *Journal of Economics, Finance and Administrative Science*, 9 (15).
- Vamvoukas, G. (1999). The twin deficits phenomenon: evidence from Greece. *Applied Economics*, 31.

Inventario de fuentes de abastecimiento de los sistemas de acueducto de las cabeceras municipales de Colombia

Inventory of supply sources of aqueduct systems of municipal heads of Colombia

NATALIA BERNATE SUÁREZ¹ - JAIRO ALBERTO ROMERO ROJAS²

1. Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Recursos Hidráulicos y Medioambiente, de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

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

natalia.bernatemail.escuelaing.edu.co – jairo.romero@escuelaing.edu.co

Recibido: 30/06/2018 Aceptado: 15/08/2018

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

Resumen

En este artículo se presenta un inventario de las fuentes de abastecimiento, tanto superficiales como subterráneas, de los sistemas de acueducto de las cabeceras municipales de Colombia, a partir de la información reportada por los prestadores del servicio de acueducto en el Sistema Único de Información (SUI), administrado por la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (Superservicios) [1]. Se contó con información de 591 empresas presentes en 542 municipios, que registraron 1000 fuentes en el SUI [2], de las cuales 824 corresponden a fuentes hídricas superficiales y 176 a pozos.

Se encontró que en 101 fuentes hídricas superficiales se capta un caudal superior al caudal medio; que el caudal captado de los pozos es inferior, en todos los casos, al caudal de diseño, y que en 241 fuentes hídricas superficiales y en 8 pozos el caudal captado superó al caudal concesionado por la autoridad ambiental.

Palabras claves: abastecimiento municipal, inventario, fuentes hídricas, fuentes superficiales y fuentes subterráneas.

Abstract

The results of this study provide an inventory of both surface and underground supply sources from the aqueduct systems in municipal headwaters of Colombia, based on the information reported by aqueduct service providers in the Unified Information System-SUI (acronym in Spanish), supervised by the Superintendency of Public Utilities-Superservicios [1].

For this purpose, 491 companies were present in 542 municipalities, which registered 1000 sources in the SUI; 824 correspond to surface water sources and 176 to wells.

It was found that in 101 surface water sources a higher flow is obtained than the average flow and that the flow of the wells in all the cases was lower than the design flow rate.

At the same time, it was determined that in 241 surface water sources and in 8 wells, the volume collected exceeded the volume allowed by the environmental authority

Keywords: municipal water supply, inventory, water sources, surface water sources, groundwater supply.

INTRODUCCIÓN

El inventario de fuentes hídricas superficiales y subterráneas es una herramienta que permite planificar el uso y la adecuada descripción del funcionamiento hidrológico de las fuentes hídricas, por medio del conocimiento de sus características físicas, su distribución espacial y su utilización actual.

Aunque en Colombia se dispone de registros de las fuentes hídricas, captadas por el Sistema Único de Información (SUI) y por el Sistema de Información del Recurso Hídrico (SIRH)[3], este último administrado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam), en la actualidad no se ha hecho un análisis de la información que en ellos reposa, de tal manera que se permita identificar los usos, tipos de fuentes utilizadas, y los caudales medios, concesionados y captados para el abastecimiento de agua potable.

METODOLOGÍA

Fuentes de información

Corresponde a los registros reportados por los prestadores en el SUI, entre los años 2009 y el primer semestre de 2016, según lo solicitado en la Resolución SSPD 20101300048765 del 14 de diciembre de 2010 [4], para fuentes superficiales y subterráneas o pozos.

Análisis de la información

La información disponible se utilizó para lo siguiente:

- Determinar periodos de ocurrencia de los caudales mínimo y máximo de la fuente.
- Establecer la excedencia en los caudales captados en relación con el caudal medio de la fuente.
- Identificar las fuentes con caudal captado superior al caudal medio de la fuente.
- Identificar las fuentes con caudal captado superior al caudal autorizado en la concesión de aguas.
- Determinar el número de fuentes sujetas a monitoreo de calidad del agua y control de crecientes.
- Establecer los caudales de las fuentes subterráneas o pozos.
- Identificar los pozos donde el caudal captado fue superior al caudal de diseño de la fuente.
- Identificar los pozos con el caudal captado superior al caudal autorizado en la concesión de aguas.

RESULTADOS

De las 1000 fuentes reportadas por los prestadores en el SUI, 824 corresponden a fuentes hídricas superficiales y 176 a pozos, ubicados en 542 municipios de Colombia. A continuación se relaciona el número de fuentes de abastecimiento por departamento, y se observa que 503 municipios son abastecidos por fuentes superficiales y 39 por pozos (tabla 1).

Tabla 1
Fuentes de abastecimiento por departamento y tipo

Departamento	Total MPIOs	Municipios con información	
		Fuentes superficiales	Pozos
Amazonas	2	0	0
Antioquia	125	74	6
Arauca	7	5	0
San Andrés	2	0	1
Atlántico	23	4	0
Bogotá, D.C.	1	1	0
Bolívar	46	8	1
Boyacá	123	62	4
Caldas	27	22	0
Caquetá	16	10	0
Casanare	19	14	1
Cauca	42	19	0
Cesar	25	15	0
Chocó	30	6	0
Córdoba	30	8	1
Cundinamarca	116	60	7
Guainía	1	0	0
Guaviare	4	3	0
Huila	37	23	1
La Guajira	15	7	2
Magdalena	30	7	2
Meta	29	5	1
Nariño	64	23	0
Norte de Santander	40	21	1
Putumayo	13	5	0
Quindío	12	12	1
Risaralda	14	8	1
Santander	87	42	0
Sucre	26	2	5
Tolima	47	26	1
Valle del Cauca	42	9	3
Vaupés	3	1	0
Vichada	4	1	0
Total	1102	503	39

Se aprecia que los departamentos de Antioquia (74), Boyacá (62), Cundinamarca (60), Santander (42) y Tolima (26) disponen de un mayor número de municipios abastecidos por fuentes superficiales.

A su vez, los departamentos de Cundinamarca (7), Antioquia (6), Sucre (5) y Boyacá (4) son los que concentran un mayor número de municipios abastecidos por pozos.

Los municipios abastecidos con aguas provenientes tanto de fuentes hídricas superficiales como subterráneas son Cauca, Chigorodó y Turbo, en Antioquia; Duitama, Tunja y Puerto Boyacá, en Boyacá; Facatativá, Tocancipá y Tabio, en Cundinamarca; Maicao, en La Guajira; Santa Marta, en Magdalena; Villavicencio, en Meta; La Tebaida, en Quindío; Pereira, en Risaralda, y Candelaria y Tuluá, en el Valle del Cauca.

Tipo de fuentes

En el gráfico siguiente se clasifican las fuentes según su tipo; allí se puede observar que las quebradas y ríos son las principales fuentes hídricas utilizadas para el suministro de agua para consumo humano (gráfico 1).

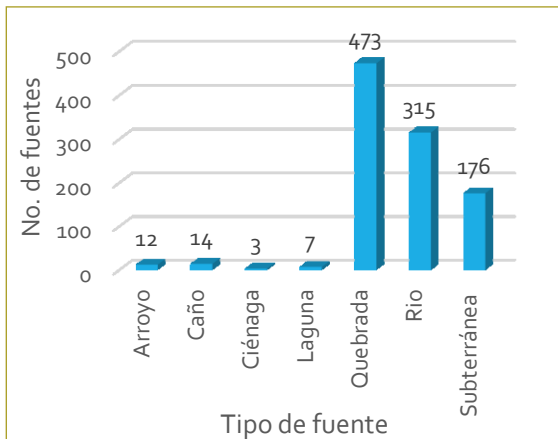


Gráfico 1. Número de fuentes por tipo.

Uso de las fuentes

Los principales usos de las fuentes superficiales son abastecimiento (76 %) y vertimiento (16 %) (gráfico 2).

Así mismo, se utilizan 206 fuentes de abastecimiento para la descarga de vertimientos. Esta condición se presenta en 183 municipios, localizados principalmente en los departamentos de Antioquia, Cundinamarca y Boyacá.

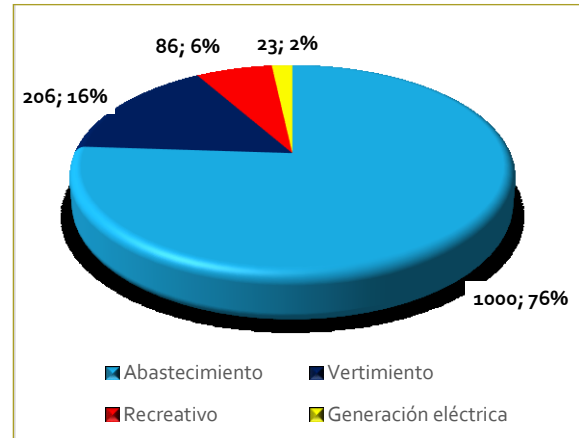


Gráfico 2. Número de fuentes según el uso.

Caudales mínimo y máximo en las fuentes superficiales

Durante los años 2012 y 2009 se presentó un mayor número de fuentes con caudales mínimos y máximos; para el primer caso se encontraron 224 y 213, en ese orden, mientras que para el segundo se hallaron 176 y 161, respectivamente (gráfico 3).

Este comportamiento es atípico, puesto que el año 2009 fue impactado por el fenómeno del Niño, en tanto que el año 2012 fue afectado por el fenómeno de la Niña.

Fuentes superficiales

Los resultados registrados muestran que en 471 fuentes superficiales, que equivalen al 82 %, se capta un caudal inferior al caudal medio de la fuente, mientras que en el 18 % de las fuentes se utiliza un caudal superior a su caudal medio.

Igualmente, se observa que los departamentos que concentran un mayor número de municipios con uso superior al caudal medio de la fuente son Cundinamarca (19), Boyacá (15) y Caldas (9) (gráfico 3).

Por su parte, los municipios señalados en la tabla siguiente requieren el uso de fuentes alternas de abastecimiento, teniendo en cuenta que en condiciones normales el caudal disponible según la norma no es suficiente para garantizar la demanda de agua (tabla 2).

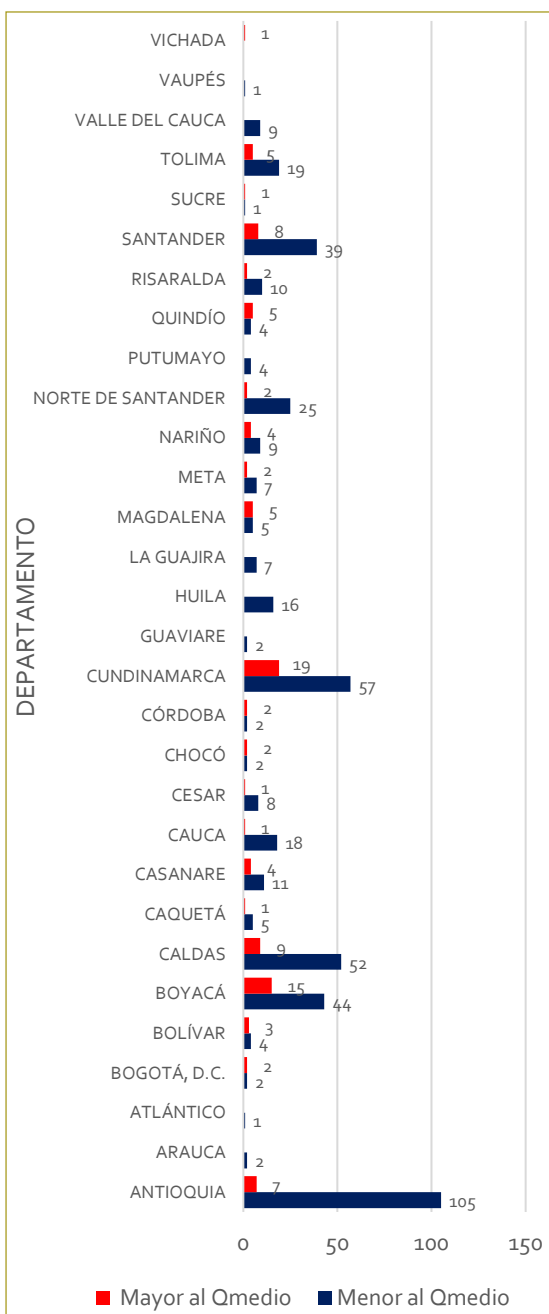


Gráfico 3. Municipios por departamento según el uso del caudal captado frente al caudal medio de la fuente.

En 241 fuentes superficiales, el caudal captado es superior al caudal concesionado; Cundinamarca (46), Antioquia (39), Boyacá (26) y Santander (15) son los departamentos que registran un mayor número de fuentes con esta característica (tabla 3). Los municipios por departamento donde se presentó esta condición se relacionan posteriormente (tabla 4).

Tabla 2

Municipios donde el caudal captado es superior al caudal medio de la fuente

Departamento	Municipio
Antioquia	La Ceja, Titiribí y Urrao
Bogotá, D.C.	Bogotá, D.C.
Bolívar	Córdoba
Boyacá	Páez, Soatá, Sora y Tuta
Caldas	Manizales y Villamaría
Caquetá	Valparaíso
Cundinamarca	Bituima, Chocontá, Fosca, Quipile, Susa y Villagómez
Meta	Villavicencio
Nariño	Pasto y San Pablo
Norte de Santander	Cácota, Herrán y Pamplona
Santander	Concepción, Guapotá, Lebrija, Málaga, San Gil y Socorro
Tolima	Cajamarca e Ibagué
Casanare	Aguazul, Paz de Ariporo y Villanueva
Vichada	Puerto Carreño

Tabla 3

Número de fuentes por departamento según el uso del caudal captado frente al caudal concesionado para fuentes superficiales

Departamento	Número de fuentes		Sin información	Total
	Menor que el $Q_{concesión}$	Mayor que el $Q_{concesión}$		
Antioquia	84	39	34	157
Arauca	2	2	1	5
Atlántico	5		1	6
Bogotá, D.C.	2	2	1	5
Bolívar	3	4	2	9
Boyacá	39	26	22	87
Caldas	50	15	15	80
Caquetá	9	1	6	16
Casanare	13	4	3	20
Cauca	7	14	2	23
Cesar	6	3	6	15
Chocó	3	2	2	7
Córdoba	5	2	1	8
Cundinamarca	35	46	17	98
Guaviare	2		1	3
Huila	11	8	9	28

La Guajira		7		7
Magdalena	4	5	2	11
Meta	8	3	1	12
Nariño	11	5	17	33
Norte de Santander	20	11	3	34
Putumayo	2	2	4	8
Quindío	8	2	11	21
Risaralda	9	1	2	12
Santander	25	25	16	66
Sucre	1	1		2
Tolima	15	8	13	36
Valle del Cauca	8	3	2	13
Vaupés	1			1
Vichada	1			1
Total	389	241	194	824

Tabla 4

Municipios donde el caudal captado es superior al caudal concesionado

Departamento	Municipio
Antioquia	Medellín, El Carmen de Viboral, Entreríos, La Unión, Olaya, Retiro, San Jerónimo, San Luis, Santa Bárbara, Segovia, Sopetrán y Tarazá
Arauca	Fortul y Tame
Bolívar	Córdoba
Boyacá	Ciénega, Cúitva, Duitama, Güicán, Miraflores, Monguí, Nuevo Colón, Páez, Samacá, San Eduardo, Sativasur, Soatá, Socha, Susacón y Úmbita
Caldas	Manizales, Riosucio, Salamina y Supía
Caquetá	Florencia y Valparaíso
Cauca	Bolívar, Miranda, Piendamó, Santander de Quilichao, Silvia y Timbío
Cesar	Valledupar, Aguachica y Pailitas
Cundinamarca	Bituima, Carmen de Carupa, Chocontá, El Colegio, Guachetá, Guasca, Junín, Paime, Quipile, Simijaca, Villagómez y Villeta
Huila	Colombia, Garzón, Santa María, Suaza y Tarqui
La Guajira	Riohacha, Distracción, El Molino, San Juan del Cesar y Villanueva
Magdalena	Ciénega
Meta	Villavicencio y Acacías
Nariño	Cumbal, Puerres y Yacuanquer
Norte de Santander	Cúcuta, Ábrego, Cócota, Chitagá, El Carmen, Herrán, La Esperanza, Pamplona y Toledo
Quindío	Calarcá
Santander	Concepción, Curití, Guavatá, Málaga, San Benito, San Gil, Simacota, Socorro y Tona
Tolima	Flandes, Fresno, Líbano, Melgar y Ortega
Valle del Cauca	Cali y Yumbo

Fuentes subterráneas

De las 824 fuentes con información, en 622 se hace control de la calidad del agua, frente a 208 sin control. El mayor número de fuentes con control es característico de los departamentos de Antioquia (127), Caldas (78), Cundinamarca (57), Boyacá (54) y Santander (53).

Solamente en 150 fuentes de abastecimiento superficial existen mecanismos para control de crecientes, lo que equivale a 18 % del total de las fuentes, ubicadas principalmente en los departamentos de Antioquia (22), Santander (16) y Boyacá (14).

Para el análisis se contó con información de 85 de los 176 pozos, y se encontró que en todos los casos el caudal captado es inferior al caudal de diseño. El detalle del número de pozos por departamento se relaciona a renglón seguido (tabla 5).

Tabla 5

Número de pozos por departamento

Departamento	N.º de pozos	Sin información	Total
Antioquia	4	6	10
Bolívar		1	1
Boyacá	18	19	37
Casanare	2		2
Córdoba	1	3	4
Cundinamarca	3	13	16
Huila		2	2
La Guajira	3		3
Magdalena	17		17
Meta	2	3	5
Norte de Santander	1		1
Quindío		3	3
Risaralda	4	3	7
San Andrés		17	17
Sucre	27	9	36
Santander		7	7
Tolima		1	1
Valle del Cauca	3	4	7
Total	85	91	176

Los resultados señalados en la tabla siguiente muestran que en ocho pozos se capta un caudal superior al caudal concesionado (tabla 6).

Tabla 6
Número de pozos por departamento según el uso del caudal concesionado

Departamento	Menor que el $Q_{de\ concesión}$	Mayor que el $Q_{de\ concesión}$	Sin información	Total
Antioquia	4		6	10
Bolívar	0		1	1
Boyacá	23	1	13	37
Casanare	2			2
Córdoba	1		3	4
Cundinamarca	3		13	16
Huila	0		2	2
La Guajira	3			3
Magdalena	17			17
Meta	3	1	1	5
Norte de Santander	0	1		1
Quindío	3			3
Risaralda	3	1	3	7
Santander			7	7
San Andrés	0		17	17
Sucre	26	4	6	36
Tolima	0		1	1
Valle del Cauca	3		4	7
Total	91	8	77	176

Los municipios donde el caudal captado de pozos es superior al concesionado están localizados en Puerto Boyacá, en Boyacá; Villavicencio, en Meta; Tibú, en Norte de Santander; Pereira, en Risaralda, y Corozal, en Sucre.

CONCLUSIONES

- La prestación del servicio de acueducto en las cabeceras municipales se encuentra a cargo de 1176 empresas de servicios, que atiende a 1092 municipios.
- Se contó con información de 591 empresas presentes en 542 municipios que registraron en el Sistema Único de Información. De las 1000 fuentes reportadas por los prestadores en el SUI, 824 corresponden a fuentes hídricas superficiales y 176 a pozos.
- Se abastece a 39 municipios con aguas subterráneas. Los departamentos de Cundinamarca (7), Antioquia (6), Sucre (5) y Boyacá (4) son los que concentran

un mayor número de municipios con abastecimiento de este tipo.

- Se utilizan 206 fuentes de abastecimiento para la descarga de vertimientos de 183 municipios, situados principalmente en los departamentos de Antioquia, Cundinamarca y Boyacá.
- En los años 2009 y 2012 se presentó el mayor número de fuentes con caudales mínimos y máximos; en el año 2009 se registraron 176 y 161, mientras que en el año 2012 hubo 224 y 213, respectivamente.
- En 101 fuentes hídricas superficiales se capta un caudal superior al caudal medio de ésta. Los departamentos de Cundinamarca (19), Boyacá (15) y Caldas (9) son los que registran un mayor número de fuentes con esta condición.
- El caudal captado de los pozos, en todos los casos, es inferior al caudal de diseño de éstos.
- En 241 fuentes superficiales se utiliza un caudal superior al caudal concesionado, siendo los departamentos de Cundinamarca (46), Antioquia (39), Boyacá (28) y Santander (25) los que registran un mayor número de fuentes en esta condición.
- En ocho pozos, el caudal captado superó al caudal concesionado, situados en Puerto Boyacá, en Boyacá; Villavicencio, en Meta; Tibú, en Norte de Santander; Pereira, en Risaralda, y Corozal, en Sucre.
- De un total de 824 fuentes de abastecimiento, a 622 se les hace control de la calidad del agua, ubicadas sobre todo en los departamentos de Antioquia, Caldas, Boyacá, Cundinamarca y Santander.
- Hay 150 fuentes de abastecimiento, un 18 % del total, ubicadas principalmente en los departamentos de Antioquia, Santander y Boyacá, que tienen controles para crecidas.

REFERENCIAS

- Bernate Suárez, N. (2017). *Inventario de fuentes de abastecimiento de los sistemas de acueducto de las cabeceras municipales de Colombia*. Trabajo de grado para optar al título de magister en Ingeniería Civil, con énfasis en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (2014). *Implementación del Sistema de Información del Recurso Hídrico (SIRH) en Colombia*. Bogotá: Ideam.
- Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (2010). www.sui.gov.co.
- Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (enero de 2016). *Registro Único de Prestadores de Servicios*. Obtenido de www.sui.gov.co.

¿Cuáles son los factores que influyen en el éxito de la gerencia de proyectos en las pymes del sector de las TI en Bogotá, D.C.?

What factors influence in the success of project management of SMEs from the ICT sector at Bogotá D.C.?

JENIFER ALEJANDRA SÁNCHEZ SARMIENTO - GERMÁN EDUARDO GIRALDO GONZÁLEZ

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

jenifer.sanchez@mail.escuelaing.edu.co - german.giraldo@escuelaing.edu.co

Recibido: 28/06/2018 Aceptado: 10/08/2018

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

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

Resumen

Los autores de este artículo tienen como objetivo identificar, analizar y recomendar factores que influyan en el éxito de la gerencia de proyectos en pymes del sector de las TI en Bogotá, D.C., con el fin de contribuir al aumento de la productividad, competitividad y sostenibilidad de estas organizaciones. La metodología se basó en la revisión de bibliografía internacional y la aplicación de entrevistas semiestructuradas a gerentes de proyectos con experiencia en pymes del sector de las TI, en las que como resultado se obtuvieron los siguientes factores: definición de alcance, planeación, gestión de *stakeholders*, comunicación asertiva y talento humano. Se consideró que dichos factores eran los que había que tomar en cuenta para la correcta ejecución de una gerencia de proyectos exitosa.

Así las cosas, se destaca que este estudio contribuye a la definición y comprobación empírica de los factores de éxito para la gerencia de proyectos en este importante sector.

Palabras claves: éxito, factores, gerencia de proyectos, pequeñas y medianas empresas y pymes.

Abstract

This article seeks to identify, analyze, and suggest factors influencing the success of project management of SMEs from the ICT sector at Bogotá, DC, to contribute to the increase of productivity, competitiveness, and sustainability of these organizations. The methodology was based on the review of international literature and the application of semistructured interviews to project managers with experience in SMEs from the ICT sector. As a result of that, the following factors were obtained: scope definition, planning, and human talent. These factors have been the most important to consider for a successful project management implementation.

Therefore, this study contributes to the definition and empirical verification of success factors for project management in this important sector.

Keywords: success, factors, project management; SMEs.

INTRODUCCIÓN

Más del 95 % de las empresas del mundo son pequeñas y medianas empresas (pymes). En Colombia, estas organizaciones generan desarrollo y crecimiento económico en todos los sectores de la economía nacional, consolidándose como un importante motor de desarrollo. Sin embargo, según el *Global Entrepreneurship Monitor* (Kelley, Singer & Herrington, 2016), “las pymes presentan altas tasas de mortalidad”. De acuerdo con algunos autores, “en Colombia se estima que más del 32,5 % de las empresas fracasan, principalmente por falta de generación de valor” (Espinosa, Molina & Vera-Colina, 2015). En materia de generación de valor y sostenimiento en el tiempo, se “requiere la aplicación de mejores prácticas de gerencia de proyectos que influyan positivamente en el incremento de productividad, competitividad, efectividad, eficiencia y logro de objetivos (...) para obtener un impacto positivo sobre la productividad y éxito organizacional, especialmente en pymes, incluso mayor que aplicar prácticas de mercadeo o de negocios” (Pollack & Adler, 2014).

En cuanto al sector de las tecnologías de la información (TI), estas empresas se consolidan como generadoras de empleo, crecimiento e innovación. No obstante, los desarrollos contemporáneos en el campo de las TI y el surgimiento de nuevas filosofías y conceptos en términos políticos y económicos requieren el desarrollo continuo de la eficiencia y efectividad de los proyectos en este sector, lo cual se relaciona directamente con los factores de éxito de la gerencia de proyectos.

Por lo anterior, con este estudio se pretende identificar factores que contribuyan a incrementar la generación de valor, desempeño, competitividad y productividad de dichas compañías, para que puedan tomar acciones que les permitan desarrollar procesos simples, efectivos y enfocados en una gerencia de proyectos confiable y rentable, que brinde soporte para conseguir mejores resultados que favorezcan su sostenibilidad.

Esta investigación es de tipo cualitativo, con alcance exploratorio, y consta de dos fases. En la primera fase se revisó la bibliografía internacional en busca de los factores de éxito para este importante sector. En la segunda, se caracterizaron los factores de éxito en la gerencia de proyectos en nueve pymes de TI, a través de la aplicación de diez entrevistas semiestructuradas a gerentes del sector de las TI en Bogotá. Para esta investigación, los factores de éxito corresponden a los

elementos críticos que afectan positivamente el desarrollo de un proyecto o su gerencia.

ANTECEDENTES

Según Bancóldex (2017), en Colombia “el sector empresarial está clasificado en micro, pequeñas, medianas y grandes empresas. Esta clasificación está reglamentada en la Ley 590 de 2000 y sus modificaciones (Ley 905 de 2004), conocida como la Ley Mipymes. El término pyme hace referencia al grupo de empresas pequeñas y medianas con activos totales superiores a 500 SMMLV y hasta 30.000 SMMLV (salario mínimo mensual legal vigente)”.

Para Giralt (2007), las pymes representan el 96,4 % de los establecimientos empresariales, generan el 80,8 % de empleo y tienen presencia en los diferentes sectores productivos; en el grupo de las tecnologías de la información cada año emergen nuevas empresas dedicadas a este sector, de las cuales el 20 % sobreviven al tercer año (Dinero, 2015).

Por otra parte, para Barragán (2002), “las TI son una herramienta para que las organizaciones sean más eficientes y se consoliden en el mercado, debido a que no sólo aportan información valiosa y económica, sino que contribuyen además a la estandarización de procesos y consecuente reducción de costos”, lo cual hace que este sector sea relevante para el emprendimiento, empleo, innovación y crecimiento económico de Colombia.

Dentro de la gerencia de proyectos efectuada en pymes, la metodología que se va a utilizar para su desarrollo, implementación y evaluación final deberá tener en cuenta que la realización de proyectos, en cualquier tipo de empresa, debe ser una de sus actividades fundamentales para la actualización e innovación [3], que garantice la sobrevivencia en un entorno competitivo. Tal como lo afirman Giralt Mas, Companys Pascual, & Palà-Schönwälder (2010), hay que tener presente que la realización de estos proyectos es una condición necesaria pero no suficiente, ya que deben llevarse a cabo correctamente y la clave de su éxito recae en una buena gestión.

MARCO TEÓRICO

La gestión de proyectos dentro de una compañía brinda desarrollo e innovación. Por tal motivo, la gerencia

Tabla 1
Factores de éxito más importantes en la gerencia de proyectos

Factor	Importancia
Comunicación efectiva	Se presenta al llegarse al estado de comprensión ¹ , es decir, cuando en los <i>stakeholders</i> se entiende con claridad qué se quiere hacer y cómo se quiere hacer.
Planeación adecuada	Determinar el tiempo (cronograma), recurso (materiales, mano de obra, etc.) y presupuesto necesario para llevar a cabo un proyecto.
Equipo de trabajo del proyecto capacitado	Contar con la colaboración e implicación de personas con ciertas características relevantes dentro de un área o aspecto fundamental para el desarrollo de alguna actividad o proceso, de un proyecto.
Métodos de procesos estructurados de gerencia de proyectos	Proporcionar un marco para el modelado detallado de sistemas, guías, recursos y presupuestos necesarios para llevar a cabo un proyecto.
Motivación y sinergia en el equipo de trabajo	Aumentar el rendimiento del grupo de personas que se encuentran trabajando en el desarrollo de un proyecto.
Gerente del proyecto con liderazgo, capacitado	El liderazgo es una de las formas más importantes y efectivas para hacer que un vínculo entre individuos funcione. Un líder es reconocido como la figura más importante dentro del proyecto, debido a que es la persona que cumple con características destacadas que le permiten destacarse y manejar en forma adecuada diferentes situaciones, además de ser quien conoce cada parámetro y generalidad en un proyecto.
Gestión de equipo de trabajo	Medir y mejorar la capacidad de comunicación, negociación, organización de tiempos y tareas, y hacer uso del recurso intangible (conocimientos) de manera adecuada y concreta.
Gestión de riesgos	Analizar e identificar cada uno de los riesgos a los que un proyecto está expuesto, con el fin de mitigar las consecuencias desfavorables.

Fuente: Elaboración del autor.

de éstos se convierte en un criterio fundamental que determina el éxito o fracaso de cualquier empresa; por lo tanto, la identificación y el estudio de los factores que ayudan a la correcta ejecución se han convertido en una práctica fundamental. Por esto asociaciones y estándares a escala mundial buscan un conjunto de buenas prácticas, reglas, políticas y características para que sean de uso común dentro de las actividades y procesos que un proyecto contiene. Al identificar la palabra *éxito* en los estándares y autores internacionales, entre los cuales se encuentran IPMA, PMI PMAJ, APM, ISO (Hedeman, Kerzner, Berkum, Barner & Cole y Pinto), se encontró cierta congruencia entre los factores de éxito propuestos (tabla1).

METODOLOGÍA

La metodología de la investigación es de tipo cualitativo, con alcance exploratorio; se presenta en tres componentes generales: primero, la elección de una entrevista semiestructurada, creada principalmente para indagar

sobre los factores de éxito, influyentes, diferenciadores o comunes; de la gerencia de proyectos en pymes de TI, dicha herramienta se utilizó para obtener la información con la cual se caracterizaron los factores de éxito en la gerencia de proyectos en nueve pymes de TI, a través de la aplicación de diez entrevistas a gerentes de proyectos con experiencia de al menos un año en pymes del sector TI en Bogotá. Para esta investigación, los factores de éxito corresponden a los elementos críticos que afectan el desarrollo de un proyecto o su gerencia, o influyen en él.

El segundo componente hace referencia al marco interpretativo del enfoque de la investigación, basado en la teoría fundamentada; esta técnica se desarrolla en un diseño sistemático, representado claramente en la figura siguiente (figura 1). Esto implica la recopilación de datos mediante la transcripción de las diez entrevistas y la organización de éstos al realizarse la comparación de cada una de las respuestas obtenidas por parte de los diez gerentes o directores de proyectos.

El tercer componente corresponde a los resultados que siguen el orden de los objetivos específicos de la investigación, al identificar los elementos comunes y diferenciadores entre los factores encontrados en las pymes de TI entrevistadas, haciendo a su vez una comparación

1. González Correa, Sánchez Castañeda & Velandia Quintero, 2016.

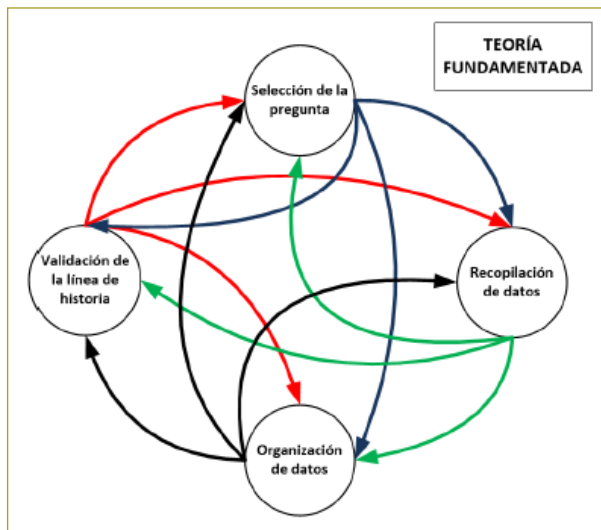


Figura 1. Proceso de la teoría fundamentada con diseño sistemático.

y análisis de la información obtenida, exponiendo los hallazgos de cada pregunta con las comparaciones y análisis correspondientes. Se tabularon los resultados de cada pyme que colaboró en la investigación al definirse sus características, es decir, establecieron en forma clara y precisa el tipo de productos o servicios manejado, el tamaño de la compañía, el nicho de mercado y, por último, el manejo en tipo que un proyecto pequeño, medio o grande tenía.

En cuanto a la tabulación y manejo de la información correspondiente a los factores de la gerencia de proyectos (influyentes, de éxito y diferenciadores o comunes), se evaluaron las preguntas que contenían dicha información de la siguiente manera:

- ¿Se reconoce explícitamente el rol de gerente de proyectos en el sector?
- ¿Qué características debe tener un proyecto para considerarlo exitoso?
- ¿Cuáles cree que son los factores que más influyen en el éxito de la gerencia de proyectos ejecutados en las pymes del sector de las TI? ¿Cómo contribuyen?
- ¿Cuáles considera que son los factores que más influyen en el fracaso de la gerencia de proyectos ejecutados en las pymes del sector de las TI?
- ¿Usted cree que hay factores que dificultan la gerencia de proyectos ejecutados en las pymes del sector de las TI pero que son llevaderos?

Una vez recopilada la información de manera clara y precisa se realizó su clasificación, es decir, se evaluó cada respuesta por frecuencia de mención. En la tabla siguiente se relacionó la escala de importancia de los factores de éxito de la gerencia de proyectos ejecutados por las pymes del sector de las TI y se establecieron los factores más importantes de éxito para la gerencia de proyectos en las pymes de TI, los cuales se ven reflejados en los resultados de la investigación (tabla 2).

Por último, se encuentran las conclusiones y recomendaciones, así como trabajos futuros propuestos.

RESULTADOS

Para determinar el tipo de proyectos que desarrollan las empresas objeto del estudio, se preguntó sobre las líneas

Tabla 2
Escala de importancia de los factores de éxito de la gerencia de los proyectos ejecutados por las pymes del sector de las TI, utilizada por los entrevistados

Importancia	Escala	Criterio
4	1. Crítico	Aspecto imprescindible para el logro de los objetivos de la gerencia de los proyectos que forman parte de la cadena de valor de las pymes de TI en Bogotá.
3	2. Muy influyente	Aspecto fundamental para el logro de los objetivos de la gerencia de los proyectos que forman parte de la cadena de valor de las pymes de TI en Bogotá.
2	3. Influyente	Aspecto relevante para el logro de los objetivos de la gerencia de los proyectos que forman parte de la cadena de valor de las pymes de TI en Bogotá.
1	4. Menos influyente	Aspecto importante para el logro de los objetivos de la gerencia de los proyectos que forman parte de la cadena de valor de las pymes de TI en Bogotá.

Fuente: González Correa, Sánchez Castañeda & Velandia Quintero, 2016.

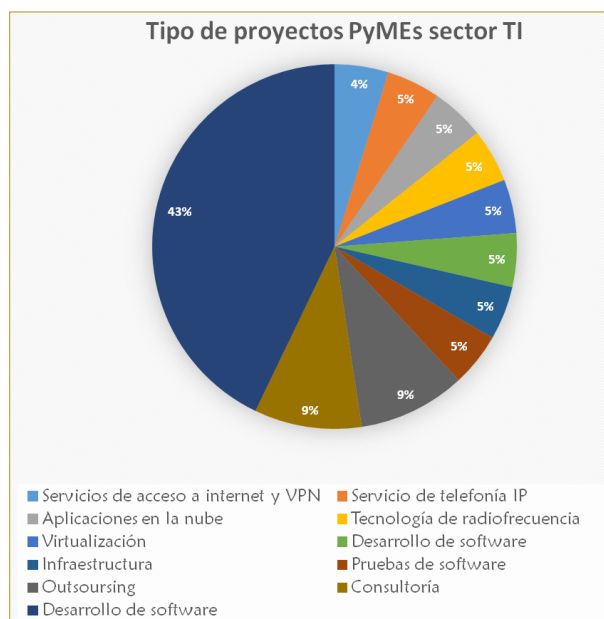


Figura 2.Tipos de proyectos de las pymes de TI entrevistadas.

Fuente: Elaboración del autor.

de negocio a las que se dedican. Los resultados de las entrevistas se pueden ver en la primera figura (figura 1).

Al comparar los resultados con el “Estudio de caracterización ocupacional del sector de telecomunicaciones, *software* y TI en Colombia (2015)”, los servicios ofrecidos por las pymes de esta investigación coinciden con las líneas de negocio identificadas para las pequeñas

y medianas empresas en un 41 %, tal como se refleja en la figura anterior (figura 2) en referencia a los datos hallados (tabla 2) (observar productos/ servicios resaltados), donde se dan a conocer los productos o servicios que ofrece el sector de la telecomunicaciones, *software* y TI en Colombia.

Por tratarse de una investigación exploratoria, en las entrevistas se formularon preguntas abiertas sobre los factores de éxito de la gerencia de proyectos, con el fin de identificar los elementos que desde la experiencia de cada uno de los entrevistados representó un factor influyente y crítico dentro del desarrollo de un proyecto; dicho factor se describió y calificó correspondientemente, teniendo en cuenta la frecuencia de mención (tabla 2). Igualmente, se relacionan la descripción y la escala de importancia de cada uno de los factores encontrados (tabla 4).

Más adelante se muestra la frecuencia en cuanto a la escala de importancia, según los criterios que forman parte de ésta (figura 3).

De lo anterior se puede inferir que:

- El factor determinado como crítico debido a la frecuencia de respuestas es la comunicación efectiva con *stakeholders*; es decir, para la gerencia de proyectos de pymes de TI en Bogotá es un aspecto considerado imprescindible para el logro de los objetivos que la gerencia de proyectos busca alcanzar, con

Tabla 3
Productos y servicios que ofrece el sector de telecomunicaciones, *software* y TI en Colombia

Productos y servicios ofrecidos	Cantidad	Participación (%)
Manejo de centros de datos	851	21,2
Desarrollo / fábrica de <i>software</i>	772	19,2
Mesas de ayudas (otras)	477	11,9
Testing de <i>software</i>	330	8,2
Infraestructura como servicio	300	7,5
Consultoría e implementación	143	3,6
Mantenimiento o soporte de aplicaciones	143	3,6
<i>Software</i> como servicio	116	2,9
Otro	115	2,9
Plataforma tecnológica como servicio	90	2,2
Cloud computing	27	0,7
Gerencia	6	0,1
En blanco	646	16,1

Fuente: SENA, Mintic & Fedesoftware, 2015.

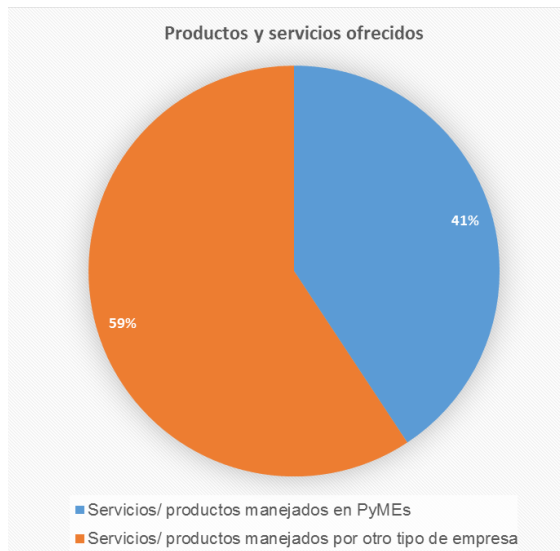


Figura 3. Proporción de productos/servicios ofrecidos en pymes de TI en Bogotá, D.C.

el propósito de generar cadena de valor en dichas compañías, debido a que al comunicarse de manera asertiva se puede alcanzar la sinergia de trabajo al lograr que cada una de las personas involucradas directa o indirectamente en el trabajo conozca con claridad el objetivo al cual se quiere llegar.

- La sinergia y motivación en el equipo de trabajo, así como la definición del alcance, se consideraron factores influyentes que representan un aspecto fundamental para el logro de los objetivos de la gerencia de proyectos influyen en un 12 % del éxito de la gerencia de proyectos, debido a que se encargan de la definición y ejecución de un proyecto.
- La definición del plan de proyecto, experiencia de la gerencia, gestión de recursos, inteligencia emocional, gestión de riesgo y adaptabilidad a los cambios representan el 35 % de aspectos considerados influyentes y relevantes para el logro de los mismos objetivos, debido a que sobre el proyecto se podrán trabajar y controlar dichos aspectos, además de que dichos factores en su mayoría dependen del equipo de trabajo; esto significa que su desarrollo se realiza en forma interna y depende única y exclusivamente de las personas involucradas dentro del proyecto.
- Por último, los factores restantes representan el 47 % de aspectos menos influyentes, aunque importantes para generar valor en la gerencia de proyectos en pymes de TI; esto indica que dentro de la ejecución de un proyecto corresponden a los aspectos

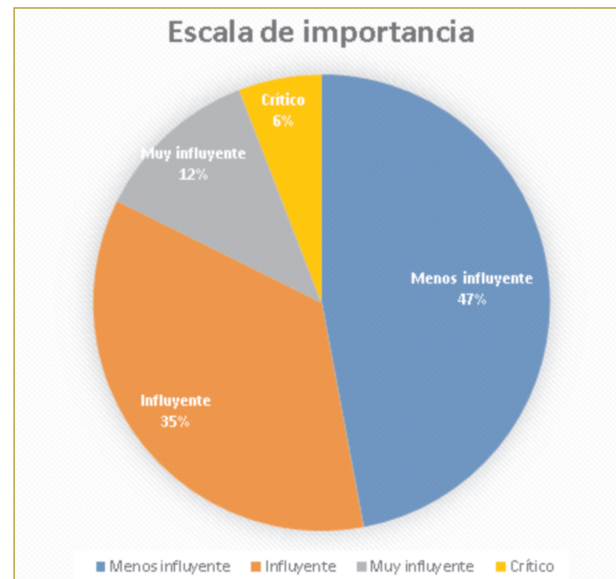


Figura 4. Escala de importancia de factores de éxito en la gerencia de proyectos de pymes de TI.

tratables, mitigables y con mayor probabilidad de controlar, en razón de que son preplaneaciones de las actividades, recursos, metodologías, técnicas y procedimientos que se realizarán en la ejecución del proyecto.

CONCLUSIONES

De acuerdo con el estudio efectuado, no todos los factores de éxito están asociados a la gerencia de proyectos, debido a que los cambios de opinión y las reestructuraciones solicitadas por el cliente durante el desarrollo del proyecto representan un factor de riesgo.

Los problemas de comunicación entre los *stakeholders* representan una barrera en las pymes de TI, puesto que no siempre se cuenta con el tiempo suficiente para atender reuniones.

Se evidencia la importancia del papel del gerente del proyecto, ya que el 100 % de las pymes entrevistadas lo considera clave, aunque en el 90 % el cargo existe sólo en el 80 % de éstas el gerente tiene la autoridad y autonomía de tomar decisiones; es claro, además, que falta un apoyo de la alta dirección, debido a que según el testimonio de la mayoría de los encuestados la alta dirección no se interesa en la mayor parte de los proyectos ejecutados.

El recurso humano se convierte en un factor crítico dentro del desarrollo de un proyecto, dado que se re-

Tabla 4

Factores que influyen en el éxito de la gerencia de proyectos en algunas pymes del sector de las TI en Bogotá, D.C.

Factor de éxito	¿Cómo contribuye al logro de los objetivos de la gerencia de proyectos en las pymes entrevistadas del sector de las TI en Bogotá?	Escala de importancia
Definición del alcance	Contribuye generando mayor información en cuanto al producto y poder hacer un seguimiento día a día de éste; es necesario tener plenamente definido el alcance, con el fin de lograr el objetivo que satisfaga al cliente y, por supuesto, contar con su aprobación.	3
Comunicación efectiva con <i>stakeholders</i>	Evita riesgos del proyecto, debido a que todos están encaminados hacia el mismo objetivo y se tiene total seguridad de lo que se hace y está haciendo; hay una comunicación completa entre el equipo de trabajo del proyecto y del cliente en cuanto a los avances del proyecto.	4
Definición del plan de proyecto	Define en forma clara y precisa las actividades que hay que realizar para conseguir el objetivo del proyecto, el cuándo se realizará, y los elementos necesarios para la ejecución de las actividades que lo componen.	2
Cumplimiento de cronogramas	La entrega de proyectos en los tiempos establecidos implica todo lo relacionado con la planificación del proyecto y la satisfacción del cliente al cumplir con lo que buscaba en el tiempo esperado.	1
Experiencia en la gerencia	Un gerente de proyecto debe ser una persona que de verdad tenga un sentido común que haya desarrollado y pueda aplicar diferentes técnicas para llevar su proyecto al éxito. Es necesario que su capacidad intelectual sea amplia y que su perfil de decisión sea el adecuado para la gerencia de proyectos de una compañía.	2
Inteligencia emocional	Al lidiar constantemente con personas, con egos, entonces deben tener la capacidad de manejar dicho aspecto para mantener control y compromiso dentro del equipo de trabajo.	2
Gestión de recursos	Si no se cuenta con los recursos necesarios para la elaboración de un proyecto, sin duda éste se verá limitado en su desarrollo y, por tanto, puede no ser ejecutable.	2
Levantamiento de requerimiento	Debido a que se debe tener total conocimiento del producto que se desea fabricar y de las tecnologías que para su desarrollo habrá que utilizar, así como los conocimientos específicos respecto a ciertos temas.	1
Gestión de riesgos	Contribuye en la medida en la que se reconoce la posible afectación de éste y se hace un plan de contingencia para mitigar su ocurrencia.	2
Control de la calidad	Debido a que se busca entregar un producto que se mantenga en el tiempo y que sea duradero, con el fin de generar confiabilidad del cliente en la empresa.	1
Sinergia y motivación en el equipo de trabajo	Debido a que si dichos aspectos no se logran se perderá el objetivo del proyecto, cada integrante trabajará en el desarrollo del objetivo que el proyecto busca suplir.	3
Estimación de costos	Debido a que dicho presupuesto deberá administrarse con cuidado durante su elaboración con el fin de tener una aproximación real de lo que sucederá durante la ejecución del proyecto, puesto que sin capital no se podrá concluir el proyecto.	1
Lecciones aprendidas	Las experiencias a lo largo de la gerencia de proyectos brindan una luz frente a nuevos proyectos que se tengan, dado que se cuenta con técnicas efectivas.	1
Capacidad intelectual	Factor esencial, ya que el manejo del conocimiento es clave para alcanzar un objetivo; no es posible trabajar sobre algo que no se conoce dentro de un proyecto.	1
Adaptabilidad a cambios	Más que del proyecto, esto dependerá del equipo de trabajo y del cliente, por cambios realizados debido a limitaciones en cuanto a tecnología, y recursos o presupuesto.	2
Control del proyecto	Factor fundamental, encaminado hacia el cumplimiento y disciplina del equipo de trabajo; es decir, se requiere un constante control en cuanto a lo que pasa, y sus consecuencias y causas, para evitar sorpresas.	1
Metodología aplicada	La aplicación de una técnica (metodología) correcta facilitará el desarrollo de un proyecto.	1

Fuente: Elaboración del autor.

quiere su motivación y sinergia para alcanzar un nivel óptimo de productividad y efectividad, trabajo que le corresponde al gerente de proyectos.

Es claro para la mayoría de los encuestados que contar con talento humano es fundamental para el desarrollo de un proyecto, en virtud de que se necesita

gente con conocimientos específicos en metodologías, tecnologías e idiomas.

La definición del alcance del proyecto representa el problema más común entre las pymes entrevistadas, ya que existen problemas de comunicación entre el gerente de proyectos y el representante del cliente; esto implica

que no se entiende adecuadamente la necesidad que el cliente busca satisfacer y que la gerencia de proyectos no es exitosa.

Se reconoce el éxito de la gerencia de proyectos en un 70 % para las pymes entrevistadas, lo cual indica que la labor desempeñada por los gerentes de proyectos ha ido mejorando, al evidenciarse que se trabaja sobre los factores que para ellos representan más riesgos, partiendo de una comunicación asertiva y definición de los canales de comunicación.

Las pymes del sector de TI entrevistadas para el presente estudio perciben el éxito del proyecto como “Cumplir con el alcance, tiempo y costo, entregando un producto que cumpla las expectativas del cliente en términos de funcionalidad y calidad, que logre prevalecer en el tiempo para generar un valor al negocio del cliente”.

Así mismo, perciben que una gerencia de proyectos exitosa es “Aquella que consigue terminar un proyecto y que como resultado obtiene la satisfacción del cliente, dentro del presupuesto y cronograma acordados”.

La planeación y la elección de la metodología que se van a utilizar para el proyecto son considerados factores importantes en el desarrollo del proyecto, ya que dan una directriz acerca de los pasos, estrategias y tácticas que se usarán en cada una de las etapas del proyecto.

Se requiere la completa alineación de las estrategias de un grupo de proyecto a las estrategias organizacionales de la compañía, debido a que se busca la vinculación completa de la pyme para que el apoyo de la dirección se vuelva relevante y contribuya al éxito de la gerencia de proyectos.

Es fundamental la definición de entregables en la etapa de planeación del proyecto, para que el cliente conozca el avance del proyecto y de tal manera alinee sus expectativas al producto intangible propuesto para satisfacer su necesidad; esto con el fin de aterrizar al cliente en expectativas y que éste conozca de primera mano el proyecto.

El seguimiento y control se convierte en un factor con doble sentido para algunos gerentes de proyectos entrevistados, debido a que, aunque para todos es importante llevar un seguimiento y control de actividades, tareas y cronogramas, no se puede restringir o idealizar que el gerente de proyectos se dedicara únicamente a eso; por lo tanto, se reconoce que su correcta defini-

ción debe hacerse en una carta descriptiva, en la que se convierta en una de muchas funciones.

Algunos factores de éxito en la gerencia de proyectos en las pymes del estudio no son de autonomía del gerente del proyecto, ya que hacen referencia a procesos organizacionales como la burocracia de las organizaciones, que limitan de cierta manera el uso de algunas herramientas o formas de implementación de una aplicación.

RECOMENDACIONES

Los gerentes de proyectos deben trabajar sobre el aspecto de la comunicación, con el propósito de interpretar y transmitir de la mejor manera las ideas propuestas para satisfacer esa necesidad que se les comunicó.

Se evidenció que los presupuestos representan un factor de riesgo para un proyecto. Por eso se recomienda la tercerización de esta tarea, ya que existen compañías que se encargan de prestar el servicio, propuesta con la que se pretende reducir el error en el que se incurre por la mala ejecución de esta tarea, aunque se aclara que el levantamiento de los requerimientos del proyecto representa un factor crítico para dicha tarea dado que lo ideal es trabajar sobre la realidad.

El trabajo sobre la etapa de planeación es fundamental para el desarrollo de un proyecto; por tanto, a todos los gerentes de proyecto se les recalca la importancia de la realización de dicho trabajo.

Es claro identificar el mercado presente para el sector de TI, con el fin de buscar el personal capacitado que en un futuro se requerirá para el desarrollo de un proyecto; esto ayuda a la hora de contratar a un aspirante, debido a que como ya se conoce el mercado identifica qué capacidades y conocimientos se necesitarán dentro del desarrollo de un proyecto.

El trabajo de los gerentes en la evaluación de perfiles de decisión es una habilidad que debería desarrollarse, ya que podrían identificar en forma abstracta qué es lo que quiere el cliente y qué es lo que realmente necesita; esto con el objeto de facilitar la lluvia de ideas que satisfacen la necesidad y, de la misma manera, aterrizar al cliente en sus expectativas.

El clima laboral es un factor representativo y de gran importancia para cada uno de los integrantes del equipo de trabajo; por ende, debería reconocer como un factor clave el choque generacional presente en el

equipo e identificar aquellos factores característicos de cada generación, con el propósito de evaluar el mejor método y disciplina de desarrollo.

El trabajo conjunto con el cliente es primordial para el desarrollo de un proyecto, pues con éste se pretende reconocer si el producto intangible elaborado es lo que el cliente entendió, y da a conocer los avances que ha tenido el proyecto; hay que establecer desde el inicio del proyecto dichos canales de comunicación y destacar la importancia de su involucramiento, ya que esto fundamenta las reuniones programadas y el fin de estas.

Es clave que toda la compañía conozca los tipos de proyectos realizados y el avance de la tecnología, además de los conocimientos específicos sobre ciertas áreas usualmente manejados en proyectos; esto con el fin de que el área comercial no venda un producto imaginario y genere falsas expectativas en el cliente.

Es fundamental, y depende del gerente de proyectos, la inclusión correcta de la dirección general de la pyme, para hacer un trabajo conjunto que brinde valor para la compañía.

Se propone la integración y formulación directa de un área de recursos humano, primero para la selección y reclutamiento del personal indicado y segundo para la implementación de políticas salariales, de capacitación, e incentivos salariales y no salariales, que brinden transparencia frente al equipo de trabajo, así como una motivación para aumentar el compromiso y productividad de los integrantes del equipo de trabajo.

Para los gerentes de proyectos ha de ser clara y justificada la puesta en práctica de una metodología de desarrollo, debido a que éstas se implementan de acuerdo con la complejidad del proyecto; por ende, deberán contar con el conocimiento y la experiencia suficientes para elegir en forma correcta y adecuada la metodología precisa que hay que implementar.

El gerente de los proyectos de las pymes de TI en Bogotá debe definir roles y responsabilidades tanto dentro del equipo del proyecto de manera clara y concisa, ya que como se evidenció en muchos casos el gerente de proyectos no trabaja en un solo proyecto, y esta delegación de tareas le facilitaría identificar las áreas débiles inmersas en un proyecto, y trabajar sobre éstas.

Es fundamental que el alcance de un proyecto esté definido con claridad para cada una de las personas que

trabajan en él, con el propósito de que cada actividad o tarea realizada evidencie el trabajo hacia ese objetivo.

El manejo de la inteligencia emocional es una disciplina que debe estudiar, desarrollar e implementar cada uno de los gerentes de proyectos, debido a que son los encargados de liderar un equipo de personas con diferentes ideales, pensamientos, formas de trabajo y niveles de compromiso; esto se hace con el fin de mejorar significativamente el clima laboral de la compañía y aumentar la productividad y la efectividad de ésta.

TRABAJOS FUTUROS

- Desarrollo de proyectos que identifiquen factores de éxito y fracaso en la gerencia de proyectos en cada sector de la economía colombiana.
- Ampliación del lugar de estudio, es decir, realizar el proyecto en los ámbitos regional o nacional.
- Estudio y análisis de las metodologías de trabajo existentes para el desarrollo de un proyecto.
- Proyección y análisis de proyectos para empresas colombianas.
- Evaluación de riesgos e implicaciones de la planificación de un proyecto en diversos sectores de la economía.

REFERENCIAS

- International Project Management Association (s.f.). About IPMA. Web oficial de la International Project Management Association. Recuperado de <http://www.pmi.org/pmbok-guide-standards/about>.
- Bancóldex (24 de marzo de 2017). Bancóldex. Obtenido de ¿Qué es una pyme? Recuperado de <https://www.bancoldex.com/Sobrepymes/Que-es-Pyme.aspx>.
- Barker, S., & Cole, R. (2001). *Brilliant Project Management: What the Best Project Managers Know, Say, and Do*. Pearson Education.
- Barragán, J. (2002). *Administración de las pequeñas y medianas empresas: retos y problemas ante la nueva economía global*. México: McGraw-Hill.
- Berkun, S. (2008). *Making Things Happen. Mastering Project Management*. O'Reilly.
- CEA-Cepal, Q. r. (10-13 de agosto de 2009). Diagnóstico sobre temas metodológicos y nuevos indicadores TIC para América Latina y el Caribe. Recuperado de <http://www.eclac.org/cgi-bin/getProd.asp?xml=/publicaciones/xml/2/36572/P36572.xml&xml=/deype/tpl/p9f.xml&base=/deype/tpl/top-bottom.xslt>.
- Dinero* (9 de febrero de 2015). Economía. Obtenido de ¿Por qué fracasan las pymes en Colombia? Recuperado de <http://www.dinero.com/economia/articulo/pymes-colombia/212958>.
- Estay-Niculcar, C., García-Carrillo, A., Cisteró, J., Fernández-Rosa, J., & Gracia, S. (2006). *Gestión de proyectos de conocimiento: experiencia usando una metodología de aprendizaje cooperati-*

- vo con entornos colaborativos en la formación de especialistas en proyectos de innovación informática. Actas del X Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos (vol. 3, 3054-3063. Fondo de Modernización e Innovación para las pymes (27 de mayo de 2010). Convocatorias iNNpulsa MIPYME (antes Fomipyme). Recuperado de <http://www.mincit.gov.co/mipymes/publicaciones.php?id=23362&dPrint=1>.
- Giralt, R., Companys Pascual, R., & Palá Schönwälder, P. (2010). Gestión de proyectos TIC: modelo de formación para pymes. Madrid: XIV International Congress on Project Engineering.
- Giralt, R. C. (2007). Los proyectos TIC en pymes de ciudades pequeñas. Enfoque inicial para el desarrollo de una metodología de gestión de proyectos. Actas del XI Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos (vol. 9, 2224-2232). Lugo, España.
- Gómez, J. (2008). La generación del conocimiento organizacional en las micro, pequeñas y medianas empresas (pymes) de Durango, México.
- González Correa, J. A., Sánchez Castañeda, S. L., & Velandia Quintero, D. A. (2016). Identificación y análisis de factores de éxito de la gerencia de proyectos en algunas pymes del sector TI en Bogotá, D.C., Colombia. Bogotá, D.C.
- Heldman, K. (2011). Project management jumpstart. John Wiley & Sons.
- International Organization for Standardization (septiembre de 2012). ISO 21500:2012. Web oficial de la International Organization for Standardization. <https://www.iso.org/standard/50003.html>.
- Jaramillo Arenas, C. A., & Jaramillo Medina, J. M. (2015). Informe sectorial Q3 2015 TIC en Colombia. Bogotá: Copyright.
- Kelley, D., Singer, S., & Herrington, M. (2016). Global Entrepreneurship Monitor GEM;2015/16 Global Report. Global Entrepreneurship Research Association.
- Kerzner, H. R. (2009). Project Management: A Systems Approach to Planning Scheduling, and Controlling. John Wiley & Sons.
- Pinto, D. E. (1 de junio de 2012). *Revista científica Pensamiento y Gestión*, N.º 33. Obtenido de <http://rcientificas.uninorte.edu.co/index.php/pensamiento/article/view/4923/3882>.
- Pinto, J. (2015). Gerencia de proyectos. Cómo lograr la ventaja competitiva. Editorial Pearson.
- Pollack, J., & Adler, D. (2014). Does Project Management Affect Business. Evidence From Australian Small to Medium Enterprises. *Project Management Journal*, 45(6), 17-24.
- Project Management Association of Japan (2007). History. Web oficial de la International Project Management Association of Japan. Recuperado de <http://www.pmaj.or.jp/ENG/index.htm>.
- Project Management Institute (2016). What is a standard? Obtenido de Web oficial del Project Management Institute: <http://www.pmi.org/pmbokguide-and-standards/standards-overview.aspx>.
- SENA, Mintic & Fedesoft (2015). Caracterización del sector de teleinformática, software y TI en Colombia. Bogotá.

Análisis de la relación existente entre los accidentes viales y la señalización vial

Analysis of the connection between traffic accidents and traffic signs

ROMINA KATZ¹ - MARITZA CECILIA VILLAMIZAR ROPERO² - GERMÁN MEDINA³

1. Ingeniera civil de la Universidad Nacional de Rosario (Argentina) y magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Ingeniería Vial y de Transporte del Israel Institute of Technology (Technion) (Israel). Profesora de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

2. Ingeniera civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, especialista en Diseño, Construcción y Construcción de Vías, y magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Tránsito y Transporte de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Profesora de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

3. Ingeniero civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, asistente de investigación y estudiante de la Maestría en Ingeniería Civil con énfasis en Tránsito y Transporte.

romina.katz@escuelaing.edu.co - maritza.villamizar@escuelaing.edu.co - german.medina@escuelaing.edu.co

Recibido: 29/06/2018 Aceptado: 05/08/2018

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

Resumen

Un sistema de transporte tiene por objetivo proveer un movimiento seguro, eficiente y ambientalmente amigable de bienes y personas. Sus componentes deben funcionar en forma correcta.

Un componente vital es la señalización vial, pues si ésta es inadecuada puede generar efectos contrarios a su objetivo. Cada intersección vial es un punto de decisión para el usuario, y por eso se espera que exista una correcta señalización que reduzca en el usuario la tensión y la ansiedad, facilite la toma de una correcta decisión y contribuya a su seguridad.

En el presente artículo se analizará la señalización vial existente en cinco de las intersecciones con mayor número de accidentes registrados en los años 2015 y 2016 en la ciudad de Bogotá. Se comparará dicha señalización con la indicada por el manual (*Manual de señalización vial: dispositivos uniformes para regulación del tránsito en calles, carreteras y ciclorrutas en Colombia*, actualizado en el año 2015).

El objetivo de esta investigación es establecer la posible relación entre la señalización vial existente o su ausencia, y la grave accidentalidad registrada en esas intersecciones viales.

Palabras claves: señalización vial, intersección vial, accidentes viales, seguridad vial.

Abstract

A transport system intends to provide a safe, efficient, and environmentally friendly movement of goods and people. Its components must function properly.

Traffic signs are essential components of this system and their failure to signal correctly can cause undesired effects. Every road intersection represents a decision point for the driver, therefore, it is expected that the correct signal can reduce their stress and anxiety, help them to make the correct decision, and contribute to road safety.

This paper will evaluate the current traffic signs in five of the most common intersections for traffic accidents during 2015 and 2016 in Bogota. These signals will be compared with the indicated signals in the manual (*Road Sign Manual - uniform traffic control devices for streets, roads, and bike paths in Colombia*, updated in 2015).

This research aims to establish a connection between traffic signs and accident rates at intersections.

Keywords: traffic sign, road intersection, traffic accidents, road safety.

INTRODUCCIÓN

Para que un sistema de transporte funcione correctamente debemos concentrarnos en el análisis, diseño y evaluación de dicho sistema, integrando de manera adecuada todos sus componentes.

Un elemento vital del sistema de transporte es la señalización vial, pero si ésta es inadecuada puede generar efectos contrarios a su objetivo. Es decir, si la señalización no es la correcta o se está utilizando en forma indiscriminada, afecta su credibilidad. Por lo tanto, se produce una falta de confianza y de respeto a la señalización en general, y se termina ignorando las señales incorrectas, pero lo más grave es que se termina desconociendo también aquellas que son correctas.

Se podría suponer que, frente a los avances tecnológicos, como el desarrollo de los vehículos autónomos, este tema perdería vigencia. Sin embargo, toda la información acopiada para la señalización es relevante para la automatización del tránsito.

Tal como lo pretende el *Manual de señalización* vigente en el país, la circulación vehicular y peatonal se debe guiar y regular con miras a garantizar su seguridad, fluidez, orden y comodidad; justamente a través de la señalización se indica a los actores del tránsito la forma correcta y segura de circular por las vías, evitar riesgos, orientar y facilitar la circulación y optimizar los tiempos de viaje.

Cada intersección entre vías en el viaje de un usuario es un punto de decisión. Una correcta señalización asegura la plena orientación del usuario, reduciendo su tensión y su ansiedad, facilitando la toma de decisión correcta y contribuyendo a la seguridad vial.

La señalización vial condiciona el comportamiento del usuario frente a determinadas situaciones que se desean destacar, mediante estímulos visuales que afectan las decisiones del usuario.

Una señalización correcta es aquella que le permite al conductor percibirla, leerla, procesarla y responder de una manera segura, sin interferir en el resto del tránsito. Sin embargo, nunca se debe considerar como garantía de seguridad ni puede sustituir a la conducción responsable. Además, la información que se puede transmitir en la señalización es poca, debido a las limitaciones en la capacidad de procesamiento de los datos por parte del usuario.

Es destacable que acerca del tema específico que se va a desarrollar en la presente investigación, hay escasas investigaciones precedentes.

Vale la pena citar la investigación desarrollada por S.O. Baltierra, candidato a doctor del posgrado en Diseño de la Unidad Xochimilco de la Universidad Autónoma Metropolitana (*Mala señalética, determinante en la ocurrencia de accidentes viales*. S.O. Baltierra, 2015), que concluyó que una mala señalización vial genera caos y percances. Cabe aclarar que el término *señalización* en la citada investigación abarcó todo tipo de dispositivos de control (semáforos, balizamiento, etc.) y no solamente señalización vertical, como se propone en el presente artículo.

Un sistema vial es complejo y los conductores necesitan ayuda para orientarse y lograr llegar a su destino a tiempo de una manera cómoda y segura. Por esto la señalización debe estar diseñada para ayudar al conductor en la orientación durante la conducción. Cada cruce o intersección entre vías en el viaje de un usuario es un punto de decisión.

Dentro de una ciudad el conductor está expuesto a recibir múltiples informaciones, por lo cual la transmisión de éstas debe ser simple, rápida y de comprensión universal. Por otro lado, si bien en un entorno rural la información que recibe el conductor es menor, las velocidades que se desarrollan son mayores; por tal razón, sigue siendo imperativo que la información sea simple y rápidamente comprensible.

Las metas de la señalización son:

- Evitar accidentes
- Aumentar la seguridad de la circulación
- Gestionar adecuadamente el tránsito
- Evitar viajes inútiles
- Orientar plenamente al usuario
- Reducir la tensión y la ansiedad del usuario

Por ello se debe indicar a los usuarios las precauciones (prevenciones) que deben tener en cuenta, las limitaciones (restricciones) que gobiernan el tramo en circulación e informaciones que son estrictamente necesarias, dadas las condiciones específicas de la calle o carretera.

Los requisitos fundamentales que debe cumplir la señalización son satisfacer una necesidad, llamar la atención, transmitir un mensaje simple y claro, imponer respeto a los usuarios y estar en el lugar adecuado para dar tiempo de reacción.

Toda señal debe ser clara, sencilla, uniforme y mantener continuidad. La claridad exige transmitir mensajes comprensibles fácilmente por los usuarios, no recargar la atención del conductor reiterando mensajes y, en todo caso, imponer las menores restricciones posibles a la circulación, eliminando las señales requeridas para definir determinadas circunstancias de la carretera o ciertas restricciones en su uso en cuanto cesen de existir esas condiciones o restricciones. La sencillez exige que se emplee el menor número posible de elementos, en tanto que la uniformidad requiere que los elementos utilizados, su implantación y los criterios de aplicación sean exclusivamente los descritos en la presente norma. La continuidad significa que un destino incluido una vez en la señalización se debe repetir en todos los carteles siguientes hasta que se alcance (citado de la norma 8.1 IC. Instrucción de Carreteras, Ministerio de Fomento, Gobierno de España).

En el *Manual* se definen las señales de tránsito como un “Dispositivo físico o marca vial que indica la forma correcta en que deben transitar los usuarios de las vías, y se instala a nivel de la vía para transmitir órdenes o instrucciones mediante palabras o símbolos”.

Las hay de distintas clases: reglamentarias, que indican limitaciones, prohibiciones o restricciones; preventivas, que advierten sobre una condición peligrosa, o informativas, que guían y suministran información necesaria sobre destinos, sitios turísticos y distancias, entre otras.

En el *Manual* se detallan las señales que se deben utilizar, justificando su uso, e indicando ubicación, dimensiones, colores y otras características.

METODOLOGÍA

Por intermedio del servicio de datos abiertos del Sistema Integrado de Información sobre Movilidad Urbano Regional (Simur), en su observatorio de movilidad, se obtuvo el registro de siniestralidad de los años 2015 y 2016, el cual contenía datos consolidados. No se utilizaron registros de accidentalidad anteriores a los años expresados, dado que no se puede asegurar la permanencia en el tiempo de las señales.

El registro utilizado contiene, entre otros, los siguientes ítems para cada accidente de tránsito:

- Accidente (código asignado al accidente)
- Fecha y hora
- Gravedad (daños, heridos, muertos)
- Clase de accidente
- Dirección
- Localidad
- Tipo de diseño (tramo, intersección, etc.)
- Número de muertos
- Número de heridos
- Causas
- Clima

De lo anterior se hizo un filtro, con el fin de obtener un banco de datos de accidentes ocurridos solo en intersecciones, para cada año estudiado. Posteriormente se efectuó un conteo de los accidentes ocurridos en cada dirección registrada.

Tras analizar los resultados obtenidos anteriormente, y priorizando la seguridad física (robos, asaltos, etc.) al momento de hacer la toma de datos en campo, se optó por llevar a cabo el estudio en las siguientes intersecciones (figura 1):

- Avenida Caracas con calle 60
- Calle 69 con carrera 15
- Calle 74 con carrera 23
- Avenida Boyacá con calle 170
- Avenida Ciudad de Cali con calle 72

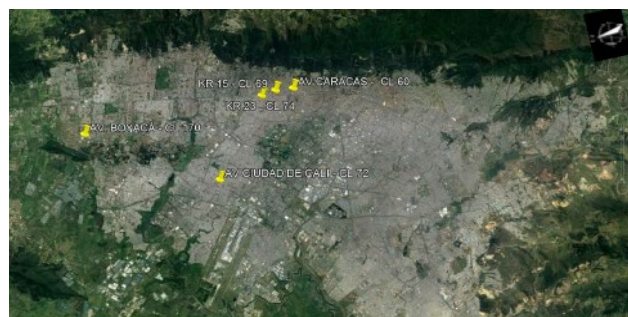


Figura 1. Ubicación geográfica de las intersecciones estudiadas.

Con el propósito de realizar la toma de datos de la señalización vertical existente en cada intersección, se procedió de la siguiente forma:

- Se dividió la intersección por accesos, de acuerdo con su orientación (norte, sur, este u oeste), y a su

vez, éstos se dividieron de acuerdo con su sentido (norte-sur, sur-norte, este-oeste, oeste-este).

- Se identificó la señalización vertical existente en cada acceso.
- Se tomaron los datos de cada señal vertical identificada en el acceso.
- Se utilizaron flexómetros, cintas y un sistema de posicionamiento global (GPS) para obtener la ubicación georreferenciada de cada señal.

Posteriormente, se consignaron las características de las señales identificadas (tabla 1).

Tabla 1
Formato de datos observados

Datos registrados	
Tipo de señal	
Ubicación	
Dimensiones	
Tamaño del símbolo	
Espesor de la orla	
Altura	
Color	
Estado de conservación	
Costados de la calzada	
Tipo de soporte	
Retroreflexión	

Fuente: Elaboración propia.

A continuación se explica a qué hace referencia cada uno de los datos registrados en campo para cada señal:

Tipo de señal

Se clasificó el tipo de señal según el *Manual* y de acuerdo con la función que desempeña.

Se tomaron en cuenta tres grupos: señales reglamentarias (SR), señales preventivas (SP) y señales informativas (SI). Cabe aclarar que no se consideraron las señales transitorias (ST), ya que al ser temporales existe la posibilidad de que no se encontraran en el momento de los accidentes.

Ubicación

Se refiere a ubicación longitudinal. Se la midió desde el borde de la acera del acceso hasta la señal misma.

Dimensiones

Se refiere al tamaño de la señal, es decir, las dimensiones de su tablero. En el caso de que la señal fuera de forma rectangular, cuadrada o romboidal, se midieron su ancho y su alto, y en el caso de que la señal fuera circular, se midió su diámetro.

Tamaño del símbolo

Hace referencia a la altura del logo o leyenda en el interior de la señal, ya sean los caracteres de la leyenda, flechas, símbolos o pictogramas.

Espesor de la orla

Se refiere al ancho de la orla medida transversalmente a ésta.

Altura

Se refiere a la altura desde el borde lateral de la calzada hasta la parte inferior del tablero.

Color

Se registró el color del fondo del tablero, y se obtuvo la siguiente clasificación: blanco, amarillo, verde, verde fluorescente, rojo, azul y negro.

Estado de conservación

Se definieron tres categorías: bueno, vandalizado y malo.

Costados de la calzada

Se indicó si la señal está ubicada del lado derecho o izquierdo de la calzada, y en el caso de existir un separador central, se indicó si la señal está ubicada sobre éste.

Tipo de soporte

En el caso de señales laterales, se hace referencia al tipo de poste que sostiene la señal. La clasificación fue perfil tipo ángulo o tubular. En el caso de señales elevadas, se registraron como señales sostenidas por ménsulas.

Retroreflexión

La retroreflexión de la señalización se delimitó a las categorías de “SÍ” y “NO”, es decir, si ésta era existente o no, respectivamente.

Finalmente, se analizó en forma comparativa la situación existente de la señalización vial con las especificaciones del *Manual*, indicando si las cumple o no, buscando las potenciales desviaciones.

RESULTADOS

Avenida Caracas con calle 60

Ésta fue la intersección con mayor número de accidentes registrados en el 2016. Sin embargo, esta intersección, a diferencia de las demás, cuenta con la particularidad de que la totalidad de la señalización vertical se encuentra correctamente ubicada y en su mayoría justificada, de acuerdo con los parámetros del *Manual*, y el 70 % de las señales cumple con las dimensiones requeridas.

Aun así, se observa que el tamaño de los símbolos en más de la mitad de las señales evaluadas no es el correcto; en el 60 % de las señales la altura se encuentra fuera del rango permitido, y en el 60 % de los casos no se cuenta con la propiedad de retroreflexión. Adicionalmente, el estado de conservación en la mayoría de las señales es deficiente tal como sucede en las demás intersecciones.

Calle 69 con carrera 15

La intersección de la calle 69 con carrera 15, ambas vías locales, se ubica dos calles hacia el occidente de la avenida Caracas, una vía arteria de la ciudad. Por tal razón, el flujo principal observado se produce en sentido occidente-orientado, buscando incorporarse a ésta.

Esta intersección se identificó como la segunda con mayor número de accidentes registrados en el año 2016.

Se observó que, en dos de sus accesos, existe un predominio de “cumplimiento”. Sin embargo, cabe destacar que en el 58 % de la señalización vertical no se encuentra justificada la instalación en dicho sitio. Se encontró la presencia de señales de carácter temporal (no mayor de doce meses), pero al revisar fotografías a

través de la aplicación Street View de Google, se pudo establecer que dichas señales están instaladas desde el año 2013.

Adicionalmente, al momento de realizar el trabajo de campo se pudo observar que la visibilidad para el conductor que transita en sentido sur-norte se ve reducida por las construcciones adyacentes.

Calle 74 con carrera 23

Es la intersección con mayor número de accidentes registrados en el 2015.

En cuanto a ubicación y justificación de la señalización, hay muy pocas señales que cumplen con estos ítems; además, aunque las señales cumplen con las dimensiones estipuladas en el *Manual*, sólo el 27 % de éstas cuentan con la dimensión correcta de su respectivo símbolo. Así mismo, se observa un bajo nivel de cumplimiento en la altura de las señales y en la propiedad de retroreflexión, y a diferencia de las demás intersecciones, hay un mejor estado de conservación. Aun así, no todas las señales se encuentran en óptimas condiciones.

Avenida Boyacá con calle 170

Al analizar la señalización vertical como posible causa de tan alto índice de accidentalidad, se determinó que el 42 % de la señalización no se encuentra correctamente ubicada, el 37 % no está correctamente justificada, el 58 % de las señales no cumple con las dimensiones de los símbolos estipuladas en el *Manual* ni con la altura adecuada, y tampoco presenta buen estado de conservación; por último, el 63 % no presenta condiciones de retroreflexión, lo cual se traduce en baja o nula visibilidad de la señalización en condiciones de poca luz.

Adicionalmente, se observa que la señalización horizontal de la intersección se encuentra en mal estado o es inexistente en algunos accesos. El acceso de la calle 170, sentido orientado-occidente, registra la mayor cantidad de ítems negativos de todos los accesos.

Avenida Ciudad de Cali con calle 72

En esta intersección hay un predominio considerable de señales informativas, aun cuando éstas no se encuentren justificadas, mientras que las señales reglamentarias no cumplen con sus dimensiones y justificación.

A renglón seguido se representa gráficamente el porcentaje de cumplimiento de cada una de las características que se evaluaron para la señalización vertical encontrada en cada una de las cinco intersecciones. Dicho cumplimiento se basa en los parámetros del *Manual* (figuras 2 a 9).

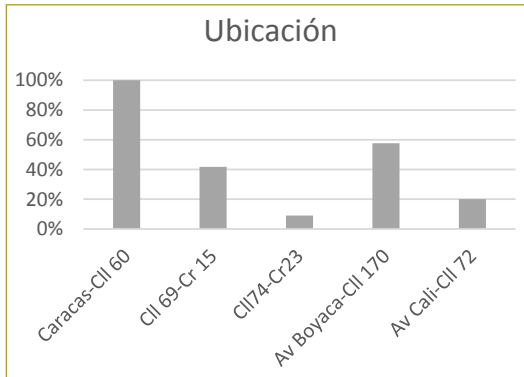


Figura 2. Porcentaje de cumplimiento de la ubicación.

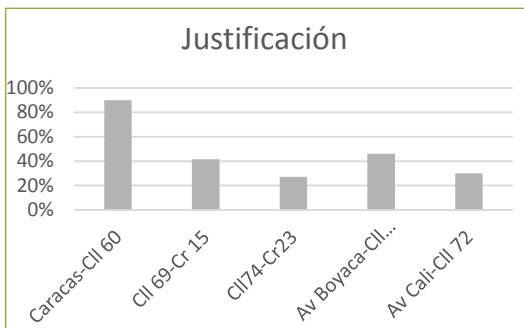


Figura 3. Porcentaje de cumplimiento de la justificación.

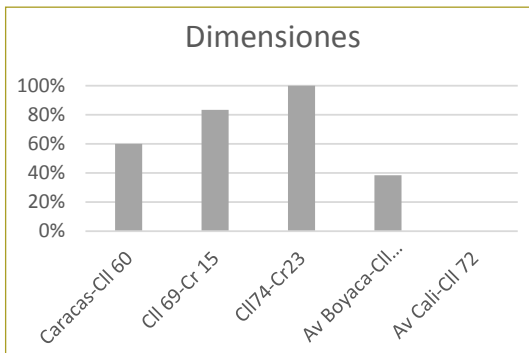


Figura 4. Porcentaje de cumplimiento de las dimensiones.

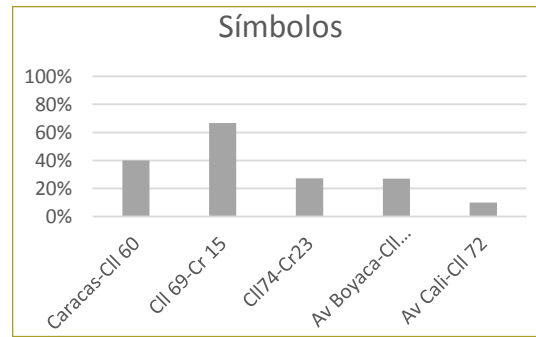


Figura 5. Porcentaje de cumplimiento de las dimensiones de los símbolos.

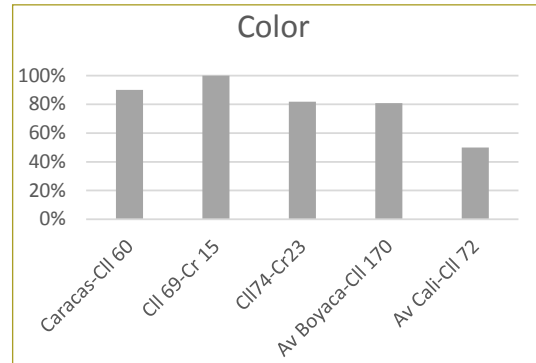


Figura 6. Porcentaje de cumplimiento del color.

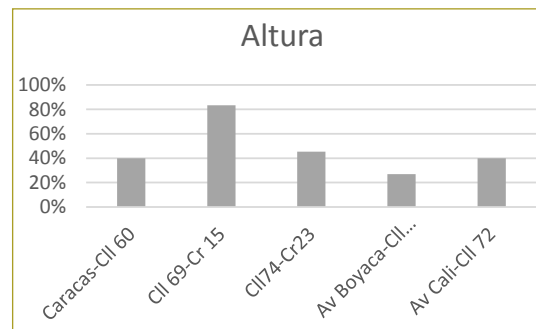


Figura 7. Porcentaje de cumplimiento de la altura.



Figura 8. Porcentaje de cumplimiento de la retroreflexión.

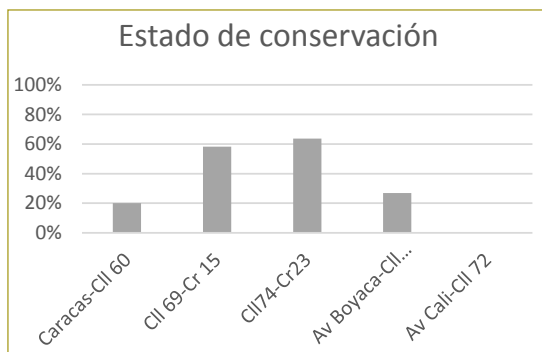


Figura 9. Porcentaje de cumplimiento del estado de conservación.

En la mayoría de las intersecciones evaluadas, la ubicación y la justificación presentaron bajos porcentajes de cumplimiento, siendo estos parámetros fundamentales en la seguridad de la intersección.

En la categoría de color de la señalización se encontró un alto porcentaje de cumplimiento, pero muchas de las señales preventivas de presencia de peatones y ciclistas en la vía (SP-46, SP-47, SP-49) son de color amarillo, mientras que en la versión actualizada del *Manual* figura que deberían ser verdes.

En general, en las categorías restantes (altura, dimensiones de la señal, dimensiones de los símbolos, retrorreflexión y estado de conservación) se encuentran porcentajes muy bajos de cumplimiento, siendo estas categorías determinantes para la percepción e identificación de la señalización por parte de los usuarios en el proceso de percepción y reacción.

CONCLUSIONES

Como resultado del presente estudio es posible concluir que existe una relación entre una inadecuada señalización y la accidentalidad vial.

Se estudiaron las intersecciones con mayor grado de accidentalidad, se analizó comparativamente la situación existente de la señalización vial con lo indicado en el *Manual* y se encontró que hay una marcada desviación entre ambos.

La señalización existente en las intersecciones analizadas presenta un alto grado de incumplimiento

respecto a las indicaciones brindadas por el *Manual*. Los incumplimientos más relevantes son la ubicación (en el espacio adecuado), la justificación (la necesaria razón de ser y estar), la altura de los símbolos (altura del logo o leyenda en el interior de la señal), la altura de la señal (altura del tablero respecto de la calzada) y el estado de conservación.

La conversión de señales provisionales en definitivas y el intento de corregir problemas viales con señales verticales, en lugar de resolverlos utilizando otras herramientas (cambio de la geometría, educación vial, etc.), ocultan el problema e incluso llegan a incrementarlo.

En resumen, se puede deducir que la inadecuada señalización, ya sea por falta de claridad en las indicaciones del *Manual* o por uso inadecuado de éstas por parte de los encargados del diseño, es un factor que afecta a la seguridad vial e incide en la accidentalidad.

REFERENCIAS

- [1] Código Nacional de Tránsito Terrestre (2002). Ley 769, Colombia.
- [2] Código Nacional de Tránsito Terrestre (2008). Ley 1239, artículo 1, que modifica el artículo 106, Colombia.
- [3] <https://www.datos.gov.co/Transporte/2015-ACCIDENTES-DE-TR-NSITO-BOGOT-/32yr-pxav> [2015].
- [4] <https://www.datos.gov.co/Transporte/2016-ACCIDENTES-DE-TR-NSITO-BOGOT-/79fi-zm8c> [2016].
- [5] Gitelman, V. et al. (2012). An examination of the influence of crosswalk marking removal on pedestrian safety. Transportation Research Institute Technion-Israel Institute of Technology. Haifa, Israel.
- [6] www.google.com.co/maps.
- [7] Ministerio de Fomento (2014). Señalización vertical de la Instrucción de Carreteras. Norma 8.1 IC, España.
- [8] Ministerio de Transporte (2004). *Manual de señalización vial, dispositivos para la regulación del tránsito en calles, carreteras y ciclorrutas de Colombia*.
- [9] Ministerio de Transporte (2015). *Manual de señalización vial, dispositivos uniformes para la regulación del tránsito en calles, carreteras y ciclorrutas de Colombia*.
- [10] Régimen legal de Bogotá. Decreto 190 de 2004, alcalde mayor.
- [11] Régimen legal de Bogotá. Decreto 469 de 2003, alcalde mayor.
- [12] Baltierra, S.O. (2015). Mala señalética, determinante en la ocurrencia de accidentes viales. México: Universidad Autónoma Metropolitana.

Integración de fuentes no convencionales de energía renovable dentro del mercado eléctrico mayorista

Integration of Non-Conventional Sources of Renewable Energy Within the Wholesale Electricity Market

NICOLÁS BOHÓRQUEZ¹ - IVÁN CAMILO DURÁN-TOVAR²

1. Ingeniero electricista de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

2. Profesor del Programa de Ingeniería Eléctrica de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

nicolas.bohorquez@mail.escuelaing.edu.co - ivan.duran@escuelaing.edu.co

Recibido: 18/06/2018 Aceptado: 03/08/2018

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

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

Resumen

En este artículo se explora el estado de integración de las fuentes no convencionales de energía renovable (FNCER) al sistema eléctrico colombiano, específicamente al mercado eléctrico mayorista, con el fin de modelar el mercado con estas fuentes de energía emergentes. Como resultado, se muestra la exploración de las resoluciones colombianas concernientes a las FNCER, el estado de éstas en el país y una comparación con otros países de Latinoamérica.

Palabras claves: mercado eléctrico mayorista, proceso de subasta, precio de bolsa, despacho económico.

Abstract

This article explores the integration status of Non-Conventional Sources of Renewable Energy (NCRE) to the Colombian electrical system, specifically to the wholesale electricity market, to model this market with these emerging energy sources. As a result, the exploration of the different Colombian resolutions concerning NCRE, their state in the country, and their comparison with different Latin American countries are shown.

Keywords: wholesale electricity market, auction process, stock price, economic dispatch.

INTRODUCCIÓN

La energía eléctrica es un *commodity* que se comercializa con una calidad previamente definida y un alto nivel de estandarización. La entrega se realiza en las redes de alta tensión de cada país que, junto con las redes de distribución, se encargan de llevarla hasta el cliente final. Sin embargo, el mercado eléctrico tiene una característica particular respecto al resto de *commodities* energéticos: el hecho de que la electricidad no se pueda “almacenar” afecta decisivamente los procesos de generación, comercialización, transporte y distribución.

La energía eléctrica se produce en centrales de generación, las cuales se clasifican según el recurso del que provenga la energía (renovable y no renovable). Las centrales pueden competir entre ellas para producir electricidad en función de los costos de combustibles y de la eficiencia.

Puesto que la energía eléctrica no es almacenable, en cada instante de tiempo se debe producir la misma cantidad que se consume, con el fin de preservar sus características de servicio.

El precio que pagan los clientes por la energía eléctrica está conformado por dos componentes: precio de la energía (procedente de las actividades en competencia) y tarifas de acceso (retribuye las actividades reguladas). Vale la pena señalar que el precio de la electricidad en los mercados es muy volátil y está influenciado por varios factores, como meteorología, actividad económica, precio del combustible, etc.

No obstante, la aparición y la expansión de nuevas formas de producir energía eléctrica a partir de fuentes no convencionales de energía renovable (FNCER) han traído cambios importantes a los sistemas eléctricos, tales como el costo de producción de energía eléctrica, la intermitencia en la generación y la aparición de la generación distribuida.

Las nuevas fuentes de energía eléctrica buscan utilizar los recursos energéticos disponibles en la naturaleza de manera “amigable” con el medio ambiente, reduciendo al máximo el impacto negativo sobre los ecosistemas. De este modo se aprovechan recursos de fácil acceso, como la radiación solar, el viento y la energía térmica de la corteza terrestre. Por tratarse de fuentes que se encuentran fácilmente en la naturaleza, y que no requieren un proceso de extracción previo, el acceso a estos recursos es gratuito. Tal característica se

refleja en una reducción de los costos de generación, medido en \$/kWh.

Con la integración de energías limpias al sistema eléctrico, aparece una nueva figura llamada *prosumer* (acrónimo formado por la fusión de las palabras inglesas *producen* y *consumer*), que se conoce también como autogenerador. Esta figura representa un cambio en la etapa de generación, puesto que ésta deja de ser una actividad concentrada en las grandes centrales eléctricas y pasa a ser una actividad que puede estar en manos del cliente final. En otras palabras, la generación eléctrica en el sistema pasa de ser centralizada a ser distribuida.

Estos cambios a los que se enfrentan los sistemas eléctricos hacen que sea necesario estudiar el funcionamiento actual de los mercados, y evaluar si son eficientes para comercializar la electricidad producida a partir de las nuevas fuentes de energía.

ENERGÍAS NO CONVENCIONALES EN COLOMBIA

La primera etapa que se llevó a cabo fue la revisión de la reciente regulación expedida por el gobierno colombiano, relacionada con la generación eléctrica a partir de FNCER, incluyendo la Ley 1715 de 2014 [1], por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Eléctrico Nacional. Como consecuencia de esta ley, la Unidad de Planeamiento Minero Energético (UPME) y la Comisión de Regulación en Energía y Gas (CREG) se han encargado del marco normativo que regirá la entrada de estas nuevas fuentes de energía. De dicha ley se desprenden las resoluciones 024 de 2015 [2] y 030 de 2018 [3], promulgadas por la CREG, así como la Resolución 281 de 2015, expedida por la UPME [4].

A continuación se explica cada una de las leyes, haciendo énfasis en algunos artículos de importancia.

Ley 1715 de 2014

Esta ley regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Eléctrico Nacional. Entre las principales disposiciones se encuentran los incentivos a la inversión en proyectos de fuentes no convencionales de energía, el desarrollo y la promoción de las FNCER, así como la gestión eficiente de la energía, incluyendo un capítulo dedicado a zonas no interconectadas (ZNI). Incluye también acciones ejemplares

del gobierno nacional y de la administración pública, y el fomento de la investigación en el ámbito de FNCER y de la gestión eficiente de la energía.

Dentro de esta ley es importante destacar el artículo 41, que dicta:

“Acciones ejemplares. El gobierno nacional y el resto de administraciones públicas, en el ámbito de sus respectivas competencias, adoptará acciones ejemplares tendientes a la supresión de barreras técnicas, administrativas y de mercado para el desarrollo de las FNCER y la promoción de la gestión eficiente de la energía. En particular, las medidas tendrán por objeto la consecución del ahorro de energía y la introducción de FNCER en los distintos sectores, el establecimiento de requisitos mínimos de eficiencia para los equipos que consumen energía, la concientización de los consumidores de energía para un uso eficiente, la mejora de la eficiencia en la producción, el transporte y la distribución de calor y de electricidad, así como el desarrollo de tecnologías energéticas y para la eficiencia energética de los edificios. Para ello, se prestará especial atención a la formación del personal al servicio de las administraciones públicas, especialmente en el ámbito local y regional, donde se encuentran los órganos competentes para la tramitación y autorización de instalaciones”.

Con el propósito de promover la inversión en generación con tecnologías que utilicen fuentes renovables, la ley contempla una serie de incentivos fiscales. En primer lugar, se establece una reducción del impuesto de renta por hasta el 50 % de la inversión, que se puede aplicar en el transcurso de los cinco años siguientes a su realización. Adicionalmente, se exime del pago de IVA a todos los equipos y servicios, acotados por la UPME, que se destinen al proyecto. Como tercera medida, se determina que todos aquellos equipos, maquinaria, materiales e insumos que sean importados para los proyectos de FNCER, y no sean producidos por la industria nacional, estarán exentos del pago de aranceles. Por último, se estipula la posibilidad de depreciar aceleradamente los activos del proyecto, con una tasa anual de depreciación máxima del 20 %.

Resolución CREG 024 de 2015

Esta resolución permite regular la actividad de autogeneración a gran escala en el Sistema Interconectado Nacional (SIN), en la cual se establecen las condiciones

de conexión, medida, respaldo y suministro de energía, así como las condiciones para los autogeneradores a gran escala que quieran entregar excedentes al sistema. Dentro de lo establecido en esta resolución vale la pena señalar el artículo 12, el cual dispone:

“El autogenerador a gran escala que quiera entregar excedentes a la red deberá ser representado por un generador en el mercado eléctrico mayorista (MEM). Se aplican condiciones para plantas no despachadas centralmente si la potencia declarada es menor de 20 MW, y en caso contrario, las establecidas para las plantas despachadas centralmente”.

Del artículo anterior se puede concluir que, sin importar la tecnología de generación eléctrica utilizada, con FNCER o sin ellas, las condiciones para participación en el mercado no regulado son las mismas, por lo que sólo se podrán despachar centralmente aquellas plantas que tengan una potencia nominal de más de 20 MW.

Resolución CREG 030 de 2017

Esta resolución, por la cual se regulan las actividades de autogeneración a pequeña escala y de generación distribuida en el Sistema Interconectado Nacional, surge como fruto de las correcciones y comentarios hechos a una primera resolución de consulta para la regulación de este tipo de generación: la Resolución 121 de 2017, expedida por la CREG [5].

La resolución actual establece que todos los autogeneradores, con FNCER o sin ellas, son considerados como usuarios, y por tanto no se contempla que se constituyan como empresas de servicios públicos (EPS). Esto implica que los autogeneradores no pueden participar en convocatorias públicas para vender sus excedentes. Sin embargo, en la misma resolución los operadores de red (OR) están obligados a recibir los excedentes de los autogeneradores que utilizan o no FNCER.

PLAN ENERGÉTICO COLOMBIANO

Como segunda etapa, se realizó un estudio del actual plan energético en el país y los planes de expansión previstos por la UPME, con la inclusión de FNCER.

Matriz energética en Colombia hasta el año 2014

En el Plan Energético Nacional (PEN) del año 2014, la matriz energética colombiana estaba compuesta principalmente por dos fuentes: hidroeléctrica, con 63,9 % de participación, y térmica, con 31,1 % de la participación (figura 1). En aquel entonces se dijo que la concentración de la oferta energética podría hacer que el sistema eléctrico fuera vulnerable a corto plazo debido a los ciclos hidrológicos y su variabilidad, y a mediano y largo plazo, a la disponibilidad de gas natural, por hallazgos en el país o por disponibilidad de importaciones.

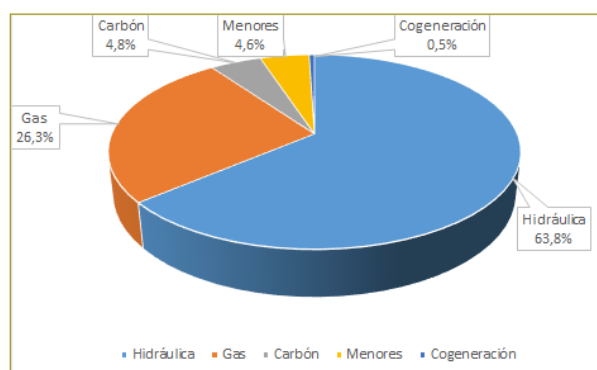


Figura 1. Mix energético colombiano del año 2014. Fuente: [7].

Esto sugirió la instalación de otras fuentes de energía que diversificaran la canasta, garantizando el suministro confiable de energía en el país. Un primer paso se logró con la Ley 1715 de 2014, de la que se desprenden las resoluciones 024 de 2015 y 030 de 2018, expedidas por la CREG, que buscan promover y regular la integración de FNCER en el Sistema Eléctrico Nacional.

Matriz energética en Colombia para el año 2017

Según el *Informe mensual de variables de generación y del Mercado Eléctrico Colombiano, diciembre de 2017* [6], realizado por la UPME, la participación de cada tipo de energía dentro de la producción total de energía eléctrica en Colombia se muestra más adelante (tabla 1).

Se observa una muy baja participación en las tecnologías de FNCER dentro de la matriz de generación energética colombiana, llegando a menos del 1 %, teniendo como principal representación el bagazo. En cuanto a grandes proyectos de generación con energías limpias, en Colombia vale la pena destacar dos casos:

Tabla 1

Matriz energética de potencia instalada en Colombia (a diciembre de 2017)

Tecnología/recurso	Capacidad efectiva neta [MW]	Capacidad efectiva neta [%]
ACPM	1248,0	7,41
Agua	11.725,6	69,94
Bagazo	130,7	0,78
Biogás	4,0	0,02
Carbón	1369,0	8,13
Combustóleo	314,0	1,86
Gas	1708,0	10,14
Jet-a1	46,0	0,27
Mezcla gas-jet-a1	264,0	1,57
Radiación solar	9,8	0,06
Viento	18,4	0,11

Fuente: [6].

- **Granja solar Celsia Yumbo [10].** Es un complejo de generación fotovoltaico conectado al SIN, el cual entró en funcionamiento desde el 3 de septiembre de 2017, con una capacidad instalada de 9,8 MW y capaz de generar cerca de 16,5 GWh al año. La participación del proyecto es de aproximadamente 0,05 % dentro de la matriz energética.
- **Parque eólico Jepírachi [11].** Es el primer parque eólico desarrollado en el país por EPM. Tiene 15 aerogeneradores de 1,3 MW cada uno, con una potencia total instalada de 19,5 MW. El proyecto entró en funcionamiento el 19 de abril de 2004.

Hasta la fecha, estos son los dos proyectos registrados de generación de energía eléctrica con FNCER en el país.

Plan de expansión de energía en Colombia

Gracias al Plan de Expansión de Referencia, Generación y transmisión 2014-2028 de la UPME se identificaron posibles alternativas de expansión a mediano y largo plazo. Uno de los escenarios planteados considera la participación de algo más del 10 % en FNCER en capacidad instalada hacia el 2028, con una generación que oscila entre el 2,5 y el 7,5 % de la producción total en el periodo de análisis.

Para el Sistema Interconectado Nacional (SIN), el PEN establece que "... los posibles generadores con FNCER con potencia nominal mayor de los 20 MW de

capacidad deberán cumplir los requisitos establecidos por la CREG para tal efecto, es decir, que cada proyecto debería construir una conexión independiente”.

ENERGÍAS NO CONVENCIONALES EN EL EXTERIOR

Como tercera etapa, se revisaron los casos de otros países, con el fin de analizar el resultado de su implementación. Para la selección de los casos de estudio se tienen en cuenta aspectos como el contexto sociopolítico del país, la conformación de la matriz energética, similitud con la matriz colombiana, por lo que se dio preferencia a los países ubicados en Latinoamérica.

Caso Uruguay

Según el informe *Renewables 2017 Global Status Report* [10], elaborado por REN21, Uruguay es el cuarto país con mayor participación de energía eólica dentro de su matriz energética, 23 % en 2016, frente a Dinamarca, que tiene una participación del 38 %, Irlanda con 27 % y Portugal con 24 % [11] (figura 2).

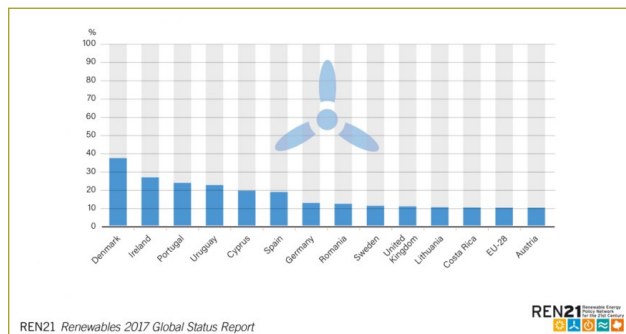


Figura 2. Matriz energética de Uruguay: enero a junio de 2016.
Fuente: [10].

La administración del mercado eléctrico en Uruguay está a cargo de la Administración del Mercado Eléctrico (ADME), creada en 1997. De acuerdo con información disponible en el sitio web de la ADME, se encuentra que actualmente hay más de 60 participantes en el mercado de energía, con una capacidad instalada de 4650,5 MW. Sin embargo, sólo 174,5 MW de dicha potencia instalada se comercializan en un mercado *spot*, es decir, un 3,7 %; el resto se comercializa en el “mercado de contratos a término”. Cabe señalar que, de dicha potencia instalada, el 26,4 % corresponde a energía eólica, el 8,5 % a energía solar fotovoltaica y el 5,6 % a biomasa, para un

total de 40,6 % de potencia instalada en FNCER. Más adelante se muestra la composición de la matriz energética uruguaya de enero a junio de 2018 [12] (figura 3).

Así mismo, en el artículo 72 del Decreto 360/002 [13] se determina que “ Toda generación que no califique como central de despacho libre está sujeta al despacho del Despacho Nacional de Cargas (DNC) y deberá cumplir con los procedimientos de programación y despacho que establece este reglamento”. Se denomina central de despacho libre a toda central con una capacidad instalada inferior o igual a 5 MW, y sin embargo éstas pueden optar por ser despachadas por el DNC. Lo anterior explica la existencia de pequeñas centrales eléctricas en la matriz energética uruguaya, donde la planta participante en el mercado *spot* con menor potencia instalada es la planta eólica del Lavadero de Lanas Blengio S.A., con una potencia de 1,8 MW.

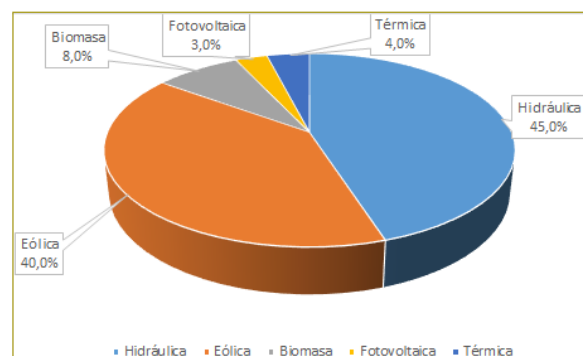


Figura 3. Matriz energética de Uruguay: enero a junio de 2016.
Fuente: [10].

Caso Chile

El caso chileno es de especial interés, dado el creciente desarrollo que ha tenido el país en los últimos años en términos de energías renovables. Aunque la primera instalación ERNC (energías renovables no convencionales) de Chile data del año 2007, con la promulgación de la Ley 20.257, el desarrollo de estas tecnologías ha tenido lugar en el periodo 2012-2016. Durante este periodo se incrementó la capacidad instalada en 340 %, desde los 949 MW del año 2012 hasta los 4155 del año 2016, según datos de la Asociación Chilena de Energías Renovables A.G. (Acera). Las FNCER más desarrolladas han sido la energía solar fotovoltaica y la eólica [14]. De acuerdo con datos de las empresas generadoras de Chile, a diciembre de 2017 este país cuenta con una capacidad

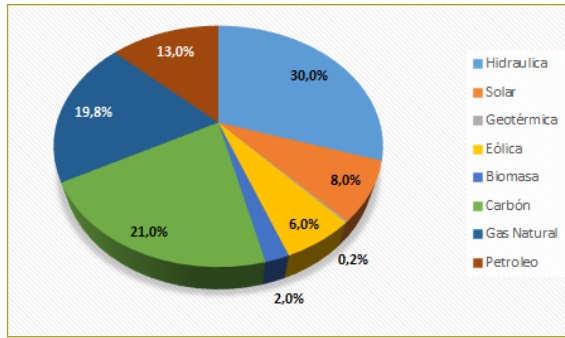


Figura 4. Composición de la matriz energética en Chile a diciembre de 2017.

Fuente: [17].

instalada neta de 22.369 MW. A continuación se muestra la matriz chilena a dicha fecha [15] (figura 4).

Uno de los factores principales para el crecimiento del país en términos de FNCER fue la voluntad política de desarrollo de este tipo de tecnologías, independiente de la ideología del partido político en el mando. Específicamente, cabe destacar la promulgación de la Ley Corta I (año 2004) y la Ley Corta III (2008), cuyo objetivo principal fue facilitar la incorporación de las ERNC a la matriz energética y su operación en el mercado, y posteriormente la Ley 20.698 de 2013, que establece la proyección de la participación de las FNCER en generación en el futuro de la siguiente manera:

- **2025.** 20 % de ERNC, sin incluir grandes hidroeléctricas (considerando sólo represas hidroeléctricas menores de 20 MW).
- **2035.** 60 % de energías limpias, incluyendo las grandes hidroeléctricas (con potencia instalada mayor de 20 MW).
- **2050.** 70 % de energías limpias, de los cuales un 30 % sean FNCER [18].

De este modo, se logró que a julio de 2017 la participación de las FNCER en la matriz energética chilena fuera del 15 %, principalmente en proyectos de generación fotovoltaica, mientras que en 2009 el aporte de las FNCER era del 2,7 %.

Caso Costa Rica

Otro caso de gran interés es el de Costa Rica, que el año pasado logró un marca histórica en la que el 100 % de su energía provino de energías limpias por un periodo de más de 300 días; es decir, que su sistema eléctrico

operó durante este lapso sin prender las plantas térmicas a base de hidrocarburos [19].

Costa Rica se consolidó en los últimos tres años como un modelo de generación eléctrica renovable, basado en las cinco fuentes limpias de la matriz nacional: agua, geotermia, viento, biomasa y sol. Entre el 1.º de enero de 2014 y el 21 de diciembre de 2017, el país superó los 1.000 días de producción 100 % limpia, según los datos del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE). Durante este periodo la generación a partir de fuentes renovables pasó de tener una participación en la matriz energética del 89,68 % en 2014 al 99,68 % en 2017 [20].

A continuación se detalla la matriz energética de potencia instalada a 2015 en Costa Rica [21] (figura 5).

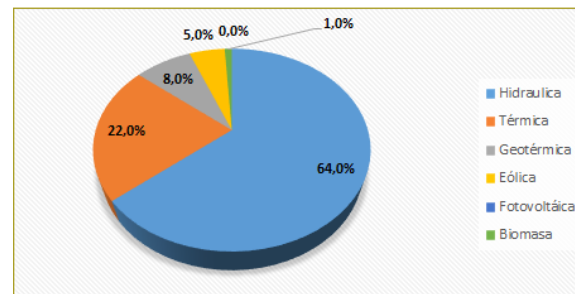


Figura 5. Potencia instalada en Costa Rica, 2015.

Fuente: [21].

Sin embargo, gracias a la construcción de nuevos proyectos de generación eléctrica con energías limpias, pese a que la potencia instalada de centrales térmicas es de 22,36 %, en el balance energético se tiene que las fuentes térmicas aportaron únicamente el 1,01 % de los 10.713,65 GWh que se produjeron en 2015. En la tabla siguiente se muestra la matriz energética de energía producida durante el primer semestre de 2017, según datos del Centro Nacional de Control de Energía (Cence) [22] (tabla 2).

Tabla 2
Matriz energética Costa Rica. 2015 [22]

Fuente	Energía producida en el 2015 [GWh]	Porcentaje
Hidráulica	8066,58	75,29
Geotérmica	1375,63	12,84
Eólica	1079,51	10,08
Térmica	108,12	1,01
Solar	82,28	0,77
Biomasa	1,53	0,01
Total	10.713,65	100,00

Fuente: [22].

De la matriz energética mostrada previamente cabe destacar que en el modelo costarricense predomina el uso de la generación hidráulica, que aporta firmeza y regulación al sistema, permitiendo agregar fuentes variables, como la eólica y la solar. El agua se mantiene como el principal sostén del país, al pasar de representar 66 % hace tres años a 77 % en 2017. Durante el periodo de 2014 a 2017, pasó de generar 6717 GWh a 8343 GWh. Así mismo, la geotermia se consolida como la segunda fuente de energía limpia en el país, al acumular 12,6 % de la generación entre 2014 y 2017.

Adicionalmente, la generación eólica tuvo un crecimiento del 60 % durante estos tres años. En 2014 contribuyó con 7,2 %, mientras que en 2017 llegó a 10,9 %. En términos de capacidad instalada se muestra como la de mayor desarrollo de la última década, con un aumento de 545 %. Por su parte, la generación por biomasa se mantuvo en niveles estables, alrededor de 0,7 % en este periodo, mientras que la energía solar se muestra incipiente: pasó de 0,01 % en 2014 a 0,02 % en 2017, con una capacidad instalada de 27 MW.

Caso Argentina

El caso argentino es de interés debido que, al igual que en Colombia, existe un mercado de energía mayorista (MEM), donde se comercializa la energía eléctrica a gran escala. Por esta razón, en la presente sección se describirá la actualidad argentina en cuanto a energías renovables y su comercialización en mercados mayoristas. Según datos de la Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico (Cammesa), el país suramericano presenta un crecimiento promedio anual del 1,7 %, alcanzando una potencia instalada total de 34.951 MW hacia el primer cuatrimestre del 2017 [23]. La energía eléctrica es producida, en su mayoría, a partir de combustibles fósiles e hidroeléctricas (figura 6). Cabe anotar que las hidroeléctricas cuya potencia instalada es inferior a los 50 MW se encuentran contempladas dentro del conjunto de “Otras renovables” (figura 7).

La principal fuente de energía renovable son las hidroeléctricas, sumando una potencia instalada de 11.101 MW, lo que representa un 33,1 % del total de la capacidad instalada.

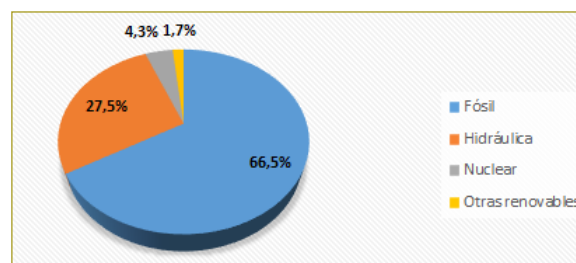


Figura 6. Matriz energética de Argentina: marzo de 2018.

Fuente: [24].

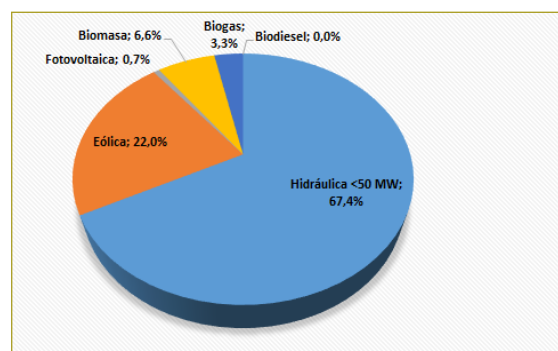


Figura 7. Composición de “Otras renovables”. Argentina, 2018.

Fuente: [24].

En cuanto a la generación con fuentes renovables, su participación sigue siendo baja en la matriz energética: apenas 29,2 %. Por esta razón, en el país suramericano se estableció el “Régimen de fomento nacional para el uso de fuentes de energía destinada a la producción eléctrica”, mediante la Ley 27.191 de 2015, en cuyo artículo 8 se establecen las metas mínimas de porcentaje de crecimiento del consumo a partir de fuentes de energías renovables al 31 de diciembre de cada año, respecto al total del consumo propio de energía eléctrica:

- **2017**, mínimo 8 % del consumo propio.
- **2019**, mínimo 12 % del consumo propio.
- **2021**, mínimo 16 % del consumo propio.
- **2023**, mínimo 18 % del consumo propio.
- **2025**, mínimo 20 % del consumo propio.

Por tal motivo se creó el mercado a término renovable (Mater), regulado por la Resolución MEyM 281-E-2017, con el objetivo de estimular las inversiones en generación de energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovables. En este mercado, los grandes usuarios (comercios e industrias con consumos de electricidad relevantes) podrán negociar la compra de energía renovable a generadores y comercializadores.

Pueden, incluso, asegurar hasta el 100 % de su aprovisionamiento eléctrico a partir de fuentes renovables. O pueden también adquirir únicamente los escalafones mínimos mencionados con anterioridad.

Caso Brasil

El sector eléctrico en Brasil es de particular interés por ser el más grande de Suramérica, con una capacidad instalada a 2017 de 150.421 MW, de acuerdo con información del Ministerio de Minas y Energía (MME) [25], valor que se incrementa hasta los 156.271 MW al incluir la potencia de importación contratada. Adicionalmente, es un caso de análisis clave para el presente estudio, puesto que al igual que el caso colombiano, Brasil obtiene la mayoría de su energía eléctrica a partir de fuentes hídricas, en especial de su más grande central hidroeléctrica en la represa de Itaipú (figura 8).

Se observa que Brasil tiene un gran desarrollo en generación eléctrica a partir de fuentes renovables de energía, alcanzando un 80,62 % de la potencia instalada; en cambio el total de centrales con combustibles fósiles alcanza sólo un 18,1 % y apenas el 1,3 % corresponde a generación con centrales nucleares.

Todo esto hace posible la generación de casi 550 TWh de energía al año en 2017, repartidos tal como se muestra en la tabla siguiente (tabla 3).

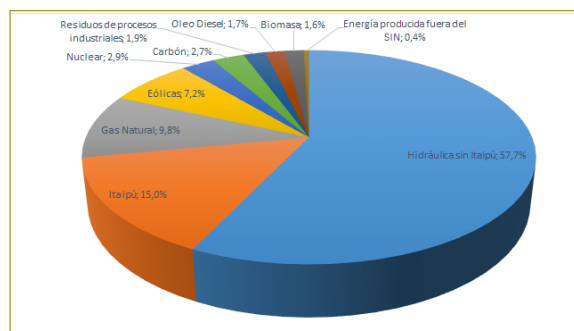


Figura 8. Matriz eléctrica de Brasil, 2015.

Fuente: [25].

El actual modelo institucional del sector eléctrico brasileño, creado en 2004 y regido por la Ley 10.848 y por el Decreto 5163, establece que las concesionarias, las permisionarias y las autorizadas del servicio público de distribución de energía del Sistema Interconectado Nacional (SIN) deben garantizar, mediante licitaciones en el modo de subasta, el suministro a la totalidad de su mercado, en el ambiente de contratación regulada (ACR).

CONTRASTE DE COLOMBIA CON EL EXTERIOR

A continuación se pueden evidenciar algunas diferencias importantes con respecto al contexto nacional, que dificultan el ingreso de las FNCER al MEM. En la tabla siguiente muestra una comparación de los escenarios estudiados con respecto al escenario colombiano (tabla 4).

Tabla 3
Composición de la potencia instalada en Brasil

Fuente	Número de centrales	Capacidad instalada [MW]	Generación distribuida [MW]	Total [MW]	Porcentaje
Hidráulica	1259	96.925	5	96.930	64,5
Gas natural	156	12.965	--	12.965	8,6
Biomasa	504	14.001	--	14.001	9,3
Petróleo	2220	8877	--	8877	5,9
Carbón mineral	13	3389	--	3389	2,3
Nuclear	2	1990	--	1990	1,3
Gas industrial	37	1925	--	1925	1,3
Eólica	413	10.124	5	10.129	6,7
Biogás	29	119	--	119	0,10
Solar	44	24	61	84	0,02
Desconocida	30	150	12	162	0,10
Total	4707		83	150.421	100
Importación contratada				5850	
Total disponible				156.271	

Fuente: [25].

Tabla 4
Comparación de Colombia con el mundo en términos de FNCER y su comercialización

País	Potencia instalada [MW]	Energía producida anual [GWh]	Matriz energética		Límite de potencia para el mercado spot [MW]	Comentarios sobre la comercialización de energía con FNCER
			Participación de FNCER	Participación de energías limpias*		
Colombia	16.837,5	66.839,0	1 %	70,6 %	20	Ningún generador FNCER alcanza el mínimo de participación.
Uruguay	4650,5	12.292,0	51 %	96,0 %	5	Principalmente contratos y una parte en el mercado spot (\approx 4%).
Chile	23.728,6	74.224,0	15-17 %	55,0 %	0,5-2	Principalmente contratos.
Costa Rica	3068,0	10.713,7	21,4 %	99,6 %	N/A	La autoridad reguladora de servicios públicos asigna las cuotas de participación de cada central.
Argentina	36.150,0	136.466,0	1,7 %	29,2 %	1	Para el ingreso al MEM, un generador debe producir más de 4380 MWh.
Brasil	156.221,0	549.763,7	10,8 %	82,5 %	N/A	Se realiza por contratos, principalmente.

* En esta columna se mide la participación de las fuentes de energía en la matriz energética de cada país, incluyendo las grandes hidroeléctricas.

Fuente: Elaboración propia.

Una de las principales barreras que se observan para que las FNCER entren al MEM es el límite de potencia mínimo para la participación de una central en el mercado de energía mayorista. Mientras que en Colombia este mercado está disponible únicamente para las centrales con una potencia instalada superior a los 20 MW, este límite es 1, 2 y hasta 5 MW en el caso más elevado de los países estudiados (Uruguay), lo que permite evidenciar que este límite es cuatro veces mayor en Colombia que en el resto de los países. Así pues, si suponemos que las principales centrales de FNCER, la granja solar Yumbo (9,8 MW) y el parque eólico Jepírachi (19,5 MW), estuviesen reguladas por una de las legislaciones estudiadas, ambas centrales podrían comercializar su energía en el MEM.

Adicionalmente, resulta interesante comparar la legislación colombiana con la regulación brasileña. Mientras que en Colombia se permite el acceso al MEM de centrales con potencia instalada mayor de 20MW, en Brasil aquellas centrales hidroeléctricas con potencia instalada mayor de 30 MW, así como las centrales térmicas cuya eficiencia sea superior al 75 %, deben por ley comercializar su producción eléctrica en ACR (ambiente de contratación regulado). En otras palabras,

mientras que en Colombia las grandes hidroeléctricas participan en el MEM, en Brasil, que presenta una alta participación del recurso hídrico en su matriz energética, la energía producida por las grandes hidroeléctricas es comercializada únicamente por contratos regulados.

Por otro lado, dos de los casos más representativos de crecimiento de centrales a partir de FNCER que se observaron fueron Chile y Uruguay. En ambos países dicho crecimiento fue impulsado por un plan estratégico nacional, que en el caso chileno se tradujo en la legislación de las metas que hay que alcanzar en términos de migración de la matriz energética hacia el uso de energías renovables.

En Colombia, por su parte, uno de los escenarios planteados por el Plan de Expansión de Referencia, Generación y Transmisión 2014-2028, de la UPME, considera la participación de algo más del 10 % en FNCER en capacidad instalada hacia el 2028. Para la misma fecha la legislación chilena espera haber superado el 20 % de participación de FNCER en su matriz energética.

Por último, se observa cómo en varios países la comercialización por contratos representa el medio más importante para la venta de energía producida por FNCER, lo que corresponde a la forma como se comercializa actualmente en Colombia.

CONCLUSIONES

Con el estudio realizado se pudo evidenciar la importancia de determinar los objetivos de crecimiento de la generación a partir de las fuentes no convencionales de energía.

En varios de los países incluidos en este documento se puede observar el crecimiento de la participación de este tipo de energías en la matriz energética del país, reduciendo así la generación de energía eléctrica a partir de fuentes fósiles.

Aunque se encontró que en varios países las centrales de FNCER pueden comercializar la energía producida en el mercado *spot*, por las diferencias con respecto a la regulación, se pudo observar que en los casos de mayor éxito de aumento de la generación con este tipo de tecnologías la energía producida se comercializa a través de contratos (regulados y no regulados) a mediano y largo plazo.

La metodología de comercialización que se utiliza actualmente en Colombia para las grandes centrales de FNCER (Yumbo y Jepírachi) hace que, por potencia instalada inferior a 20 MW, éstas no puedan participar en el MEM.

Producto de la comparación del contexto colombiano con respecto a otros países se evidencian dos diferencias importantes. La primera es que el límite de potencia instalada mínima exigida para poder comercializar en el mercado de energía mayorista es mucho mayor en Colombia que en otros países, lo que representa una primera barrera de entrada de este tipo de centrales al MEM; la segunda es lo que se observa en los planes estratégicos de cada país en relación con la integración de este tipo de energías dentro de la matriz energética; en este aspecto se encontró que las metas colombianas son menos ambiciosas que en el resto de los países, y que adicionalmente aún no están incluidas en la legislación nacional, para hacer estas directrices de obligatorio cumplimiento.

En lo referente a las perspectivas del proyecto de elaboración de un modelo del MEM en Matlab, se puede concluir que la inclusión de las nuevas centrales de generación a partir de FNCER no representa un escenario realista con respecto al contexto nacional, pues hasta el momento ninguna de las centrales existentes cumple los requisitos de entrada a este mercado, y la mayoría de los proyectos de generación con FNCER están orientados hacia la autogeneración y la cogeneración, figuras que

son reguladas por la CREG de acuerdo con las resoluciones 030 de 2018 y 024 de 2015.

REFERENCIAS

- [1] Ley 1715 de 2014. Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Eléctrico Nacional. Congreso de la República de Colombia, 13 de mayo de 2014.
- [2] Resolución 024 de 2015. Por la cual se regula la actividad de autogeneración a gran escala en el Sistema Interconectado Nacional (SIN) y se dictan otras disposiciones. Comisión de Regulación de Energía y Gas. Colombia, 13 de marzo de 2015.
- [3] Resolución 030 de 2018. Por la cual se regulan las actividades de autogeneración a pequeña escala y de generación distribuida en el Sistema Interconectado Nacional. Comisión de Regulación de Energía y Gas. Colombia, 26 de febrero de 2018.
- [4] Resolución 281 de 2017. Por la cual se define el límite máximo de potencia de la autogeneración a pequeña escala. Unidad de Planeación Minero Energética. Colombia, 5 de junio de 2017.
- [5] Documento CREG-026. Análisis de comentarios a la Resolución CREG 121 de 2017. Autogeneración a pequeña escala y generación distribuida. Comisión de Regulación de Energía y Gas. Colombia, 26 de febrero de 2018.
- [6] Subdirección de Energía Eléctrica - Grupo de Generación (2017). Informe Mensual de Variables de Generación y del Mercado Eléctrico Colombiano, diciembre de 2017. Tomado de http://www.siel.gov.co/portals/0/generacion/2017/Informe_de_variables_Dic_2017.pdf.
- [7] Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) (2015). Plan Energético Nacional Colombia: Ideario Energético 2050. Tomado de http://www.upme.gov.co/docs/pen/pen_idearioenergetico2050.pdf.
- [8] EPSA (2017). Empezó a generar energía Celsia Solar Yumbo, primera granja fotovoltaica de Colombia. Tomado de <https://www.epm.com.co/site/home/institucional/nuestras-plantas/energia/parque-eolico>.
- [9] EPM (2018). Parque eólico Jepírachi. Tomado de <https://blog.celsia.com/sala-de-prensa/empezamos-a-operar-la-granja-de-energia-solar>.
- [10] REN21 (2017). Renewables 2017 Global Status Report. Tomado de http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2017/06/17-8399_GSR_2017_Full_Report_0621_Opt.pdf
- [11] *El Observador* (2017). Uruguay es el cuarto país con mayor participación de energía eólica en la matriz eléctrica. Tomado de <https://www.elobservador.com.uy/uruguay-es-el-cuarto-pais-mayor-participacion-energia-eolica-la-matriz-electrica-n1104203>.
- [12] Administración Nacional de Usinas y Transmisiones Eléctricas (UTE) (2018). Composición Energética de Uruguay por Fuente. Tomado de <http://www.ute.com.uy/SgePublico/ConsComposicionEnergeticaXFuente.aspx>.
- [13] ADME (2002). Decreto N° 360/002. Tomado de [http://www.ursea.gub.uy/web/mnformativo2.\nsf/1E3C65383A743ED98325794B0061ADFB/\\\$file/ATT4K0RL.pdf](http://www.ursea.gub.uy/web/mnformativo2.\nsf/1E3C65383A743ED98325794B0061ADFB/\$file/ATT4K0RL.pdf).
- [14] Cruzate, J. (2017). El mercado de energías renovables no convencionales (ERNC) en Chile: un sector de éxito, incertidumbres y futuros. *Cuadernos de Energía*, pp. 5-8, 2017. G-Advisory Chile, Grupo Garrigues.
- [15] Generadoras de Chile (julio de 2017). Características de sistemas eléctricos en el territorio nacional. Tomado de <http://generadoras.cl/generacion-electrica-en-chile>.

- [16] Energía estratégica (julio de 2017). Los pasos de Chile para llegar a una matriz energética del 60 % con renovables al 2035. Tomado de <http://www.energiaestrategica.com/los-pasos-chile-llegar-una-matriz-energetica-del-60-renovables-al-2035/>.
- [17] *Revista Semana* (2017). Costa Rica cumple 300 días usando únicamente energías renovables. Tomado de <https://sostenibilidad.semmana.com/medio-ambiente/articulo/costa-rica-cumple-300-dias-usando-unicamente-energias-renovables/38998>.
- [18] Gobierno de Costa Rica (2017). Sistema eléctrico de Costa Rica se consolida como modelo de generación renovable. Tomado de <https://presidencia.go.cr/comunicados/2017/12/sistema-electrico-de-costa-rica-se-consolida-como-modelo-de-generacion-renovable/>.
- [19] Grupo ICE (2017). Costa Rica: matriz energética. Un modelo sostenible, único en el mundo. Tomado de https://www.grupoice.com/wps/wcm/connect/8823524c-7cc7-4cef-abde-a1f06e14da0e/matriz_folleto_web2.pdf?MOD=AJPERES&CVID=I8SK4gG.
- [20] Gobierno de Costa Rica (2017). País redujo generación térmica 90 % el año pasado. Tomado de <http://gobierno.cr/pais-redujo-generacion-termica-90-el-ano-pasado/>.
- [21] Ministerio de Energía y Minería (2017). Estadísticas de hidroelectricidad en Argentina. Tomado de <https://www.minem.gob.ar/www/844/26044/estadisticas-de-hidroelectricidad-en-argentina>.
- [22] Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) (2015). Síntesis del mercado eléctrico mayorista de la República Argentina. Tomado de https://www.cnea.gob.ar/es/wp-content/uploads/2018/05/SINTESIS_MEM_2018_3.pdf.
- [23] Ministério de Minas e Energia (MME) (2017). Capacidade Instalada de Geração Elétrica Brasil e Mundo (2016). Tomado de <http://www.mme.gov.br/>.

Evaluación de la evolución de cargas contaminantes aportadas por vertimientos de aguas residuales en un humedal natural

Evaluation of polluting loads by residual water discharges in a natural wetland

ALEXANDRA MARISOL JIMÉNEZ RAMOS¹ - HÉCTOR MATAMOROS RODRÍGUEZ²

1. Maestría en Ingeniería Civil, con énfasis en Recursos Hidráulicos y Medioambiente.

2. Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Recursos Hidráulicos y Medioambiente.

alexandra.jimenez@mail.escuelaing.edu.co - hector.matamoros@escuelaing.edu.co

Recibido: 17/06/2018 Aceptado: 01/08/2018

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

Resumen

De acuerdo con la bibliografía existente, en los sistemas naturales de humedal se destaca su contribución en la reducción de la contaminación del agua; sin embargo, en los programas desarrollados por las autoridades ambientales en Cundinamarca, en especial aquellos relacionados con los planes de manejo adoptados para estos ecosistemas lénticos, por ninguna circunstancia se admiten descargas de residuos líquidos tratados sobre su espejo de agua; esto sin que medie evidencia verídica y suficiente que demuestre hasta qué punto, y en qué condiciones, dicho servicio ecosistémico se puede aprovechar sosteniblemente en los humedales existentes.

En el marco de la situación expuesta, en el presente estudio se simuló el estado actual y el comportamiento asociado de un humedal natural frente a una descarga con carga orgánica ligada a un vertimiento tratado, mediante la implementación de un modelo hidráulico y de calidad de agua con el uso del *software* IBER 2D. Se empleó información secundaria existente del humedal La Florida, sector 2, con jurisdicción de los municipios de Cota y Funza, e información primaria resultado de visitas y pruebas de laboratorio complementarias, para de esta forma analizar la capacidad de autodepuración y respuesta del humedal natural frente a la perturbación que representa el vertimiento de aguas residuales.

Para el montaje del modelo hidráulico, se definieron condiciones de frontera cerradas para la mayor parte del dominio y contornos abiertos, correspondientes a los puntos de entrada y salida del caudal, los primeros asociados a la recarga de agua a través de las alcantarillas existentes, y el segundo, a la salida de las estaciones de bombeo del embalse La Isla. Se calculó para un año medio la producción de agua en la cuenca y en el dominio de estudio se implementó una malla no estructurada,

considerada como la condición apropiada para la irregularidad de la geometría del humedal La Florida en el sector 2.

Para las condiciones de contorno e iniciales, se plantearon tres escenarios definidos como escenario 1, correspondiente a la condición inicial del humedal con el aporte exclusivo de agua de escorrentía; escenario 2, tomando la condición inicial del humedal más el ingreso de agua procedente del río Bogotá mediante la apertura de la compuerta en el canal Chicú, es decir, considerando la operación del Sistema Hidráulico de Manejo Ambiental y Control de Inundaciones La Ramada (SHMACI), y escenario 3, el cual toma como base el escenario 2 más la simulación de una descarga de agua residual doméstica.

Posteriormente, se realizó el montaje del modelo de calidad para la simulación de los parámetros demanda bioquímica de oxígeno carbonosa (DBOC total), oxígeno disuelto (OD), nitrógeno amoniacal ($N-NH_3$) y en forma de nitratos ($N-NO_3$), adoptando en primera instancia constantes cinéticas propuestas en la bibliografía, que enseguida, tomando como punto de verificación los resultados de calidad de agua de una muestra a la salida del humedal, se ajustaron con pruebas de ensayo y error hasta obtener una mejor aproximación a los resultados de las muestras de calidad existentes y tomadas en el humedal.

Los resultados del estudio permiten dar cuenta de las bondades y limitaciones del *software* IBER 2D como herramienta para la modelación hidráulica y evaluación de la evolución espaciotemporal de contaminantes en humedales naturales, así como de la posibilidad para admitir descargas de efluentes tratados con tratamientos secundarios y terciarios en un humedal natural.

Palabras claves: humedal, modelación hidráulica, calidad, IBER, vertimientos, carga contaminante.

Abstract

According to current literature, natural wetland systems excel at reducing water contamination, however, the programs devised by Cundinamarca's environmental authorities, especially those related to management plans adopted for these ecosystems, strictly forbid liquid waste discharges into the water body; this is done without enough evidence that shows the level and conditions in which this ecosystemic service can be sustainably exploited in existent wetlands.

Within this situation, this study simulated a wetland's current state and its associated behavior when faced with an organic load linked to a treated discharge, through the implementation of a hydraulic and water quality model using IBER 2D. Available secondary information was used from La Florida wetland, sector 2, Cota and Funza jurisdiction, and primary information as a result of field trips and complementary lab tests, all of this with the purpose of analyzing the wetland's self-cleaning capabilities and its response to the disturbance caused by residual water discharge.

To set up the hydraulic model, closed-frontier conditions were defined for most of the land and open contours, which belonged to the flow's entry and exits points, the former were associated to water overload through current sewers, and the latter to La Isla dam's pumping stations exit points. A one-year-and-a-half water production in the basin was calculated and for the area of study a non-structured grid was implemented, which is considered to be the appropriate condition for La Florida wetland's irregular geometry in sector 2.

For initial and contour conditions, three scenarios were defined: scenario 1, which describes the wetland's initial condition exclusively fed by surface runoff; scenario 2, which sets up the wetland's initial condition plus water intake from the Bogotá river by opening Chicú canal's floodgate, that is, considering the operation of La Ramada Hydraulic System of Environmental Management and Flood Control (SHMACI – acronym in Spanish); and scenario 3, which is based on scenario 2 plus the simulation of domestic wastewater discharge.

Subsequently, the quality model was set up to simulate the parameters of carbonaceous oxygen biochemical demand (CBOD total), dissolved oxygen (DO), ammoniacal nitrogen (NH₃-N), and nitrates (NO₃-N). This was performed by adopting, firstly, kinetical constants proposed in the literature, which then, using the water quality results from the wetland's exit point as checkpoints, were adjusted with trial and error tests until obtaining a better approximation to water quality results both already available and field-sampled from the wetland.

The results of the study show the benefits and limitations of IBER 2D as a tool for hydraulic modelling and assessment of the spatial-temporal evolution of pollutants in natural wetlands, as well as the possibility to allow discharges that have undergone secondary and tertiary treatments in a natural wetland.

Keywords: wetland, hydraulic modelling, quality, IBER, discharges, pollution load.

INTRODUCCIÓN

En el caso de los sistemas naturales de humedal, se destaca la reducción de la contaminación del agua, pues la vegetación lacustre propia del humedal, junto a los procesos físicos, químicos y biológicos que se desarrollan dentro de él y a su alrededor, contribuyen a la retención de sedimentos y metales pesados, depuran y mineralizan materia orgánica, y captan nutrientes, reintroduciéndolos como elementos y compuestos asimilables en los ciclos biogeoquímicos naturales (Kadlec & Wallace, 2009; Alcaldía Mayor de Bogotá, D.C., 2011); sin embargo, en Colombia, por ejemplo, la carencia de políticas orientadas a aprovechar de manera sostenible el servicio de descontaminación de aguas brindado por estos ecosistemas, sumado a su uso indiscriminado y desmedido como sumidero de residuos líquidos, han incidido para que en la actualidad dicho servicio se encuentre excluido de las estrategias nacionales de saneamiento ambiental y de gestión integral de vertimientos.

En consecuencia, en programas desarrollados por las autoridades ambientales con injerencia en los humedales de la sabana de Bogotá, en especial aquellos relacionados con los planes de manejo adoptados para estos ecosistemas lenticos, por ninguna circunstancia admiten descargas de residuos líquidos tratados sobre su espejo de agua; esto sin que medie evidencia verídica y suficiente que demuestre hasta qué punto y en qué condiciones dicho servicio ecosistémico se puede aprovechar sosteniblemente en los humedales existentes. Medidas con ese enfoque prohibitivo contribuyen a sobrecargar los cuerpos de agua lóticos que, valga anotar, desde siempre se han concebido como receptores por defecto de los vertimientos de aguas residuales generados por la sociedad.

Dicho lo anterior, en el presente estudio se simuló el estado actual y el comportamiento asociado de un humedal natural frente a una descarga con carga orgánica ligada a un vertimiento tratado, con la finalidad de aportar al proceso de aprovechamiento sostenible de los servicios ambientales de depuración de aguas que brindan estos ecosistemas acuáticos; éste es un servicio ambiental potencial no explorado en la región y que las autoridades ambientales han estudiado poco, debido a que desafortunadamente nunca se utilizó de manera racional y mesurada.

En atención a lo expuesto, con el presente estudio se evaluó la evolución de la calidad del agua en un hume-

dal natural, mediante la implementación de un modelo hidráulico y de calidad de agua a través del *software* IBER 2D¹, con el fin de analizar la capacidad de autodepuración y respuesta de estos cuerpos de agua frente a la perturbación que representa el vertimiento de aguas residuales. Para ello, como caso de estudio, se trabajó con el humedal La Florida, sector 2, ubicado en los municipios de Cota y Funza, del departamento de Cundinamarca.

La información empleada se relaciona con información secundaria existente del área, suministrada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam), en lo relacionado con datos monitoreados por la estación denominada Apto El Dorado; la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, relacionada con cartografía base y temática; modelo digital de elevación y ortomosaico del humedal La Florida; inventario de vertimientos; monitoreos de calidad de agua en el humedal La Florida, y en puntos de descarga y pruebas de laboratorio complementarias realizadas con apoyo del Laboratorio Ambiental de la CAR, e información primaria resultado de visitas.

Modelo IBER 2D

De acuerdo con los desarrolladores de IBER (Bladé et al., 2014), el módulo hidrodinámico resuelve las ecuaciones bidimensionales de St. Venant, incorporando los efectos de la turbulencia y rozamiento superficial por viento.

Los esquemas numéricos utilizados en este *software* se resuelven mediante el método de volúmenes finitos para mallas bidimensionales no estructuradas. Los esquemas numéricos utilizados en IBER son especialmente apropiados para la modelización de cambios de régimen y de frentes seco-mojado (frentes de inundación). La discretización del dominio espacial se realiza con volúmenes finitos en mallas no estructuradas, admitiéndose las mixtas, formadas por elementos triangulares y cuadrangulares (Bladé et al., 2014).

1. IBER 2D es un modelo matemático bidimensional para la simulación del flujo en ríos y estuarios desarrollado a partir de la colaboración del Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente (Geama) (Universidade da Coruña), del Grupo de Ingeniería Matemática (Universidade de Santiago de Compostela), del Instituto Flumen (Universitat Politècnica de Catalunya y Centre Internacional de Mètodes Numèrics en Enginyeria), y promovido por el Centro de Estudios Hidrográficos del Cedex (Bladé et al., 2014).

Las ecuaciones y correspondientes modelos de cálculo se describen en el *Manual de referencia hidráulico* y el artículo de la herramienta de simulación numérica del flujo en ríos², así como en el *Manual de referencia del módulo de calidad de aguas*³.

Montaje del modelo hidráulico

Para el montaje del modelo hidráulico se definieron condiciones de frontera cerrados para la mayor parte del dominio y contornos abiertos, correspondientes a los puntos de entrada y salida del caudal, los primeros asociados a la recarga de agua a través de las alcantarillas existentes y el segundo, a la salida de las estaciones de bombeo del embalse La Isla. La producción de agua en la cuenca se estimó a partir de información disponible en las estaciones del aeropuerto El Dorado y La Ramada, con la aplicación de los modelos de Thomas (1981), modelo *abcd* y modelo T (CAR & EPAM S.A. ESP, 2016) (Thorntwaite & Mather, 1955), adoptando los resultados del modelo *abcd*, el cual representa los datos más conservadores para este tipo de cuenca con un comportamiento bimodal y una tendencia a presentar déficit de agua en los meses de enero-febrero y julio-agosto.

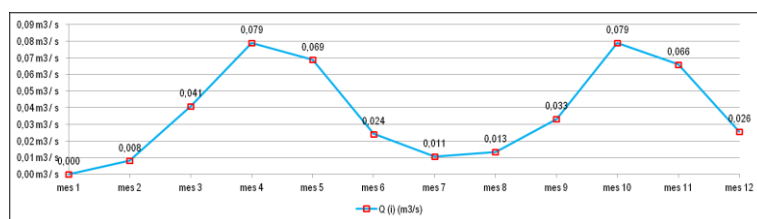


Figura 1. Producción de agua en la cuenca en estudio, aplicando el modelo de Thomas (1981), expresada en tasa volumétrica de flujo.

Fuente: Elaboración propia.

- Bladé, Cea, Corestein, Escolano, Puertas, Vázquez-Cendón, Dolz & Coll (2014). "IBER: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos". *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 30 (1), 1-10.
- Cea, Bermúdez, Puertas, Conde, Bladé, Corestein & Escolano (2016). IberWQ. Herramienta numérica para la simulación 2D de la calidad de aguas en ríos y estuarios. Módulo de calidad de aguas. Retrieved February 11, 2017, from https://www.udc.es/citeec/images/proyectos/hidraulica/proyectos_hidraulica11.pdf.

El siguiente paso para el montaje del modelo en IBER 2D se relacionó con la definición de la geometría y rugosidad de las superficies. Para ello, se realizó la digitalización de las coberturas en el humedal La Florida, sector 2, con el uso de ArcMap, y se empleó como base el ortomosaico obtenido en el estudio de la CAR & EPAM S.A. ESP (2016). Las categorías de coberturas identificadas en el humedal pertenecen a espejo de agua sin vegetación flotante ni emergente (tramos rectos y sinuosos), estructura hidráulica u obstrucción que ocupa más del 50 % del área de la sección transversal, pradera o pasto corto, vegetación emergente (densa - alta y arraigadas - medio), vegetación flotante y arbustos.

En total, se generaron 70 superficies en formato Shapefile, las cuales se importaron en IBER, procediendo a asignar de acuerdo con el tipo de cobertura el coeficiente de Manning n , según los valores indicados en la bibliografía y teniendo en cuenta los siguientes factores: a) La vegetación puede considerarse como una clase de rugosidad superficial, pero también reduce de manera notable la capacidad del canal, retarda el flujo y controla la distribución del flujo (Chow, 1959; Paudel, Grace, Galloway, Zamorano & Jawitz, 2013) (Galloway, Zamorano & Jawitz, 2013); b) La caracterización de la variabilidad de los regímenes hidráulicos es importante para determinar el desempeño del tratamiento del humedal (Paudel et al., 2013); c) Se toma en cuenta que, al no hacerse un mantenimiento o limpieza en un determinado número de años, el crecimiento de vegetación puede considerarse abundante, de tal modo que se encuentren valores de $n > 0,10$ (Chow, 1959); d) Las irregularidades en el perímetro mojado, variaciones en la sección transversal, tamaño y forma de ésta a lo largo de la ciénaga, introducen rugosidad adicional a la causada por la rugosidad superficial y otros factores. En este caso, el incremento en n puede ser 0,005 o mayor (Chow, 1959); e) Se asigna el coeficiente de rugosidad de acuerdo con la característica de mayor predominancia.

Escenarios planteados

En el modelo se aplicó el comportamiento hidrológico del humedal en condiciones de un año medio. Sin embargo, con el fin de considerar la operación del Sistema Hidráulico de Manejo Ambiental y Control de Inundaciones La Ramada, es decir, la regulación de los niveles de cuerpo lagunar a través de la alimentación

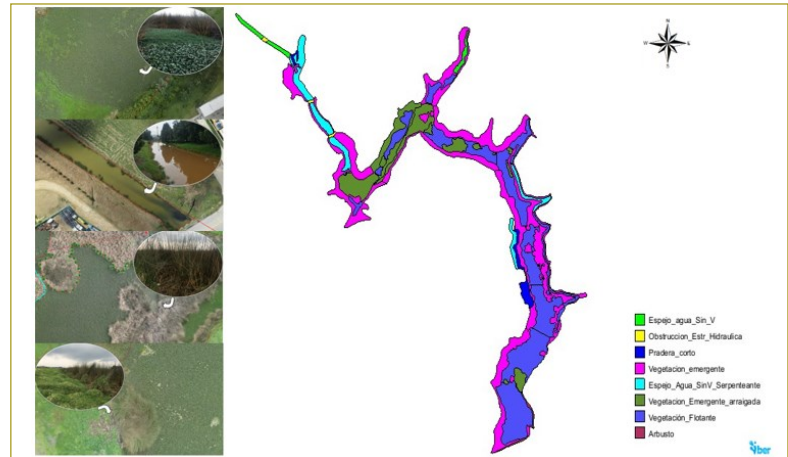


Figura 2. Asignación de los coeficientes de rugosidad según el tipo de cobertura en el humedal La Florida, sector 2, en IBER.

Fuente: Elaboración propia.

de agua desde el canal Chicú, conocido anteriormente como La Florida, así como de la maniobra sincronizada de las estaciones de bombeo del embalse La Isla, se plantearon tres escenarios definidos así: escenario 1, correspondiente a la condición inicial del humedal con el aporte exclusivo de agua de escorrentía; escenario 2, la condición inicial del humedal más el ingreso de agua procedente del río Bogotá mediante la apertura de la compuerta en el canal Chicú, y escenario 3, el cual toma como base el escenario 2 más la simulación de una descarga de agua residual doméstica.

Montaje del escenario 1

El caudal medio mensual en m^3/s obtenido en el balance hídrico del mes de agosto, época en la que se hicieron los muestreos de calidad, se repartió en el cuerpo lagunar en puntos claves de acuerdo con la distribución de las alcantarillas existentes, definiendo cinco (1-5) condiciones de entrada en régimen crítico/subcrítico.

Se adoptó una condición de salida con régimen supercrítico (costado norte), con el objeto de permitir el flujo de posibles excesos de caudal en el humedal. En cuanto a la condición inicial, según la cota promedio del agua en el humedal La Florida, sector 2, referenciada en el estudio de la CAR & EPAM (2016), en un valor de 2542,27 (mes de agosto) m.s.n.m., y la curva de capacidad de almacenamiento del humedal La Florida, referida en el mismo estudio, se asignó al dominio conformado por 70 superficies un calado de 0,98 m.

Tabla 1

Coeficientes de Manning teóricos afectados por la existencia de la vegetación en un cuerpo de agua y seleccionados para el modelo

Tipo de vegetación	Manning n (s/m ^{1/2})	Descripción	Coefficiente seleccionado
Emergente ⁴	0,67 ^A	Cattail, mixed cattail and mixed graminoids. Valor calibrado en el modelo en el modelo HD en áreas densas.	0,67
	0,05-0,10 ^E	Larga. Hierba de césped; arbustos, o cattails densos; arboles entremezclados.	--
	0,10-0,20 ^E	Extreme. Sauce denso espesa, mezquite y pino salado o unos árboles caídos.	--
	0,05 ^G	Cañas emergentes, juncos, pabellón y grandes hierbas [partes sobre el terreno].	--
	0,3 ^G	Plantas arraigadas emergentes (valor medio).	0,3
	0,15 ^B	Tramos con muchas malezas, pozos profundos o canales de crecientes con muchos árboles.	--
Flotante ⁵	0,12 ^A	Las plantas flotantes como algas.	0,12
	0,05 ^D		--
	0,1 ^G	Las plantas flotantes como algas. Plantas de raíces flotantes arraigadas.	--
	0,08 ^B	Tramos lentos, con malezas y pozos profundos.	--
Arbusto ⁶	1,00 ^A		--
	0,885-0,902 ^F		--
	0,08 ^B	Pocos matorrales y árboles en verano.	--
	0,16 ^B	Matorrales medios a densos en verano.	0,16
Espejo de agua sin vegetación	0,035 ^C		--
	0,033 ^B	Corrientes en planicies, limpio, recto, sin montículos ni pozos profundos.	0,033
	0,045 ^B	Corrientes en planicies, limpio, serpenteante, pozos y bancos de arena.	0,045
Pradera	0,021 ^G 0,03 ^H 0,035 ^{B y C}	Césped. Hierba corta (normal). Pasto corto (valor máximo considerando un mantenimiento pobre)	0,035
	0,024 ^A		--
	0,02-0,03 ^E	Apreciable. Las obstrucciones ocupan de 15 a 50 % del área de la sección transversal.	--
Estructura hidráulica	0,04-0,05 ^E	Severo. Las obstrucciones ocupan más del 50 % del área de la sección transversal.	0,05

^A. (Min & Wise, 2010), ^B. (Chow, 1959), ^C. (Min & Wise, 2009), ^D. (Medeiros, Hagen, & Weishampel, 2012), ^E. (Arcement & Schneider, 1989), ^F. (Galema, 2009), ^G. (Fisher & Dawson, 2003), ^H. Modified from Chow (1959) and Thomsen and Hjalmarson (1991), citado por Phillips & Tadayon, 2007).

Fuente: Elaboración propia.

- Las plantas emergentes están arraigadas en el fondo del cuerpo de agua, pero sus hojas y tallos se extienden fuera del agua. Crecen en los humedales y a lo largo de la orilla, donde la profundidad del agua es 1,2 o 1,5 m, por lo general.
- Una planta de agua que flota en la superficie de un cuerpo de agua, con sus raíces arrastrándose en el agua.
- Planta leñosa, más pequeña que un árbol, que tiene varios tallos principales que surgen en el suelo o cerca de éste.

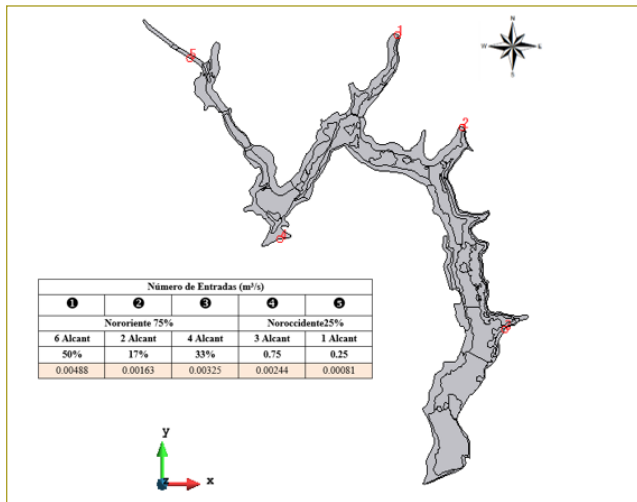


Figura 3. Condiciones de contorno definidas en el escenario 1. Fuente: Elaboración propia.

Montaje del escenario 2

Considera la operación del Sistema Hidráulico de Manejo Ambiental y Control de Inundaciones La Ramada. Para ello, se mantienen las condiciones de entrada procedentes de escorrentía del mes de agosto establecidas para el escenario 1 y se contempla la apertura de la compuerta, se procede a asignar de acuerdo con el cálculo realizado los siguientes caudales $Q_1 = 2,5 \text{ m}^3/\text{s}$ (abierta 100 %) y $Q_2 = 1,87 \text{ m}^3/\text{s}$ (abierta 75 %), en régimen crítico como ingreso de agua desde el río Bogotá hacia el humedal La Florida, sector 2.

En cuanto a la condición de salida, se contempló para este escenario con fundamento en el registro del año 2016 (contrato CAR 1185/2014), la operación de dos bombas de tornillo de $0,625 \text{ m}^3/\text{s}$, es decir, un caudal total de $1,25 \text{ m}^3/\text{s}$ desde el extremo occidental de la ciénaga La Florida, sector 2, para la alimentación del embalse La Isla. En este sentido, se procedió a asignar en condición de flujo subcrítico una curva de gasto en el canal a la salida del humedal, a partir de la verificación de la cota máxima del agua en el extremo occidental ($C_{\text{máx.}} = 2542,3 \text{ m.s.n.m.}$ y $C_{\text{mín.}} = 2540,6 \text{ m.s.n.m.}$).

La condición inicial asignada al dominio conformado por 70 superficies fue un calado de 2,9 m, que de acuerdo con el perfil de profundidad permite alcanzar el nivel para la alimentación del embalse La Isla, a partir de la operación de las dos bombas de tornillo.

Montaje del escenario 3

Este escenario adopta la condición hidrodinámica del escenario 2 e incorpora una descarga de agua residual doméstica (ARD) dentro del dominio en las coordenadas E: 991935, N: 1016250, en la abscisa 2100 m, con características de un efluente con un tratamiento terciario⁷ de una actividad residencial. La descarga de agua residual da cumplimiento a la norma de vertimiento fijada a escala nacional en el artículo 8 de la Resolución 631 de 2015, promulgada por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS).

Los valores que se ingresan al modelo del efluente tratado de ARD corresponden a: DBOC = $0,06444 \text{ kg/m}^3$, nitratos $\text{N-NO}_3 = 0,000513 \text{ kg/m}^3$, nitrógeno amoniacal $\text{N-NH}_3 = 0,089 \text{ kg/m}^3$, temperatura = $18 \text{ }^\circ\text{C}$ y caudal = $1,156 \text{ m}^3/\text{s}$.

Montaje al modelo de calidad

Las constantes que intervienen en el módulo de calidad de IBER para las sustancias y variables se adoptaron inicialmente de la bibliografía, tomando como referencia la calidad de agua y estudios existentes sobre el río Bogotá en el tramo ubicado entre las partes alta y media de esta cuenca, dado que es la principal fuente hídrica de abastecimiento del humedal La Florida, sector 2, a través de la captación de agua en la estación de bombeo El Chicú, del Sistema Hidráulico de Manejo Ambiental y Control de Inundaciones, operado por la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR).

Demanda bioquímica de oxígeno carbonosa (DBOC)

La revisión bibliográfica hecha para determinar la constante de degradación de materia orgánica carbonosa tomó como referencia los valores citados por Bowie, Mills, Porcella, Campbell & Chamberlin (1985); Consorcio Cuencas & CAR (2006), UNAL & EAAB (2008) y Díaz (2004). A partir de dicha información, la relación de la DBOC ejercida en un tiempo t (DBOC $_t$) con la DBOC se calculó con una constante de degradación de materia carbonosa igual a $k = 0,15 \text{ d}^{-5}$ (Estudio del

7. Sistema de tratamiento de agua residual compuesto por unidades de homogeneización, reactor biológico, sedimentación, filtración y desinfección.

río Bogotá a la altura de Puente Vargas, realizado por el Consorcio Cuencas & CAR, 2006). En esta forma, el valor obtenido a través del uso de la expresión y variables ilustradas a continuación se aplicó en cada uno de los resultados de DBO₅ existentes en el humedal La Florida.

Fórmula:

$$DBOC_5 = DBOC_0 (1 - e^{-k \cdot 5})$$

$$\frac{DBOC_0}{DBOC_5} = \frac{1}{(1 - e^{-k \cdot 5})} \quad \frac{DBOC_0}{DBOC_5} = 1,90$$

Donde:

DBOC₅ = demanda orgánica carbonosa ejercida en 5 días

DBOC₀ = demanda orgánica carbonosa total o última.

K = constante de degradación de materia orgánica carbonosa (k = 0,15 d⁻¹).

A continuación, se presentan los resultados de cálculo de la demanda bioquímica de oxígeno carbonosa total (DBOC₀), correspondientes a los datos que finalmente se ingresan en el modelo IBER.

Tabla 2

Cálculo de la demanda bioquímica de oxígeno carbonosa total (DBOC₀)

Datos puntos	Coordenadas		DBO ₅ mg/L	DBOC ₀ kg/m ³
	X (Este)	Y (Norte)		
1	992039	1015217	7,68	0,0146
2	992047	1016127	<5,0	0,0095
3	992020	1016517	77	0,1459
4	990689	1016886	7,23	0,0137

Fuente: Muestréos CAR & EPAM (2016).

Posteriormente, en cada uno de los contornos de entrada definidos en el componente hidrodinámico se asignaron las concentraciones de la demanda bioquímica de oxígeno carbonosa total indicadas en la tabla 2, adoptando los datos de los puntos 2 y 3 como condiciones de frontera. El punto 4 no se ingresó al modelo y se mantuvo como punto de control. Así mismo, se impuso la condición inicial de la DBOC registrada en el punto 1, de acuerdo con los resultados obtenidos en la jornada de muestreo desarrollada el 4 de agosto de 2016 por parte de EPAM, en un valor de 0,0146 kg/m³.

Descarga

El vertimiento procedente de la zona de Intexzona, ubicado en las coordenadas E: 990666, N: 1016891, tiene valores entre 0,000805 y 0,00064 m³/s, según los caudales aforados. Para este caso se adopta un valor promedio de 0,00072 m³/s. La concentración de la demanda bioquímica de oxígeno carbonosa total de este vertimiento corresponde a DBOC₀ = 0,0038 kg/m³.

Además de los datos indicados, en el modelo de calidad de IBER se ingresaron los siguientes datos de cálculo: salinidad nula, temperatura promedio del agua 17,7 °C, tasa de degradación K_{dboc} = 0,17 1/d y velocidad de caída 0,04 m/d.

Demanda de oxígeno del sedimento (SOD)

De acuerdo con los datos referidos en la bibliografía (Bowie et al., 1985, y UNAL & EAAB, 2008), se adoptó un valor de K_{dos} = 0,0012 kg/m²d.

Oxígeno disuelto (OD)

En cada uno de los contornos de entrada definidos en el componente hidrodinámico, se asignaron las concentraciones del oxígeno disuelto en kg/m³. Se adoptan los datos 2 y 3 como condiciones de frontera. El punto 4 no se ingresó al modelo y se mantuvo como punto de control.

Tabla 3

Concentraciones de oxígeno disuelto ingresados al modelo

Datos puntos	Coordenadas		OD mg/L	OD kg/m ³
	X (Este)	Y (Norte)		
1	992039	1015217	0,19	CondInicial
2	992047	1016127	0,71	0,0007
3	992020	1016517	6,85	0,0069
4	990689	1016886	1,18	0,0012

Fuente: Elaboración propia.

Se establece como condición inicial en el humedal La Florida, sector 2, un valor equivalente al oxígeno disuelto de saturación del punto de muestreo 1, de acuerdo con los resultados obtenidos en la jornada de muestreo desarrollada el 4 de agosto de 2016 por parte de EPAM. El cálculo se realizó mediante el uso de

las ecuaciones de APHA (1992) y Zison et al. (1978), indicadas a continuación:

$$\ln[OD_{sat}(T,S,0)] = -139,34411 + \frac{1,575701 \cdot 10^5}{T} - \frac{6,642308 \cdot 10^7}{T^2} + \frac{1,243800 \cdot 10^{10}}{T^3} - \frac{8,621949 \cdot 10^{11}}{T^4} - S \cdot \left(1,764 \cdot 10^{-2} - \frac{10,754}{T} + \frac{2140,7}{T^2} \right)$$

Donde:

$OD_{sat}(T,S,0)$ = concentración de saturación de oxígeno disuelto en mg/l a la temperatura T en kelvin, con una salinidad del agua S en kg/m³ y al nivel del mar.

El efecto de la altitud sobre el nivel del mar se tiene en cuenta con la siguiente ecuación:

$$OD_{sat}(T,S,z) = OD_{sat}(T,S,0) \cdot (1 - 0,0001148Z)$$

Siendo Z la altitud sobre el nivel del mar en metros.

Tabla 4
Cálculo de oxígeno disuelto de saturación OD_{sat}

Condición Inicial - Concentración de Saturación del Oxígeno Disuelto OD_{sat}		
Temperatura	16.3 °C	289.45 Kelvin
$OD_{sat}(T,S,0)$	9.8 mg/L	
Elevación	2542.8 m.s.n.m	
$OD_{sat}(T,S,Z)$	6.94 mg/L	
	0.0069 Kg/m ³	

Fuente: Elaboración propia.

Nitrógeno $N-NO_3$ y $N-NH_3$

En cada uno de los contornos de entrada definidos en el componente hidrodinámico se asignaron las concentraciones de nitrógeno amoniacal ($N-NH_3$) y en forma de nitratos ($N-NO_3$) expresados en kg/m³. Se adop-

taron los datos de los puntos 2 y 3 como condiciones de frontera. El punto 4 no se ingresó al modelo y se mantuvo como punto de control, tal como se indicó.

Como condición inicial en el humedal La Florida, sector 2, se establecen las concentraciones de nitrógeno amoniacal ($N-NH_3$) y en forma de nitratos ($N-NO_3$) del punto de muestreo 1, de acuerdo con los resultados obtenidos en la jornada de muestreo desarrollada por EPAM el 4 de agosto de 2016.

Los valores de las constantes cinéticas adoptadas con base en la bibliografía revisada (Bowie et al., 1985; Consorcio Cuencas & CAR, 2006, y Díaz, 2004), corresponden a tasa de nitrificación K_{nit} 0,1 d⁻¹ y tasa de desnitrificación K_{denit} 0,27 d⁻¹.

Respecto al número de Schmidt, no se cambia el valor por defecto definido en IBER debido a que no se dispone de datos precisos para la comprobación del modelo. En cuanto a la tasa de amonificación, no se define en el modelo dado que se considera la concentración de nitrógeno orgánico como cero en toda la ciénaga. Lo mismo ocurre con la velocidad de sedimentación del nitrógeno orgánico.

Generación de mallado: IBER 2D

En el dominio de estudio se decide implementar una malla no estructurada que puede estar conformada por elementos de tres a cuatro lados, debido a que este tipo de malla se adapta a cualquier tipo de geometría, considerada como la condición apropiada para la irregularidad de la geometría del humedal La Florida, en el sector 2. En la definición del mallado se efectuaron pruebas con mallas compuestas por celdas con tamaños de 2 m, 5 m, 10 m y 25 m, a partir de los cuales se corrió el modelo hidrodinámico, y a través de cortes transversales se

Tabla 5
Concentraciones de nitrógeno $N-NH_3$ y $N-NO_3$ ingresados al modelo

Datos puntos	Coordenadas		Nitratos $N-NO_3$	Nitrógeno amoniacal $N-NH_3$
	X (Este)	Y (Norte)	kg/m ³	Kg/m ³
1	992039	1015217	CondInicial 0,00907	CondInicial 0,00376
2	992047	1016127	0,00953	0,000106
3	992020	1016517	0,0129	0,0215
4	990689	1016886	0,00311	0,00584

Fuente. Elaboración propia.

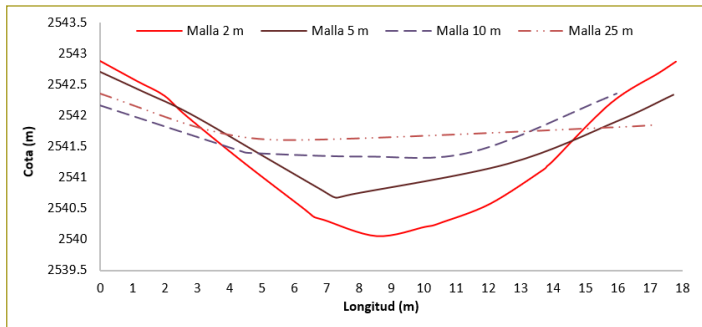


Figura 4. Corte transversal del canal de salida del humedal La Florida, sector 2, con diferente mado.

Fuente: Elaboración propia.

determinó el nivel de generalización al que se llega con el incremento de los tamaños del mado (figura 4).

Por lo anterior, tomando como referencia la profundidad promedio del agua en el humedal y la separación entre secciones de las batimetrías realizadas en el cuerpo lagunar por la CAR y EPAM S.A. ESP (2016), se optó por trabajar con dos tamaños de malla con elementos de lado de 5 m para la superficie del humedal cubierto por vegetación flotante y emergente, así como de 2 m para los elementos que cubren el espejo de agua en el canal de salida en el humedal La Florida, sector 2.

Posteriormente, la elevación de la malla se asignó con el archivo del modelo digital de elevación generado por la CAR y EPAM S.A. ESP (2016), el cual se transformó en un archivo en formato ASCII empleando el *software* Arcmap, específicamente la herramienta Raster to ASCII

Debido a la topografía del terreno y con el objeto de permitir el tránsito del caudal en dos puntos en los cuales en el modelo digital de elevación sobresalen dos diques, se ingresaron sobre la malla dos alcantarillas en cada uno de los pasos artesanales existentes en el humedal e identificados en las coordenadas E: 990907,

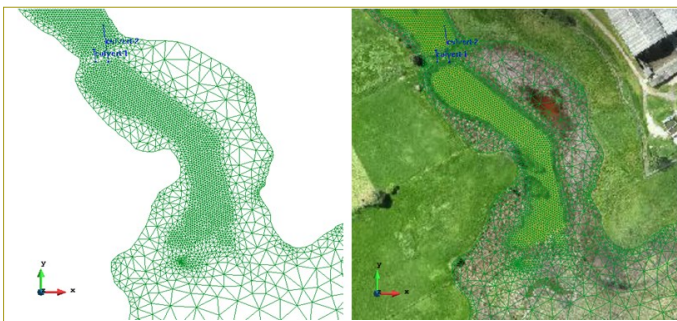


Figura 5. Malla de cálculo no estructurada.

Fuente: Elaboración propia.

N: 1016606 y E: 991013, N: 1016452. Cada alcantarilla tiene un diámetro de 1,5 m, para transportar con un tirante de 0,75 m un caudal de 1,1 m³/s en régimen subcrítico y a tubo lleno un caudal máximo de 2,2 m³/s.

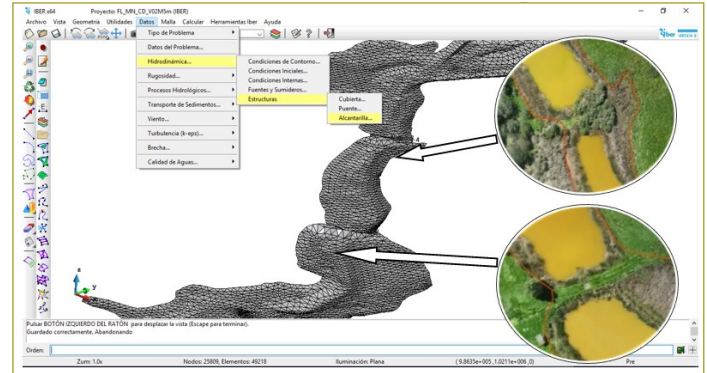


Figura 6. Alcantarillas introducidas al modelo en los pasos artesanales existentes.

Fuente: Elaboración propia.

Selección de las constantes cinéticas

Con la finalidad de evaluar el potencial del programa IBER para la construcción de un modelo hidráulico y de calidad del agua en el humedal La Florida, en el presente trabajo académico se adoptaron los resultados de los muestreos llevados a cabo sobre el humedal La Florida, sector 2, del año 2016 por la CAR & EPAM, acordes con el comportamiento de las sustancias de calidad de agua en el tiempo y en el espacio. Con esta hipótesis y con base en constantes cinéticas propuestas a partir de la bibliografía especializada, se procedió a realizar la comprobación de las variables tomando como punto de comparación los resultados de calidad de agua de la muestra 4, ubicada a la salida del humedal en las coordenadas E: 990689, N: 1016886, ubicado en el canal de succión de la estación de bombeo La Isla.

Inicialmente se hicieron varias pruebas para determinar el comportamiento de las sustancias y la capacidad del modelo para simular las condiciones de calidad de agua en el humedal La Florida, sector 2, haciendo uso de un equipo con un procesador Intel Core i7-2670QM CPU de 2,2 GHz, con sistema operativo de 64 bits. Para cada prueba, con una malla conformada por 49.192 elementos y una simulación de 3600 segundos, se requirió un tiempo de cálculo de aproximadamente 7 horas.

Las simulaciones A a G (tabla 6) conservan el modelo hidrodinámico definido en este estudio para el

escenario 1, y en cuanto al módulo de calidad incluyen la variación de las constantes cinéticas, considerando los valores mínimos y máximos recomendados en el *Manual de referencia* de IBER (2015), los valores adoptados de la bibliografía y otros valores introducidos manualmente a prueba y error que hay que cambiar para obtener un mejor ajuste de la dinámica del modelo (Mancera, Peña, Giraldo & Santos, 2003).

Como se ha descrito en el presente artículo tres puntos o resultados de los muestreos se emplearon para la alimentación del modelo, y el último, ubicado en la salida noroccidental del humedal La Florida, sector 2, se empleó para verificación. En consecuencia, las gráficas que a continuación se presentan indican el valor observado en campo del punto 4 (línea azul discontinua), con respecto a los valores simulados en cada una de las pruebas (figura 7).

De acuerdo con lo expresado, las constantes cinéticas que se adoptan para el análisis del comportamiento de la calidad del agua en el humedal La Florida, sector 2, corresponden a las utilizadas en la prueba 4 o G, es decir: $K_{nit} = 0,01$ 1/día, $K_{denit} = 0,001$ 1/día, $K_{dboc} = 1,95$ 1/día, $V_{sDBOC} = 0,04$ m/día y $K_{dos} = 0,008$ kg/m²/día, dejando en claro que sólo se logró un buen ajuste para la concentración de la demanda bioquímica de oxígeno carbonosa (DBOC total).

Tras las pruebas realizadas en este estudio se establece que para alcanzar un estado estacionario⁸ en las variables demanda bioquímica de oxígeno carbonosa (DBOC total) y oxígeno disuelto (OD), nitrógeno amoniacal (N-NH₃) y nitratos (N-NO₃), las simulaciones deben correrse mínimo hasta los 27.000 segundos, lo que exige un tiempo computacional de alrededor de 48 horas (1,9 días), para el caso del escenario 1, y de 72 horas (3 días) para los escenarios 2 y 3.

Para el presente caso no se dispone de información suficiente que admita realizar la verificación del modelo, es decir, no se cuenta con otros datos en un escenario diferente con los cuales sea posible evaluar el comportamiento del modelo aplicando las constantes cinéticas resultantes de la calibración. Esta situación confirma la

- Un sistema o proceso se encuentra en estado estacionario si las variables que definen su comportamiento, respecto al tiempo, permanecen invariantes. Un sistema puede ser estático, esto es, que significa que se mantiene constante en el tiempo, pero también puede presentar dos tipos de conductas; generalmente, cuando empieza su funcionamiento, pasa por un estado dinámico y luego alcanza un estado estacionario o de régimen.

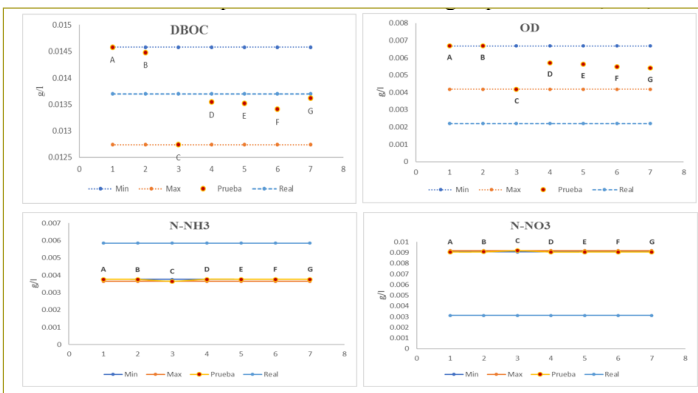


Figura 7. Análisis de las pruebas de calidad de agua para DBOC, OD, N-NH₃ y N-NO₃.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6
Resultados de las simulaciones en el humedal La Florida, sector 2

Variable	Mínimo	Valor adoptado	Máximo	Prueba	Prueba	Prueba	Prueba	Valores reales (g/l)
	A (g/l)	B (g/l)	C (g/l)	1 - D	2 - E	3 - F	4 - G	
DBOC	0,01458	0,01448	0,01274	0,01355	0,01352	0,01341	0,01362	0,0137
% error	6,0 %	5,4 %	7,5 %	1,1 %	1,3 %	2,2 %	0,6 %	--
OD	0,00669	0,00669	0,00418	0,00572	0,00563	0,00549	0,00541	0,0022
% error	67,1 %	67,1 %	47,4 %	61,5 %	61,0 %	59,9 %	59,3 %	--
N-NH₃	0,00376	0,00375	0,00364	0,00376	0,00376	0,00376	0,00376	0,00584
% error	55,4 %	55,8 %	60,3 %	55,4 %	55,4 %	55,4 %	55,4 %	--
N-NO₃	0,00907	0,00908	0,00918	0,00907	0,00907	0,00907	0,00907	0,00311
% error	65,7 %	65,7 %	66,1 %	65,7 %	65,7 %	65,7 %	65,7 %	--

Fuente: Elaboración propia.

necesidad de establecer puntos de control y monitoreo continuos en el humedal La Florida, sector 2, con el fin de validar el modelo y obtener las constantes cinéticas que permitan que las simulaciones coincidan con los muestreos de campo.

RESULTADOS

Para el análisis de resultados se hizo un corte longitudinal sobre el eje del humedal La Florida, sector 2, que representa el trayecto principal del agua en una longitud total de 3290 m. En este sentido, las salidas producidas por el modelo hidráulico y de calidad en el humedal La Florida, para los diferentes escenarios, con el uso de los módulos básico de modelación hidráulica y avanzado de calidad del agua de IBER 2D, se describen a continuación.

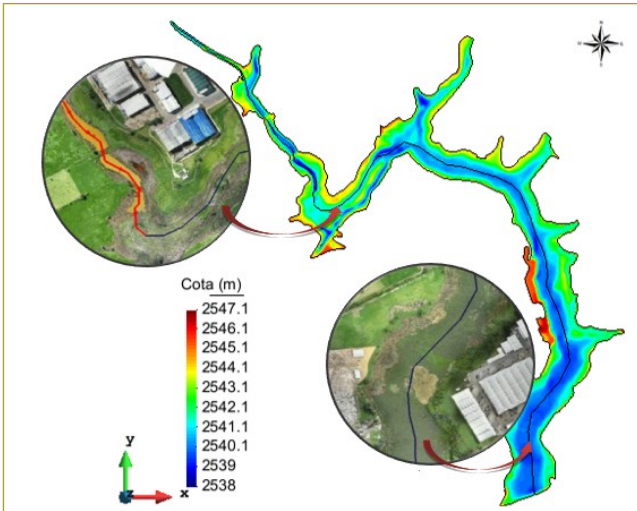


Figura 8. Corte longitudinal sobre el eje del humedal La Florida, sector 2 (longitud total 3290 m).

Fuente: Elaboración propia.

Escenario 1. Condición inicial

El perfil de profundidades del corte realizado se presenta en la figura siguiente (figura 9), con profundidades que no superan los 2 m en los primeros 400 m, donde se distinguen una sección del humedal sin vegetación y un ancho superficial de máximo 20 m; continúa el humedal con un trayecto importante (500 m) de un espejo de agua sin vegetación, con una superficie más amplia y profundidades más variables que van desde los 0,5 m hasta los 3,8 m. Entre los 900 y 3290 m de longitud, el humedal se caracteriza por la presencia de

vegetación emergente y flotante en superficies amplias de hasta 150 m y profundidades más homogéneas, entre 2 y 2,5 m, aproximadamente.

Con respecto a la velocidad del flujo, en un tramo ubicado entre los 300 y 400 m se evidencia una velocidad máxima de 0,38 m/s; en el resto del humedal las velocidades oscilan entre 0,9 m/s y $6,32 \cdot 10^{-5}$ m/s, tendiendo a aguas estancadas. El pico de velocidad obedece a una reducción ostensible del ancho superficial del humedal, en el que se llega aproximadamente a 3 m en una garganta creada entre el lecho de agua y la vegetación del cuerpo lagunar.

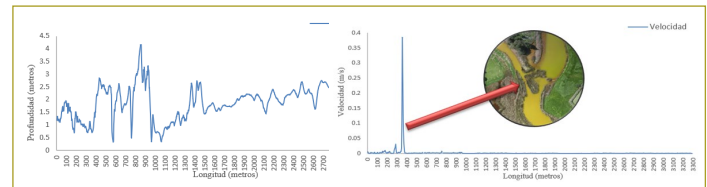


Figura 9. Perfil de profundidad (izq.) y velocidad (der.) en el escenario 1, corte longitudinal en el humedal La Florida, sector 2 (instante 30.000 s).

Fuente: Elaboración propia.

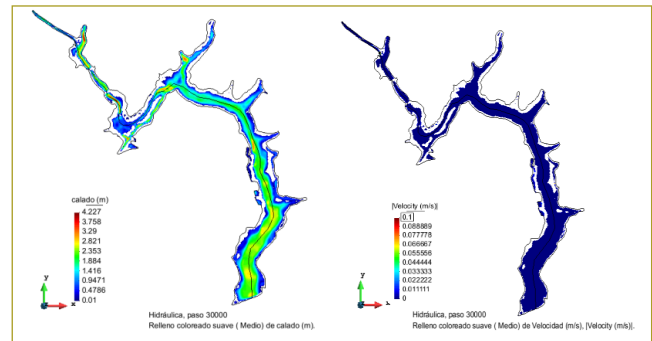


Figura 10. Distribución espacial de profundidades y velocidades en el escenario 1, humedal La Florida, sector 2 (instante 30.000 s).

Fuente: Elaboración propia.

DBOC total y OD

Podría relacionarse cómo la DBOC total fluctúa a lo largo del humedal a medida que la vegetación cambia. Sin embargo, los coeficientes de rugosidad asignados en las 70 superficies del dominio para las coberturas en el humedal no demuestran una influencia significativa en la evolución longitudinal de las sustancias; por lo tanto, dichas variaciones se asocian a la irregularidad de la batimetría del humedal y a estructuras hidráulicas existentes en el tránsito del caudal.

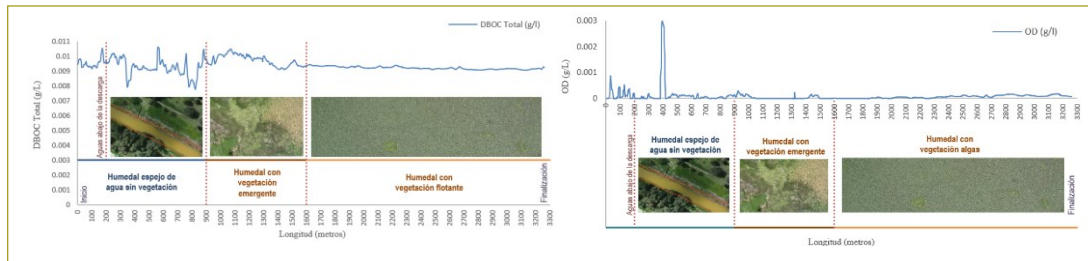


Figura 11. Evolución de la DBOC total y OD en el escenario 1, corte longitudinal del humedal La Florida, sector 2 (instante 30.000 s).

Fuente: Elaboración propia.

La concentración de la DBO_5 en el humedal La Florida, sector 2, en toda su extensión para el escenario en estudio, es inferior al objetivo de calidad mínimo (20 mg/L) asignado a la calidad de agua de humedales ubicados dentro de la cuenca del río Bogotá, clasificado como clase III con un horizonte proyectado al año 2020, según el Acuerdo CAR 43 de 2006. En tal sentido, en las condiciones actuales, el humedal La Florida, sector 2, no excede la cantidad de materia orgánica permisible en cuerpos de agua de esta naturaleza en jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca.

En cuanto al oxígeno disuelto, los resultados obtenidos en la modelación podrían indicar que tanto la cantidad de materia orgánica presente en el humedal como los procesos de degradación que consumen el oxígeno disponible reducen rápidamente a cero la concentración del oxígeno disuelto en el humedal (Baedecker, 1980). Sin embargo, debido a la diferencia del 59,3 % entre las concentraciones reales y simuladas (sobrestimación), los resultados no se consideran confiables y demuestran la necesidad de correr el modelo con muestreos de calidad tomados en condiciones diferentes de aguas quietas o estancadas, como las empleadas en el presente trabajo.

Por otra parte, con respecto a las variaciones en la concentración de oxígeno disuelto observadas a través del corte longitudinal del humedal La Florida, sector 2, tampoco se encuentra una influencia relevante por la descarga existente en la zona con un caudal promedio de 0,72 L/s y una concentración de OD de 4,4 mg/L, debido a que ésta se realizó a una distancia de 200 m de la abscisa y de 400 m de donde se presenta el pico en el oxígeno.

Frente a este punto, conviene considerar el rol de la vegetación y la composición de los suelos como algunas de las variables que determinan la concentración de oxígeno disuelto en el humedal, debido a que la exis-

tencia de vegetación flotante (algas y plantas similares) que cubre el espejo de agua conforma una barrera que, según lo descrito por Kadlec & Wallace (2009), dificulta el intercambio de oxígeno con la atmósfera, lo que normalmente induce a la disminución del OD del agua y al desarrollo de condiciones anaerobias.

El oxígeno disuelto en este escenario es inferior al valor mínimo admisible establecido como criterio de calidad de humedales ubicados dentro de la cuenca del río Bogotá, clasificado como clase III con un horizonte proyectado al año 2020, según el Acuerdo CAR 43 de 2006.

Nitrógeno

En este escenario, la velocidad del agua en el humedal La Florida, sector 2, es tan baja ($V_{prom} = 0,00107$ m/s) que las aguas se comportan como aguas en reposo, consideradas como comunidades cerradas en las que los materiales alimenticios se mantienen o acumulan por circulación a través de los diferentes niveles tróficos, especialmente cuando los flujos entrantes y salientes son pequeños (Fair & Geyer, 2001). Es así como se evidencia que el nitrógeno amoniacal⁹ y el nitrógeno en forma de nitratos (NO_3^-) y de nitritos (NO_2^-)¹⁰ mantienen concentraciones casi constantes en el trayecto del humedal, con excepción del tramo comprendido entre la abscisa 600 y 900 m, en el que hay un descenso del

9. IBER considera únicamente el nitrógeno amoniacal total, sin hacer distinción entre amoníaco (NH_3) y de ion amonio (NH_4^+).
10. IBER considera en forma conjunta los nitritos y nitratos, ya que generalmente la conversión entre estas dos formas es muy rápida. No se distingue, por lo tanto, entre los procesos de nitrificación y nitratación.

nitrógeno amoniacal (3,08 mg/L) debido a los procesos de degradación de materia orgánica y de nitrificación, proceso este último que genera un aumento en la concentración de los nitratos (NO₃⁻) de 9,7 a 10,51 mg/L.

El modelo hidrodinámico tiene una condición que perturba el modelo de calidad. Esto ocurre entre la abscisa 600 y 800 m, tramo en el que se encuentran dos alcantarillas por punto, que representan la condición real del humedal La Florida; sin embargo, en los resultados del modelo de calidad de agua se identifican como factores que alteran la solución numérica de IBER 2D.

De la abscisa 900 m en adelante, los valores de la concentración en el humedal de nitrógeno amoniacal (N-NH₃) y en forma de nitratos (NO₃⁻) retornan a los iniciales, con una concentración promedio de oxígeno disuelto en el humedal de 0,0506178 mg/L, oxígeno que desde el inicio de la simulación se consume en los procesos de degradación de materia orgánica y de nitrificación, sin que de forma natural, por procesos de reaeración, pueda recuperarse el oxígeno en el trayecto restante, a consecuencia del crecimiento desmedido de algunas especies vegetales (como buchón de agua) que cubren con manto vegetal el agua (Cárdenas, 2005).

Las concentraciones tanto del nitrógeno amoniacal (N-NH₃) como en forma de nitratos (NO₃⁻) en el humedal La Florida, sector 2 (figura 12), representan el comportamiento de la calidad del agua muestreadas en los puntos 1 y 2 (tabla 7), adoptado por el modelo para el dominio de estudio, por otro lado, el punto de verificación del muestreo 4 presenta una relación inversa a los puntos 1 y 2, por lo que en la verificación del modelo el nitrógeno amoniacal (N-NH₃) fue subestimado y los nitratos (NO₃⁻) fueron sobrestimados. Estos resultados confirman la necesidad de contar con un monitoreo constante de la calidad de agua de este humedal, con el fin de estudiar con mayor precisión la evolución de contaminantes en el interior de éste.

La concentración del nitrógeno amoniacal (N-NH₃) y en forma de nitratos (NO₃⁻) en el humedal La Florida, sector 2, en toda su extensión para el presente escenario, excede el objetivo de calidad mínimo asignado al recurso agua en humedales ubicados dentro de la cuenca del río Bogotá, clasificado como clase III con un horizonte proyectado al año 2020, según el Acuerdo CAR 43 de 2006.

Tabla 7

Muestras de calidad N-NH y NO₃⁻ en el humedal La Florida, sector 2

Ítem		1	2	3	Verificación 4
Fecha muestreo		4/8/2016	4/8/2016	4/8/2016	4/8/2016
Coordenadas / parámetro	X	992039	992047	992020	990689
	Y	1015217	1016127	1016517	1016886
Nitratos N-NO ₃	mg/L	9,07	9,53	12,9	3,11
Nitrógeno amoniacal N-NH ₃	mg/L	3,76	0,106	21,5	5,84

Fuente: CAR & EPAM S.A. ESP (2016).

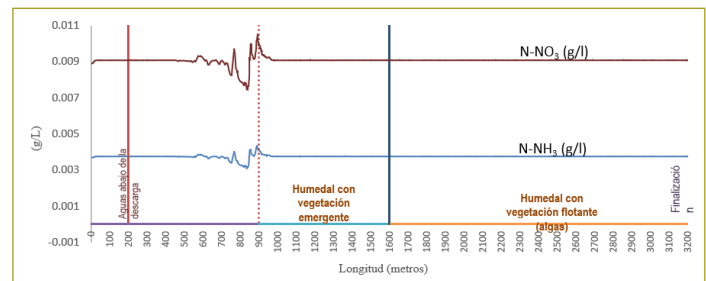


Figura 12. Evolución del nitrógeno amoniacal y de nitratos en el escenario 1, corte longitudinal del humedal La Florida, sector 2 (instante 30.000 s).

Fuente: Elaboración propia.

Escenario 2. Apertura de la compuerta en el canal Chicú

Este escenario simula la recarga del Sistema Hidráulico de Manejo Ambiental y Control de Inundaciones (SH-MACI), a través de la captación de agua del río Bogotá realizada desde la estación Chicú en dirección al embalse La Isla, transportando los caudales de ingreso Q1 = 2,5 m³/s y Q2 = 1,87 m³/s por el humedal La Florida, bajo un calado con una condición inicial de 2,9 m.

Para la modelación se adoptaron los resultados de calidad de agua de la muestra tomada en junio de 2016 por el Laboratorio Ambiental de la CAR, sobre el punto de derivación de agua hacia el humedal La Florida, sector 2, en el canal Chicú; esto con el fin de determinar el comportamiento del humedal ante el aporte de contaminantes captados del río Bogotá.

Para los caudales Q1 = 2,5 m³/s y Q2 = 1,87 m³/s se adoptaron las siguientes concentraciones: DBO₅ 7,4 mg/L, DBOC total 0,01402 kg/m³; OD 1,5 mg/L, 0,0015 kg/m³; nitratos N-NO₃ 0,371 mg/L, 0,000371 kg/m³; nitrógeno amoniacal N-NH₃ 4,322 mg/L, 0,004322 kg/m³ y temperatura 16,5 °C.

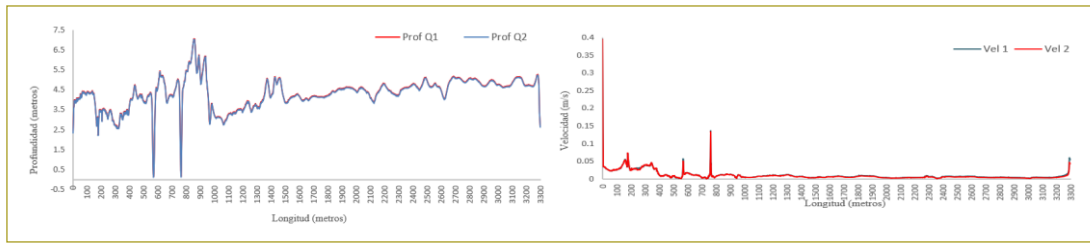


Figura 13. Perfil de profundidad y velocidad en el corte longitudinal en el escenario 2, humedal La Florida, sector 2 (instante 30.000 s).

Fuente: Elaboración propia.

En este escenario, y para las condiciones reales de topografía del humedal La Florida, sector 2, se evidencia cómo en el instante 30.000 s el flujo se secciona en tres tramos identificados principalmente entre las abscisas 0 - 570 m, 570 - 780 m, 780 - 3290 m, como consecuencia de los pasos artesanales existentes en las coordenadas E: 990907, N: 1016606 y E: 991013, N: 1016452, que en el modelo se encuentran asociados a dos alcantarillas por punto. Esta particularidad influye en los resultados de calidad, como podrá observarse en los resultados que a continuación se presentan, destacando que cada pico de velocidad en el perfil longitudinal obedece a los tramos próximos a estructuras hidráulicas, así como a la reducción ostensible de la sección superficial (canal de salida hacia el embalse La Isla).

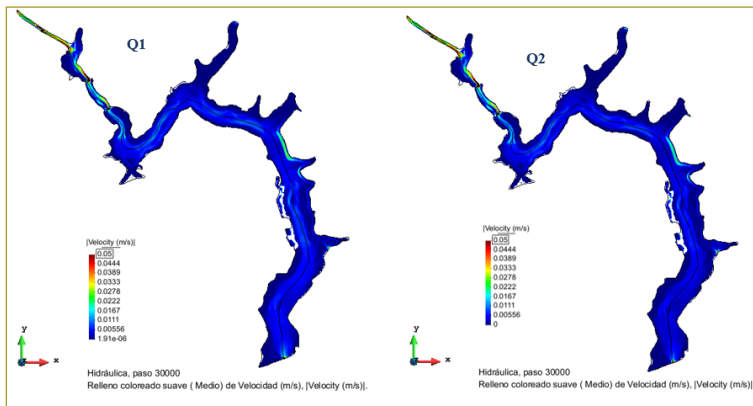


Figura 14. Distribución espacial de la velocidad en el escenario 2, humedal La Florida, sector 2 (instante 30.000 s).

Fuente: Elaboración propia.

DBOC total

En la condición de flujo de los caudales Q1 y Q2, el modelo demuestra que para el instante 30.000 segundos el humedal La Florida, sector 2, tiene la capacidad para

tratar y mejorar la calidad del agua en términos de la cantidad de materia orgánica carbonosa aportada desde el río Bogotá, con 38 % de eficiencia en remoción, aproximadamente.

$$\text{Eficiencia} = \frac{[\text{Afluente}] - [\text{Efluente}]}{[\text{Afluente}]} = \frac{[0,01402\%] - [0,00874\%]}{[0,01402\%]} * 100 = 38 \%$$

No obstante, entre las abscisas 0 y 800 m, sobre el tramo del humedal que no cuenta con vegetación espejo de agua (salida hacia el embalse La Isla), en el perfil longitudinal se observa una variación importante en la concentración de la DBOC total; sin embargo, en este tramo no hay aportes de caudal o contaminantes que influyan en la variación de la DBOC total, pero si la existencia en las abscisas 570 m y 780 m de dos alcantarillas por cada punto, que generan reflujos y remansos de agua, como muestran los vectores de velocidad para los Q1 y Q2 (figura 5); por lo tanto, en el modelo numérico se producen tales resultados.

A pesar de las concentraciones de DBOC total aportadas por el caudal de ingreso del río Bogotá, por medio de la captación de agua del canal Chicú, la concentración de la DBO₅ en el humedal La Florida, sector

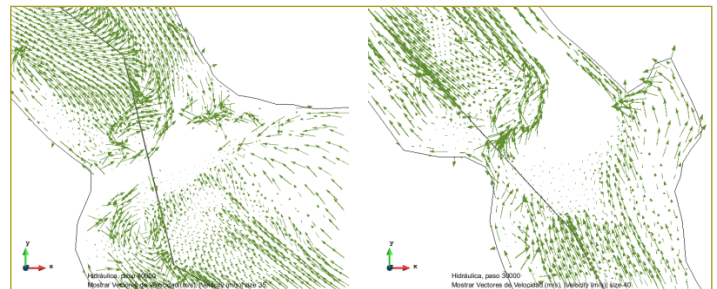


Figura 15. Vectores de velocidad de los caudales Q1 y Q2 en el escenario 2, humedal La Florida, sector 2 (instante 30.000 s).

Fuente: Elaboración propia.

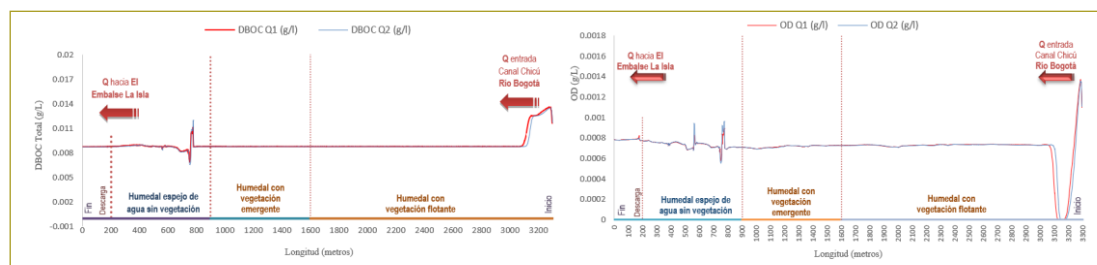


Figura 16. Evolución de la DBOC total y OD en el escenario 2, corte longitudinal del humedal La Florida, sector 2 (instante 30.000 s).

Fuente: Elaboración propia.

2 (expresada en mg/L), es inferior al objetivo de calidad mínimo asignado a la calidad de agua de humedales ubicados dentro de la cuenca del río Bogotá, clasificado como clase III con un horizonte proyectado al año 2020, según el Acuerdo CAR 43 de 2006. Es decir, que se cumple con el objetivo de calidad establecido en este parámetro para el cuerpo lagunar.

Oxígeno disuelto

Con respecto a la concentración inicial de oxígeno disuelto en el caudal de entrada del río Bogotá, se obtiene una reducción en la concentración de OD del 52 %, aproximadamente (OD entrada = 1,5 mg/L y OD salida = 0,78 mg/L), como resultado posible del consumo de la materia orgánica carbonosa, de los procesos de nitrificación, pero en mayor medida por la mezcla con el agua del humedal que tiene como condición inicial una concentración de 0,19 mg/L de OD. Debido a estos resultados, es necesario alimentar el modelo con varios muestreos de calidad para minimizar la diferencia obtenida entre las concentraciones reales y simuladas en este parámetro.

A pesar de la recuperación del oxígeno disuelto en algunos tramos del humedal La Florida, sector 2, la dinámica de este cuerpo lagunar no logra recuperar ni alcanzar el valor mínimo admisible establecido como criterio de calidad de humedales ubicados dentro de la cuenca del río Bogotá, clasificado como clase III con un horizonte proyectado al año 2020, según el Acuerdo CAR 43 de 2006.

Para este escenario, es importante considerar la influencia de algunas especies vegetales que cubren el espejo de agua en el cuerpo lagunar, que se han desarrollado en forma descontrolada en el humedal La Florida, sector 2, obstaculizando los procesos de

reaireación natural. Esto como consecuencia de la alta presencia tanto de amoníaco como de nitratos, que son nutrientes esenciales para la fotosíntesis que estimulan el crecimiento excesivo de plantas en el proceso denominado eutrofización y que afectan directamente el nivel de oxígeno en el agua (Chapra, 1997).

Nitrógeno

La evolución de la concentración del nitrógeno amoniacal ($N-NH_3$) y nitratos (NO_3^-) tiene un comportamiento muy similar al primer escenario en un tramo con una longitud aproximada de 2200 m, caracterizado por vegetación flotante y emergente, que denota el grado de eutrofización en el que el nitrógeno actúa como un fertilizante que sobrestimula el crecimiento de plantas. En la longitud del tramo restante, tanto el nitrógeno amoniacal ($N-NH_3$) como los nitratos (NO_3^-) presentan unos picos de ascenso y descenso, que como en los anteriores parámetros se asocian a la influencia de las estructuras hidráulicas existentes, en los que el modelo de calidad se afecta por los reflujos y remansos de agua que se generan en el trayecto del agua.

Debido a que el humedal La Florida, sector 2, integra el Sistema Hidráulico de Manejo Ambiental y Control de Inundaciones (SHMACI), es inevitable el ingreso de agua desde el río Bogotá, que aporta al cuerpo lagunar una concentración importante de contaminantes; para el caso del nitrógeno amoniacal ($N-NH_3$) la concentración inicial del río Bogotá, luego de su tránsito por el humedal, es reducida en un 0,57 mg/L, aproximadamente, equivalente a un porcentaje de eficiencia en remoción del 13,2 %.

$$Eficiencia = \frac{[Afluente] - [Efluente]}{[Afluente]} = \frac{[0,00432\%] - [0,00375\%]}{[0,00432\%]} * 100 = 13,2\%$$

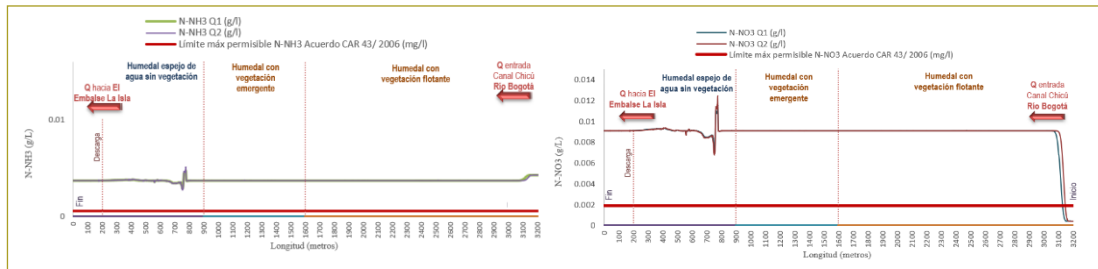


Figura 17. Evolución de nitrógeno en el escenario 2, corte longitudinal del humedal La Florida, sector 2 (instante 30.000 s).

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a los nitratos (NO_3^-), la concentración de entrada se incrementa en 8,70 mg/L (NO_3^- Entrada = 0,37 mg/L y NO_3^- Salida = 9,08 mg/L), como resultado de la prevalencia de la concentración inicial de nitratos en el humedal (9,07 mg/L), así como por procesos de nitrificación, donde la mayor presencia de nitratos como nutrientes esenciales para la fotosíntesis fomenta el crecimiento excesivo de las plantas (Chapra, 1997).

De acuerdo con lo expuesto, el cuerpo lagunar no cumple en nitrógeno amoniacal (N-NH_3) y nitratos (NO_3^-) con el objetivo de calidad de agua de humedales ubicados dentro de la cuenca del río Bogotá, clasificado como clase III con un horizonte proyectado al año 2020, según el Acuerdo CAR 43 de 2006.

Perturbación por alcantarillas

Teniendo en cuenta el efecto identificado en los resultados de los modelos de calidad para las condiciones sin apertura de compuerta Q_0 y con apertura de compuertas para los caudales Q_1 y Q_2 con calado inicial de 2,9 m, concerniente a la existencia en las coordenadas E: 990907, N: 1016606 y E: 991013, N: 1016452 de dos pasos artesanales entre las fincas existentes, y que en el modelo se asocian a dos alcantarillas por punto,

se tomó la decisión de modificar el modelo digital de elevación, suprimiendo las alcantarillas instaladas, con el fin de confirmar que la perturbación al modelo de calidad obedece a dichas estructuras.

El modelo digital de elevación con el uso de IBER 2D, se modificó manualmente con la edición de la elevación original, transformando la topografía real del humedal La Florida, sector 2, y adoptando en el cuerpo lagunar que el caudal fluye sin la obstrucción de estructuras hidráulicas.

La comparación de los resultados en las modelaciones permite inferir que la alcantarilla, situada en las coordenadas E: 990907, N: 1016606, genera un incremento igual a tres veces la velocidad del tránsito del Q_{1-3} , sin la existencia de la estructura hidráulica; así mismo, con la alcantarilla ubicada en las coordenadas E: 991013, N: 1016452 el incremento en la velocidad es igual a siete veces sin la existencia de la estructura hidráulica.

Las perturbaciones en las concentraciones de DBOC, OD y nitrógeno antes mencionadas no desmejoran la calidad del agua en la salida del humedal sector 2, es decir, en el punto de entrega del caudal hacia el embalse La Isla. Según los resultados de las modelaciones, se concluye que las concentraciones de

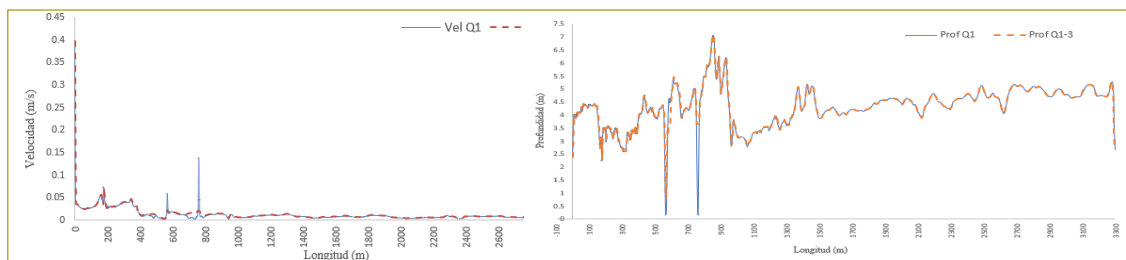


Figura 18. Perfil de velocidad y profundidad en el escenario 2 Q_1 , Q_{1-3} , en el corte longitudinal en el humedal La Florida, sector 2 (instante 30.000 s).

Fuente: Elaboración propia.

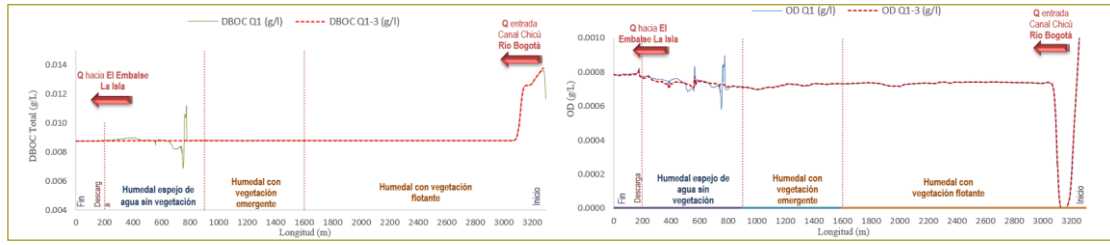


Figura 19. Comparación de la evolución temporal de la DBOC y OD en el escenario 2 para Q1, Q1-3, editando el MDE (Clnicial 2,9 m - Sin alcantarillas - Instante 30.000 s).

Fuente: Elaboración propia.

las sustancias entre las abscisas 0 y 100 m se estabilizan y se entregan superando las variaciones en los puntos indicados (figuras 19 y 20).

que las velocidades son tan bajas que tienden a aguas estancadas, por lo que hay menos oxígeno y menos autodepuración (Seoáñez, 1999).

Escenario 3. Simulando una descarga de agua residual doméstica

Adoptando las condiciones hidrodinámicas del escenario 2 con apertura de compuertas para los caudales $Q1 = 2,5 \text{ m}^3/\text{s}$ y $Q2 = 1,87 \text{ m}^3/\text{s}$, se incorporó una descarga de agua residual doméstica (ARD), con características de parámetros dentro de los límites permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales definidos en el artículo 8 de la Resolución MADS 631 de 2015. La descarga se incluyó en las coordenadas E: 991935, N: 1016250 en el interior del dominio, en la abscisa 2100 m, donde el humedal en el instante 30000 segundos tiene una profundidad promedio de 4 m en dicho punto.

Teniendo en cuenta que la velocidad del agua influye en el proceso de autodepuración, no se adoptó como escenario de simulación el escenario 1, debido a

DBOC total

En las condiciones de calidad del humedal La Florida, sector 2, entre las que sobresalen la influencia por el aporte de los contaminantes procedentes del río Bogotá ante la apertura de la compuerta en el canal Chicú, el vertimiento de agua residual doméstica entre las abscisas 2100 m y 1850 m impacta negativamente el cuerpo de agua, excediendo el objetivo de calidad del Acuerdo CAR 43 de 2006. Sin embargo, en un trayecto de 350 m aproximadamente entre el punto de descarga y la abscisa 1850 m, el vertimiento se asimiló en el cuerpo lagunar, la materia orgánica es degradada hasta alcanzar una concentración de $4,7 \text{ mg/L}$ en DBO_5 , valor que se mantiene hasta la salida del humedal, sin evidenciar el desmejoramiento de las condiciones iniciales del cuerpo lagunar.

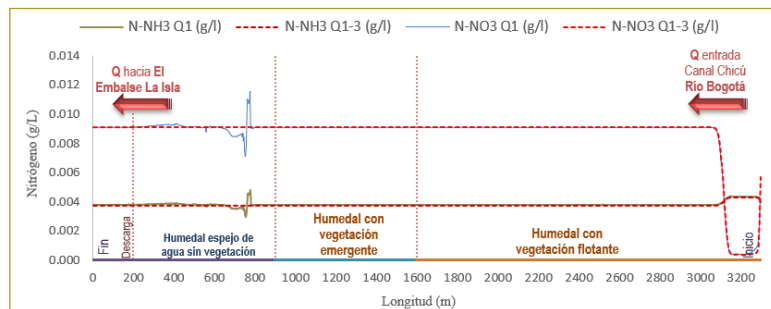


Figura 20. Comparación de la evolución temporal del nitrógeno en el escenario 2 para Q1 y Q1-3, editando el MDE (Clnicial 2,9 m - Sin alcantarillas - Instante 30.000 s).

Fuente: Elaboración propia.

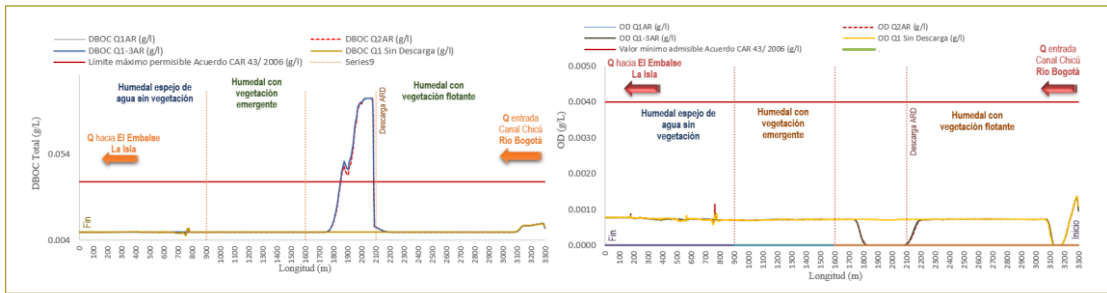


Figura 21. Evolución de la DBOC total y OD escenario 3, con una descarga de ARD en el corte longitudinal del humedal La Florida, sector 2 (instante 30.000 s).

Fuente: Elaboración propia.

Oxígeno disuelto

Después de la descarga de agua residual doméstica, se presenta un marcado descenso en el oxígeno disuelto desde la abscisa 2100 m hasta llegar a niveles de oxígeno disuelto iguales a cero mg/L. Dicha condición anóxica se conserva en aproximadamente 250 m, incluida la abscisa 1800 m ante procesos de degradación de materia orgánica, procesos de nitrificación, y como producto de la mezcla con el agua del humedal, que tiene como condición inicial una concentración baja de OD de 0,19 mg/L.

Los niveles de oxígeno disuelto en el humedal La Florida, sector 2, luego de la descarga de agua residual y dilución en el cuerpo lagunar, no cambian las condiciones de calidad del escenario 2; es decir, continúa siendo crítica y no muestra recuperación por causa de procesos de reaireación, variación de la topografía, cambios de dirección y velocidad del agua, incumpliendo en todo el tránsito del humedal (3290 m) el criterio de calidad de humedales ubicados dentro de la cuenca del río Bogotá, clasificado como clase III con un horizonte proyectado al año 2020, según el Acuerdo CAR 43 de 2006.

Nitrógeno

En el caso de los nitratos, la concentración aportada en el vertimiento por el efluente de ARD tratado de 0,513 mg/L es inferior al nivel de nitratos del humedal La Florida, sector 2, que se mantiene en un promedio de 9,07 mg/L (valor muestreado en el punto 1 del humedal). En este sentido, se observa luego de la descarga puntual el descenso de los nitratos, hasta llegar a una concentración de 0,517 mg/L. Posteriormente, en un tramo de unos 300 m entre las abscisas 1800 m y 2100 m, los nitratos ascienden y alcanzan de nuevo el nivel inicial, sin que éste vuelva a recuperarse a lo largo del dominio, por oxidación bacteriana de materia orgánica y nitrificación.

La producción de nitratos aguas abajo del punto de descarga de agua residual doméstica concuerda con el agotamiento del oxígeno disuelto (condiciones anóxicas), que desde la abscisa 1800 m mantiene una concentración de 9,07 mg/L, aproximadamente, demostrando niveles de eutrofización en el cuerpo lagunar y el incumplimiento del objetivo de calidad de agua de humedales ubicados dentro de la cuenca del río Bogotá,

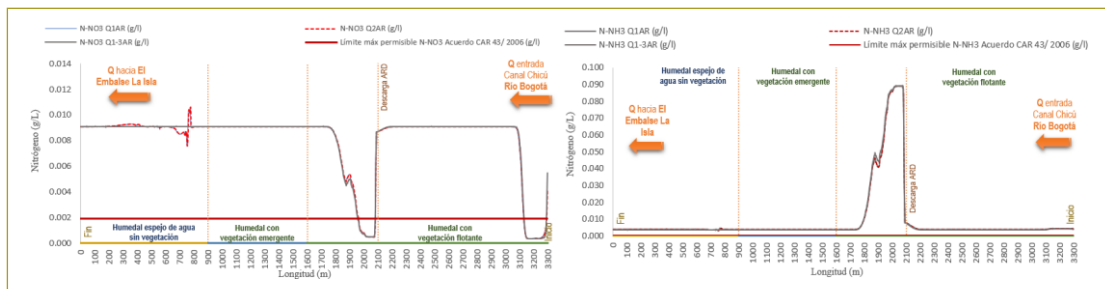


Figura 22. Evolución del nitrógeno en el escenario 3, corte longitudinal del humedal La Florida, sector 2 (instante 30.000 s).

Fuente: Elaboración propia.

clasificado como clase III con un horizonte proyectado al año 2020, según el Acuerdo CAR 43 de 2006.

Las condiciones anóxicas entre las abscisas 1800 m y 2100 m manifiestan la alta presencia de nitrógeno amoniacal que alcanza el cuerpo lagunar después de la descarga de agua residual doméstica simulada, con concentraciones de 88,9 mg/L, el cual se produce por la desaminación de compuestos que contienen nitrógeno, por la hidrólisis de la urea y también por la reducción de los nitratos en condiciones anaerobias (Delgadillo, Camacho, Pérez & Andrade, 2010).

CONCLUSIONES

Para el paso de tiempo analizado (30.000 s) y a través de la visualización de los vectores de dirección de la velocidad en torno a las estructuras hidráulicas instaladas (alcantarillas), se demuestra la formación de reflujos y remansos de agua que, tal como se evidencia en los resultados, afectan directamente el modelo de calidad. En cambio, la asignación de los coeficientes de rugosidad en las 70 superficies del dominio de estudio, conforme a las coberturas existentes en el humedal, no demostró una influencia significativa en la evolución de la concentración de los contaminantes.

Los cambios en los componentes de velocidad del flujo, así como la discontinuidad en el calado, en el modelo IBER influyen directamente en la evolución de la concentración de los contaminantes, aspectos evidenciados cuando en el modelo hidrodinámico se introducen estructuras hidráulicas, tal como ocurrió en el presente trabajo con las alcantarillas instaladas en el sector occidental del humedal La Florida, sector 2.

A la característica del modelo hidrodinámico de IBER, relativo a admitir zonas con presencia de remansos o zonas de reflujos en algunos sitios, que implicaría aumentos en las láminas de agua (Sierra, 2015), se suma la influencia de estas zonas en los resultados del modelo de calidad, que reflejan un comportamiento similar a una descarga de agua residual debido a que elevan los niveles de contaminación de todas las sustancias analizadas (DBOC, N-NH₃, N-NO₃); así mismo, ocasiona un ascenso y un descenso bruscos en el oxígeno disuelto en algunos tramos. En consecuencia, estas características del modelo IBER 2D se identifican como restricciones para cuando el análisis de resultados implica hacer cortes longitudinales, debido a que los datos no

demuestran consistencia en algunas secciones, tanto en las condiciones hidráulicas como de calidad (escenario 1, principalmente).

El mejor ajuste alcanzado del modelo con respecto a los valores reales medidos en campo en el punto 4 del humedal La Florida, sector 2 (salida hacia el embalse La Isla) lo constituye la concentración de la DBOC total (6 % de diferencia entre los valores reales y simulados). En contraste, el modelo no obtuvo un buen ajuste de las concentraciones de OD, N-NH₃ y N-NO₃, habida cuenta de que, según los resultados de las pruebas de ensayo y error realizadas, se evidencia que con todos los coeficientes cinéticos empleados las diferencias entre las concentraciones reales y simuladas fueron superiores al 55 %. Por lo tanto, los resultados de las simulaciones para determinar el comportamiento de las concentraciones de OD, N-NH₃ y N-NO₃ no son confiables y presentan un grado de incertidumbre importante.

En este sentido, una vez verificados los datos de entrada y las constantes alimentadas en el módulo de calidad de IBER, se encuentra que la falta de ajuste en las concentraciones reales y simuladas de OD, N-NH₃ y N-NO₃, obedece a una deficiencia en los datos de calidad empleados, principalmente en razón de que los muestreos de calidad se tomaron en condiciones de aguas quietas o estancadas, no se hizo el seguimiento a la masa de agua y algunos resultados de las muestras, como la relación de nitrógeno amoniacal y nitratos en los puntos 1 y 2, no son consecuentes con la relación de estas sustancias para las muestras 3 y 4.

De acuerdo con la simulación del escenario 3 en el humedal La Florida, sector 2, correspondiente a una descarga de agua residual doméstica (ARD) con características de calidad dentro de los límites permisibles en los vertimientos específicos a cuerpos de aguas superficiales definidos en el artículo 8 de la Resolución 631 de 2015, promulgada por el MADS, se puede establecer que el efluente tratado fue asimilado por el humedal en un tramo aproximado de 350 m, punto a partir del cual el cuerpo de agua retorna a las condiciones previas a la descarga, manteniendo hasta el punto de salida concentraciones constantes (abscisas 1850 m a 0 m), sin que se desmejore en la salida, en ninguna medida, la calidad de agua del cuerpo lagunar.

En la bibliografía existente se demuestra la capacidad de remoción de contaminantes en humedales naturales en el caso del humedal La Florida, sector 2, de con-

formidad con los resultados obtenidos. Este servicio ambiental se presta principalmente para la depuración de algunos contaminantes aportados con el agua que ingresa desde el río Bogotá por la compuerta ubicada en el canal Chicú, como es el caso de la demanda bioquímica de oxígeno carbonosa. Sin embargo, las condiciones iniciales de calidad, como por ejemplo los bajos niveles de oxígeno disuelto y la restricción a la que se encuentra sometido este cuerpo lagunar por la operación del Sistema Hidráulico de Manejo Ambiental y Control de Inundaciones (SHMACI), pueden limitar esta función.

Los bajos niveles de oxígeno disuelto (OD) en las simulaciones realizadas en los escenarios 1 a 3 reflejan la necesidad de sanear el agua aportada desde el río Bogotá a la altura del canal Chicú, como principal afluente del humedal La Florida, sector 2; no obstante, teniendo en cuenta que para las condiciones actuales no es posible dejar de operar el Sistema Hidráulico de Manejo Ambiental y Control de Inundaciones (SHMACI), se podría plantear la implementación de estructuras que favorezcan la reaireación, así como la inyección de oxígeno puro o aire a través de aireadores superficiales o por medio de difusores de inyección.

Siempre y cuando se trate de efluentes tratados, especialmente de aguas residuales domésticas (ARD), para optimizar el control y evitar impactos con otro tipo de sustancias y descargas al ecosistema, se considera viable admitir en el humedal La Florida, sector 2, descargas de efluentes con tratamientos secundarios y terciarios debido a que pueden contribuir y mejorar la calidad de agua de este cuerpo lagunar, todo en el marco del cumplimiento de los objetivos de calidad mínimos asignado a humedales ubicados dentro de la cuenca del río Bogotá con clase III, según el Acuerdo CAR 43 de 2006 y de los planes de manejo ambiental de éstos. Por lo anteriormente descrito, el uso de humedales en el manejo de aguas residuales puede contemplarse como una opción para el humedal en comento y abre la puerta para que se lleven a cabo otros estudios en los humedales existentes que cuenten con caudales de entrada y salida continuos.

El humedal La Florida, sector 2, presenta altos niveles de fósforo y nitrógeno total, que aceleran el proceso de eutrofización (Baracaldo, 2017), por lo tanto, con el fin de que el servicio ambiental de depuración de agua tenga resultados óptimos, es necesario implementar técnicas o métodos para la restauración, teniendo presente

que según se demuestra en los resultados del escenario 1, la autopurificación natural y la dilución con aguas no contaminadas (agua escorrentía) son mínimas.

IBER 2D es una herramienta útil para la modelación hidráulica y evaluar la evolución espaciotemporal de algunas sustancias contaminantes en humedales naturales que no se encuentren estratificados. Además, tiene una plataforma amigable para los usuarios y una ventaja importante frente a otros modelos, por tratarse de un *software* libre; sin embargo, como limitantes para su uso se encuentran la demanda computacional de las modelaciones (mínimo 72 horas), la no inclusión de algunas sustancias y variables en el actual módulo de calidad, como es el caso del fósforo, al igual que la admisión de zonas con presencia de remansos o zonas de reflujos. Este último aspecto se debe a que incide directamente en los resultados de los modelos hidráulicos y de calidad.

A lo largo del presente trabajo se evaluó la capacidad del modelo IBER 2D para la modelación hidráulica y de calidad de humedales naturales, y se evidenciaron fortalezas y limitaciones de dicho *software* para las condiciones analizadas. Sin embargo, a causa de la deficiente información de calidad existente en este tipo de cuerpos de agua, se recomienda establecer puntos de control y monitoreo en el humedal La Florida, sector 2, en cada uno de los afluentes y efluentes, en coordinación con la operación del Sistema Hidráulico de Manejo Ambiental y Control de Inundaciones (SHMACI), con el fin de disponer de información válida para calibrar el modelo y ajustarlo al comportamiento de este cuerpo lagunar.

Agradecimiento

La autora desea expresar su agradecimiento a su director de proyecto, ingeniero Héctor Matamoros, por la confianza, conocimiento y apoyo brindados, así como a la Escuela Colombiana de Ingeniería y a la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, por aportar los insumos necesarios para el desarrollo de este trabajo.

REFERENCIAS

Arcement, G. & Schneider, V. (1989). Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains. Denver: United States Government. Retrieved from <http://dpw.lacounty.gov/lacfd/wdr/files/WG/041615/Guide%20for%20Selecting%20n-Value.pdf>.

- Bowie, G., Mills, W., Porcella, D., Campbell, C. & Chamberlin, C. (1985). *Rates, Constants, and Kinetics Formulations in Surface Water Quality Modeling* (Second Edition). U.S. Environmental Protection Agency.
- CAR & EPAM S.A. ESP (2016). Realizar los diseños detallados para la reconformación hidromorfológica de los humedales La Florida, Gualí, Tres Esquinas, y laguna del Funzhé, laguna de la Herrera, Tierra Blanca y Neuta; determinar las capacidades de asimilación de nutrientes y contaminantes, y proponer las acciones a realizar para la rehabilitación y recuperación de sus hábitats. Bogotá: Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, Contrato 1390 de 2014.
- Cárdenas, J. A. (2005). Calidad de aguas para estudiantes de ciencias ambientales. Recuperado de <https://www.amazon.com/Calidad-aguas-estudiantes-ciencias-ambientales/dp/9588247306>.
- Chapra, S. (1997). *Surface Water Quality Modeling*. Nueva York: McGraw-Hill Companies, Inc.
- Chow, V. T. (1959). *Open Channel Hydraulics*. Nueva York: McGraw-Hill.
- Consortio Cuencas & CAR. (2006). Modelación de la calidad de las corrientes hídricas cuencas de segundo orden de la jurisdicción CAR. Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, Contrato 279 de 2016.
- Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, F. & Andrade, M. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. Bolivia: Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua (Centro Agua). Recuperado de <https://www.aguasresiduales.info/revista/libros/depuracion-de-aguas-residuales-por-medio-de-humedales-artificiales>.
- Díaz, M. B. E. (2004). Modelación de la calidad del agua en el interceptor río Bogotá en los tramos Fucha - Tunjuelo - Canoas - Observatorio Ambiental de Bogotá (tesis de maestría). Bogotá: Universidad de los Andes. Recuperado de <http://oab2.ambientebogota.gov.co/es/documentacion-e-investigaciones/resultado-busqueda/modelacion-de-la-calidad-del-agua-en-el-interceptor-rio-bogota-en-los-tramos-fucha-tunjuelo-canoas>.
- Fair, G. M. & Geyer, J. C. (2001). *Purificación de aguas y tratamiento y remoción de aguas residuales* (vol. II). México: Limusa. Recuperado de <https://www.scribd.com/document/238705081/Fair-Geyer-Okun-Cap1-5-8>.
- Fisher, K. & Dawson, H. (2003). Roughness Review (vol. W5A-057). Londres: Environment Agency DEFRA. Retrieved from http://www.river-conveyance.net/ces/documents/RoughnessReviewFinal_July07.pdf.
- Galema, A. (2009). Vegetation Resistance Evaluation of Vegetation Resistance Descriptors for Flood Management. Berlin: University of Twente. Recuperado de http://essay.utwente.nl/59345/1/scriptie_A_Galema.pdf.
- Kadlec, R. (1990). Overland Flow in Wetlands: Vegetation Resistance. *Journal of Hydraulic Engineering*, 116(5), 691–706. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1990\)116:5\(691\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1990)116:5(691)).
- Kadlec, R. & Wallace, S. (2009). *Treatment Wetlands* (2nd ed.). Boca Raton: CRC Press.
- Mancera, E., Peña, E., Giraldo, R. & Santos, A. (2003). *Introducción a la modelación ecológica. principios y aplicaciones*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Medeiros, S. C., Hagen, S. C. & Weishampel, J. F. (2012). Comparison of floodplain surface roughness parameters derived from land cover data and field measurements. *Journal of Hydrology*, 452, 139-149. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.05.043>.
- Min, J.-H. & Wise, W. R. (2009). Simulating Short-Circuiting Flow in a Constructed Wetland: The Implications of Bathymetry and Vegetation Effects. *Hydrological Processes*, 23(6), 830–841. <https://doi.org/10.1002/hyp.7219>.
- Min, J.-H. & Wise, W. R. (2010). Depth-Averaged, Spatially Distributed Flow Dynamic and Solute Transport Modelling of a Large-Scaled, Subtropical Constructed Wetland. *Hydrological Processes*, 24(19), 2724–2737. <https://doi.org/10.1002/hyp.7686>.
- Paudel, R., Grace, K. A., Galloway, S., Zamorano, M. & Jawitz, J. W. (2013). Effects of hydraulic resistance by vegetation on stage dynamics of a stormwater treatment wetland. *Journal of Hydrology*, 484, 74–85. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.01.031>.
- Phillips, J. & Tadayon, S. (2007). *Selection of Manning's Roughness Coefficient for Natural and Constructed Vegetated and Non-Vegetated Channels, and Vegetation Maintenance Plan Guidelines for Vegetated Channels in Central Arizona*. Virginia: U.S. Geological Survey.
- Shelef, O., Gross, A. & Rachmilevitch, S. (2013). Role of Plants in a Constructed Wetland: Current and New Perspectives. *Water*, 5(2), 405–419. <https://doi.org/10.3390/w5020405>.
- UNAL & EAAB. (2008). Modelación dinámica de la calidad del agua del río Bogotá: EAAB, Universidad Nacional de Colombia, Contrato Interadministrativo 9-07-26100-1059 de 2008. Recuperado de <file:///C:/Users/Daniel/Desktop/campanas-de-monitoreo-calidad-del-agua-rio-bogota.pdf>.
- Vymazal, J. (2011). Plants used in Constructed Wetlands with Horizontal Subsurface Flow: A Review. *Hydrobiology*, 674(1), 133–156. <https://doi.org/10.1007/s10750-011-0738-9>.

Comportamiento a flexión pura de muros de mampostería en arcilla, reforzados con barras de FRP

Out of plane flexural behavior of clay masonry walls reinforced with FRP bars

LUIS ALFONSO QUINTANA RUIZ¹ - NANCY TORRES CASTELLANOS²

1. Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Estructuras.

2. Magíster en Estructuras y doctora en Ingeniería, Ciencia y Tecnología de Materiales. Profesora asociada de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

luis.quintana-r@mail.escuelaing.edu.co - nancy.torres@escuelaing.edu.co

Recibido: 16/06/2018 Aceptado: 31/07/2018

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

Resumen

En razón del interés en el medio colombiano por estar a la vanguardia con las últimas tecnologías y materiales disponibles, se planteó en la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito un proyecto de investigación con el fin de evaluar la capacidad a flexión de la mampostería de arcilla, reforzada internamente con barras de FRP ante cargas perpendiculares al plano y dar los primeros pasos para generar un protocolo preliminar de diseño para el futuro, basado en el ACI 440 y el TMS402/ACI 530, dado que aún no existe guía de diseño que contemple el comportamiento de mampostería ante esta solicitud. El programa experimental contempló la construcción y el ensayo de 16 muros de mampostería en arcilla, el reforzamiento de siete muros con barras de GFRP (*Glass fiber reinforced polymer*), los siguientes siete se reforzaron con barras de CFRP (*Carbon fiber reinforced polymer*) y los dos restantes se reforzaron con barras de acero convencional, para comparar los resultados. Las variables que se tuvieron en cuenta en la investigación fueron las dimensiones del muro en planta y las cuantías de refuerzo.

Los muros se ensayaron en un marco de prueba con una longitud entre apoyos de 2030 mm y con dos cargas distribuidas en los tercios a lo largo del muro, buscando un comportamiento de flexión pura en el tercio central.

Se observó un comportamiento muy similar del modelo analítico, comparado con los resultados experimentales para estados de carga de servicio (deflexiones). En cuanto a las cargas últimas, se encontraron diferencias entre la teoría y los ensayos.

Palabras claves: mampostería, flexión, flexión perpendicular al plano, flexión pura, barras de FRP

Abstract

Due to the interest in the Colombian environment to be at the vanguard with the latest available technologies and materials, a research project was proposed to evaluate the flexion capacity of clay masonry, reinforced with FRP bars at plane-perpendicular loads, and take the first step to generate a preliminary design protocol for the future, based on ACI 440 and TMS402 / ACI 530, due to the lack of a design guide to assess the behavior of masonry under this approach. The experimental program included the construction and test of 16 masonry walls in clay, seven walls were reinforced with Glass fiber Reinforced Polymer (GFRP) bars, and the other seven were reinforced with Carbon fiber Reinforced polymer (CFRP), and the remaining two were reinforced with conventional steel rods. The variables that were taken into account were the dimensions of the wall in plan and rebar.

The walls were tested on a test frame whose length between supports was 2,030 mm and two concentrated loads in the thirds along the wall, looking for a pure bending behavior in the central third.

A very similar behavior of the analytical model was observed, compared to the experimental results for service loads. As for the latest loads, differences were found between theory and tests.

Keywords: masonry, flexion, out of plane flexion, uniform flexion, FRP bars.

INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años se ha venido implementando el uso de barras de fibras (carbono, vidrio y aramida) como refuerzo principal en elementos de concreto en obras de infraestructura a escala internacional. De antemano se sabe que el comportamiento mecánico de estos polímeros reforzados con fibra no tiene un modo de falla dúctil, y por el contrario su modo de falla es de tipo frágil. En el medio colombiano existen empresas que han iniciado la comercialización de este producto, por lo que se ha despertado el interés de estudiar las propiedades mecánicas de este material y el comportamiento de elementos estructurales al ser reforzados con estas barras. Adicionalmente, dado que en Colombia predominan las obras en mampostería, también es interesante conocer la interacción que tienen estas barras al usarlas como refuerzo interno y su comportamiento estructural.

En el ámbito internacional ya se cuenta con guías para diseñar elementos de concreto reforzados con barras de FRP (*Fiber reinforced polymer*), pero aún no se cuenta con guías para el diseño de mampostería nueva reforzada con este material. Entre los países que han investigado el comportamiento de elementos estructurales reforzados internamente con barras de FRP se encuentran algunos europeos, Canadá y Estados Unidos, e incluso ya está anexo a sus reglamentos de concreto, como en el caso de Canadá con el código CAN/CSA S806 y en Estados Unidos con el comité del ACI 440.1.

Pese a que este material no se ha estudiado tanto como el acero durante varias décadas, se sabe que tiene suficientes ventajas en lo que respecta al acero estructural, como su bajo peso y su alta resistencia a la tensión y a la fatiga, aunque también tiene algunas desventajas, entre ellas su baja resistencia al impacto, su frágil comportamiento mecánico, además de su bajo módulo de elasticidad.

Debido a que hoy en día se carece de guías o reglamentos para el diseño de muros de mampostería reforzados con barras de FRP, en la Escuela Colombiana de Ingeniería se planteó hacer una investigación como un primer paso para hacer recomendaciones de diseño de la mampostería reforzada con barras de FRP ante sollicitaciones fuera del plano.

Para la realización de la investigación se desarrolló un programa experimental, el cual se basó primero en determinar de manera teórica la resistencia a la flexión

perpendicular al plano de los muros reforzados con barras de FRP, combinando las metodologías descritas en el TMS402/ACI 530 y el código ACI 440.1R, y establecer también las deflexiones que éstos presentaban en diferentes estados de carga. Posteriormente se hicieron los ensayos experimentales de los muros y se analizaron los resultados.

PROGRAMA EXPERIMENTAL

Metodología

En la construcción de los muros se utilizaron unidades de arcilla y se determinaron las dimensiones, cuantías y tipos de refuerzo que hay que usar en los muros. Posteriormente se procedió a caracterizar los materiales, para definir sus propiedades mecánicas basados en las respectivas normas ASTM. Una vez definidas estas variables, se calcularon teóricamente las capacidades y las deflexiones de los muros bajo cargas fuera del plano, utilizando las metodologías propuestas por el ACI 440 y el TMS402/ACI 530.

Propiedades de los materiales

Para el mortero de pega se seleccionó un mortero de f'_{cp} de 17,5 MPa, en tanto que el *grout* de relleno de las celdas f'_{cr} se diseñó para 21 MPa: las unidades de arcilla que conformaron los muretes o prismas para el ensayo de compresión (norma NTC 3495) fueron unidades de la Ladrillera SantaFe (ladrillo portante 30). A las barras de FRP, importadas de Italia (Sireg S. p A.), se les hicieron ensayos de tensión (norma ASTM D7205).

Para calcular la resistencia a compresión f'_m de la mampostería, se construyeron seis muretes de 290 mm de altura y 440 mm de ancho, de los cuales a tres se les inyectó *grout* de relleno en todas las celdas y los tres restantes se dejaron vacíos. De los ensayos se determinó la resistencia a la compresión de la mampostería $f'_m = 13,7$ MPa, el módulo de elasticidad $E_m = 6285$ MPa y la deformación unitaria última $\epsilon_{mu} = 0,0023$.

Para caracterizar las barras de FRP y brindar el anclaje suficiente en sus extremos, se cortaron tubos de acero de 450 mm de longitud, con un diámetro externo de 40 mm y un espesor de 4 mm, a los cuales se les soldaron arandelas en ambos extremos; estas arandelas tenían un diámetro interno de 12 mm y un diámetro externo de 40 mm (recomendación de la norma ASTM

D7205). Una vez que se soldó la arandela al tubo, se colocó dentro la barra de FRP que hay que ensayar y se centró por medio de las arandelas; por último, se inyectó un mortero expansivo (CRAS TX40T232) en un caso y un epóxico adherente (Hilti RE500) en el otro, para generar la adherencia en la barra y la tubería. Los resultados de las propiedades mecánicas se resumen a renglón seguido (tabla 1).

Tabla 1
Propiedades mecánicas de las barras de FRP

Propiedades mecánicas FRP		
	GFRP	CFRP
F _{fu} (MPa)=	916	2300
ε _{fu} =	0,0156	0,0180
E _f (MPa)=	55510	126658

Marco de prueba

Para realizar los ensayos de los muros de mampostería, se construyó un marco de prueba, el cual funcionaba como apoyo para los muros. A continuación se presenta un esquema del marco de prueba (figura 1).

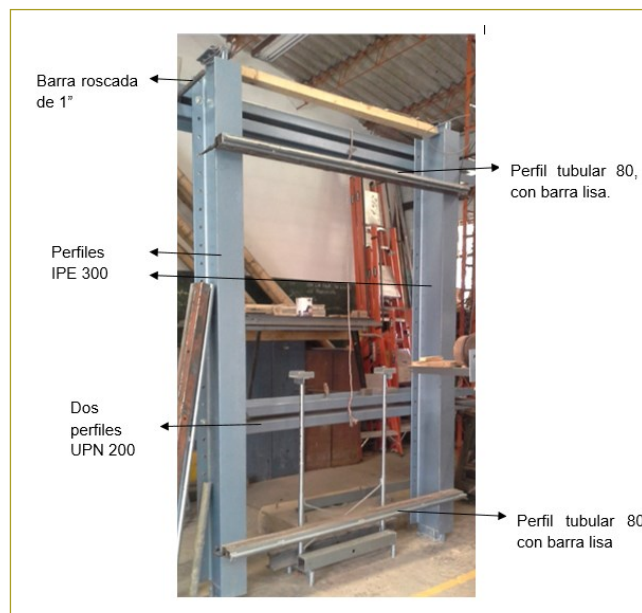


Figura 1. Marco de prueba.

Nomenclatura de muros

La nomenclatura de los muros, su ancho y el refuerzo colocado se pueden ver en la tabla siguiente (tabla 2).

Los primeros siete muros llevan la letra “G”, la cual indica “Glass” y representa el refuerzo con barras de GFRP.

Los siguientes siete muros presentan en su nomenclatura la letra “C”, que indica “Carbón” y representa el refuerzo con barras de CFRP. Los últimos dos muros muestran la letra “S”, la cual hace referencia a “STEEL” e indica que éstos se reforzaron con barras de acero convencional. Para todos los muros reforzados con FRP se utilizaron barras de 12 mm de diámetro.

Tabla 2
Nomenclatura de los muros

Muro	Nomenclatura	Ancho mm	Refuerzo
M1	M1-G	1045	4 barras de GFRP
M2	M2-G	1490	4 barras de GFRP
M3	M3-G	1345	3 barras de GFRP
M4	M4-G	745	1 barra de GFRP
M5	M5-G	890	1 barra de GFRP
M6			1 barra de GFRP
M7	M7-G	1490	1 barra de GFRP
M8	M8-C	1045	4 barras de CFRP
M9	M9-C	1490	4 barras de CFRP
M10	M10-C	1345	3 barras de CFRP
M11	M11-C	745	1 barra de CFRP
M12	M12-C	890	1 barra de CFRP
M13	M13-C	1190	1 barra de CFRP
M14	M14-C	1490	1 barra de CFRP
M15	M15-S	1490	4 barras de acero
M16	M16-S	1490	3 barras de acero

Más adelante se pueden ver los esquemas de los muros, con las dimensiones en planta y el refuerzo longitudinal, en los que se indica qué celdas van con refuerzo y *grout*, y qué tipo de refuerzo es. Los muros del 1 al 7 tienen la misma configuración geométrica y de refuerzo que los muros del 8 al 14, la diferencia radica en que los primeros llevan refuerzo en GFRP y los otros tienen refuerzos de CFRP.

Los últimos dos muros, el 15 y el 16, están reforzados con barras de acero convencional de media pulgada de diámetro, los cuales se construyeron con el fin de comparar los muros reforzados con FRP y con acero (figura 2).

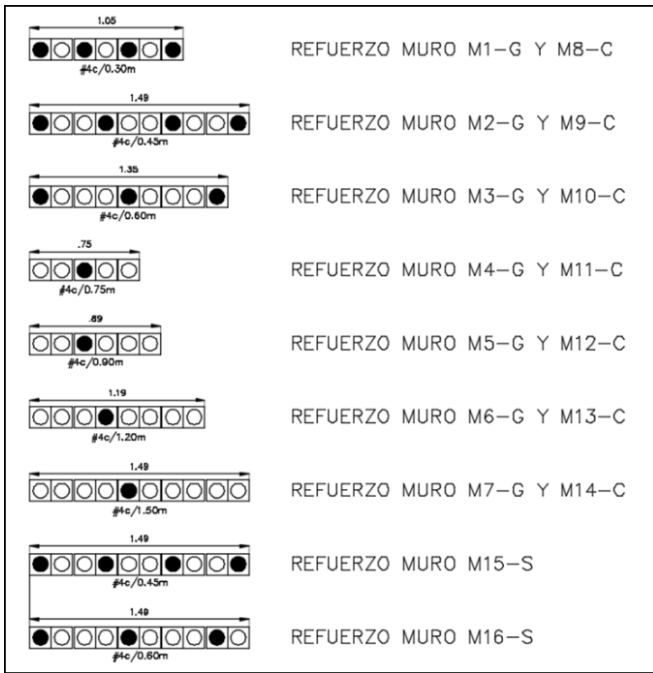


Figura 2. Configuración dimensional y de refuerzo de los muros.

Proceso constructivo

Para el soporte de los muros de mampostería se construyeron vigas de cimentación, cuyos planos se pueden observar seguidamente (figura 3).

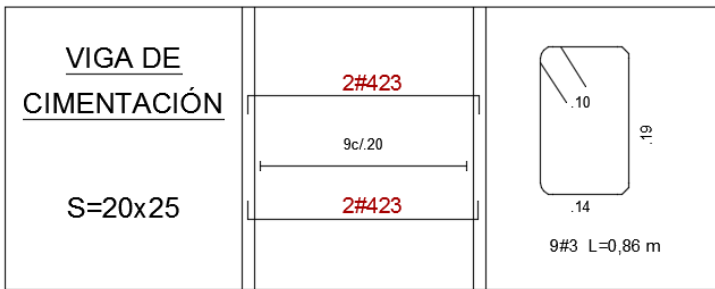


Figura 3. Esquemas del despiece de la viga de cimentación de los muros.

Después de la construcción de la viga se procedió a levantar los muros, y luego se procedió a instrumentar las barras de FRP colocando deformímetros electrónicos (*strain gauge*) con el fin de registrar las deformaciones unitarias durante el proceso de ensayo y evaluar con ellas los esfuerzos a que se veían sometidas las barras. Para evitar el contacto directo entre el *grout* de relleno y los deformímetros electrónicos, éstos se sellaron y prote-



Figura 4. Construcción de los muros.

gieron con cinta (figura 4). A continuación se muestra la instrumentación de las barras (figura 5).



Figura 5. Instrumentación de las barras.

Posteriormente, se colocó la barra dentro de la celda y se inyectó el mortero de relleno (figura 6).



Figura 6. Ubicación de la barra e inyección del mortero de relleno.

Por último, se llevó el muro al marco de prueba y se instrumentó con transductores de desplazamiento LVDT en la cara sometida a tensión, y se instrumentó

la cara a compresión del muro de mampostería mediante un *strain gauge* que se ubicaba enfrente al de la barra de FRP (figura 7).

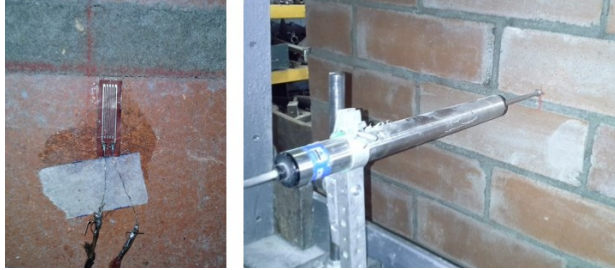


Figura 7. Instrumentación en las caras de tensión y compresión del muro.

RESISTENCIA TEÓRICA A FLEXIÓN PERPENDICULAR AL PLANO DE LA MAMPOSTERÍA

Para calcular el momento resistente ante cargas perpendiculares de la mampostería, primero se debe determinar si su modo de falla es rotura en el FRP o aplastamiento en la mampostería, dependiendo de la cantidad de refuerzo que se ponga en el muro. Si la cantidad de refuerzo es mayor que la cuantía balanceada, se espera una falla de aplastamiento en la mampostería, y en caso de que el refuerzo colocado no supere la cuantía balanceada, se espera que la falla se presente por rotura en el FRP.

Se debe tener en cuenta que la cuantía balanceada corresponde a la cantidad de refuerzo necesaria para que se alcance la rotura en el FRP simultáneamente con el aplastamiento en la mampostería.

A continuación se presentan las expresiones para calcular el momento resistente de un muro de mampostería cuando su modo de falla es aplastamiento en la mampostería y rotura en el FRP.

Momento resistente de un muro que falla por aplastamiento en la mampostería

Cuando la cuantía de refuerzo es mayor que la cuantía balanceada, la mampostería alcanza su deformación unitaria última antes que el FRP. El esquema de esfuerzos y deformaciones unitarias para aplastamiento en la mampostería se presenta en la figura siguiente (figura 8).

De la compatibilidad de deformaciones y del equilibrio de fuerzas se llega a la expresión de momento resistente que se expone en la siguiente ecuación:

$$Mn = \alpha 1 \times f' m \times \beta 1 \times c \times b \times \left(d - \frac{\beta 1 \times c}{2} \right) \quad (1)$$

Donde:

Mn : momento nominal.

$f'm$: resistencia a la compresión en la mampostería.

c : profundidad del eje neutro del muro.

b : ancho del muro

d : profundidad efectiva del muro

$\alpha 1$: relación del promedio de esfuerzos del bloque de compresiones ACI 530

$\beta 1$: factor para calcular la altura del bloque de compresiones

Momento resistente de un muro que falla por rotura en el FRP

Si la cuantía de refuerzo es menor que la cuantía balanceada, la falla se presenta por rotura en las barras de FRP, dado que alcanza su deformación unitaria última. El ACI 440.1R permite utilizar de manera conservadora la deformación unitaria última de la mampostería para el cálculo del momento resistente.

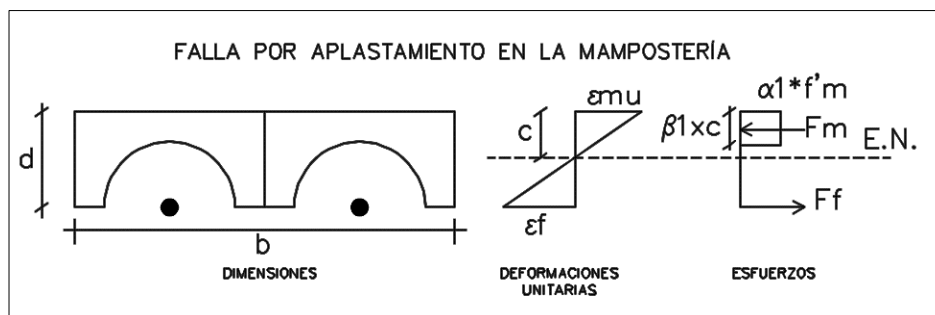


Figura 8. Esquema de esfuerzos y deformaciones unitarias para aplastamiento en la mampostería.

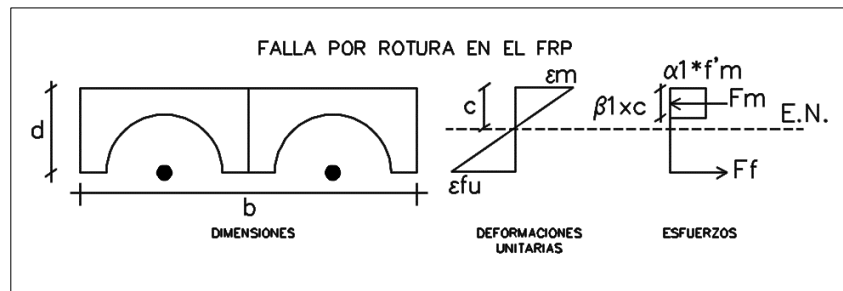


Figura 9. Esquema de esfuerzos y deformaciones unitarias para rotura en el FRP.

El esquema de esfuerzos y deformaciones unitarias para rotura en el FRP se presenta en la figura anterior (figura 9).

De la compatibilidad de deformaciones y del equilibrio de fuerzas se llega a la expresión de momento resistente que se expone en la ecuación 2:

$$Mn = Af \times f_{fu} \times \left(d - \frac{\beta 1 \times c}{2} \right) \quad (2)$$

Donde:

Af: área de refuerzo.

Ffu: resistencia a la rotura barra FRP.

En la tabla siguiente se presenta el resumen de resultados de cálculos de momentos nominales teóricos, el modo de falla y el valor del eje neutro de la sección de los catorce muros reforzados con barras de FRP (tabla 3).

CÁLCULO TEÓRICO DE LAS DEFLEXIONES

Para determinar las deflexiones en los muros, se utilizaron dos metodologías; la primera, propuesta por Branson, la cual se basa en determinar una inercia efectiva enfocándose en la rigidez, y la metodología de Bischoff, que se fundamenta en determinar una inercia efectiva enfocándose en la flexibilidad.

La determinación de la inercia efectiva con el método de Branson se muestra en la ecuación 3:

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \times \beta d \times I_g + \left(1 + \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \right) \times I_{cr} \leq 1,0 \quad (3)$$

Donde:

Ie: momento de inercia efectivo.

Mcr: momento de agrietamiento.

Tabla 3
Resultados de resistencia teórica de muros reforzados con FRP

Muro	Cant.	Af	b	d	ρ	ρb	Tipo de falla	c	Mn
		(mm ²)						(mm)	(mm)
M1-G	4#4	507	1050	72,5	0,00666	0,00123	Aplastamiento	19,33	11,53
M2-G	4#4	507	1490	72,5	0,00469	0,00123	Aplastamiento	16,63	14,31
M3-G	3#4	380	1350	72,5	0,00388	0,00123	Aplastamiento	15,31	12,03
M4-G	1#4	127	750	72,5	0,00233	0,00123	Aplastamiento	12,18	5,42
M5-G	1#4	127	890	72,5	0,00196	0,00123	Aplastamiento	11,27	5,98
M6-G	1#4	127	1190	72,5	0,00147	0,00123	Aplastamiento	9,85	7,05
M7-G	1#4	127	1495	72,5	0,00117	0,00123	Rotura de FRP	9,32	7,98
M8-C	4#4	507	1050	72,5	0,00666	0,00043	Aplastamiento	27,01	15,34
M9-C	4#4	507	1490	72,5	0,00469	0,00043	Aplastamiento	23,53	19,39
M10-C	3#4	380	1350	72,5	0,00388	0,00043	Aplastamiento	21,78	16,45
M11-C	1#4	127	750	72,5	0,00233	0,00043	Aplastamiento	17,56	7,56
M12-C	1#4	127	890	72,5	0,00196	0,00043	Aplastamiento	16,30	8,39
M13-C	1#4	127	1190	72,5	0,00147	0,00043	Aplastamiento	14,34	9,99
M14-C	1#4	127	1490	72,5	0,00117	0,00043	Aplastamiento	12,97	11,41

Ma: momento actuante.

Ig: inercia del muro.

Icr: inercia con la sección agrietada del muro.

Bd: factor que tiene en cuenta la adherencia entre la barra y el concreto.

Para determinar la inercia efectiva por el método de Bischoff, se aplica la siguiente ecuación (ecuación 4).

$$le = \frac{lcr}{1 - \gamma \times \left(\frac{Mcr}{Ma}\right)^2 \times \left(1 - \frac{lcr}{lg}\right)} \quad (4)$$

Donde:

γ : factor que depende de la carga y de las condiciones de contorno en la zona no fisurada del miembro.

RESULTADOS

De los resultados obtenidos de los LVDT y la carga reportada en la celda de carga, se construyeron las gráficas de los muros. En la figura siguiente se presenta la curva de carga contra deflexión del muro M2-G, donde se pueden observar los ciclos de carga y descarga que se realizaron durante el ensayo; en las ordenadas se grafican las cargas y en las abscisas, las deflexiones en el

centro de la altura del muro. Como se puede observar, la gráfica tiene una pendiente alta en el primero y parte del segundo ciclo (donde el muro aún no se ha fisurado). Una vez que el muro se fisura la pendiente disminuye y ésta se mantiene hasta la falla del muro. También se puede apreciar que después que se descarga el muro éste tiende a recuperar su posición inicial, simulando un comportamiento elástico (figura 10).

A continuación se presentan las curvas envolventes de todos los muros, reforzados con barras de GFRP y CFRP.

Muros reforzados con barras de GFRP

Las curvas de la envolvente de momento contra deflexión se presentan más adelante (figura 11). Se muestran los resultados de todos los muros reforzados con barras de GFRP, así como muros que están reforzados con barras de acero convencional para comparar el comportamiento en una misma escala.

Igualmente, se puede observar que en las curvas para todos los muros de mampostería reforzados con FRP se presenta una recta con una pendiente alta hasta el momento de agrietamiento, de allí en adelante la pendiente disminuye y se mantiene hasta la falla del muro con un comportamiento lineal elástico.

En las curvas de los muros que contenían acero se pueden observar tres pendientes: la primera se presenta

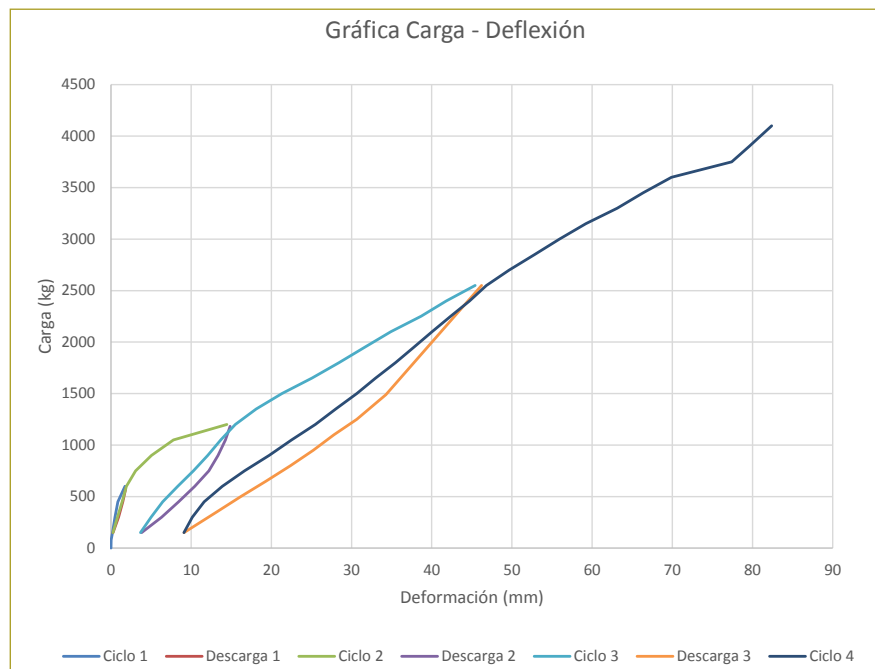


Figura 10. Curva de carga contra deflexión muro M2-G.

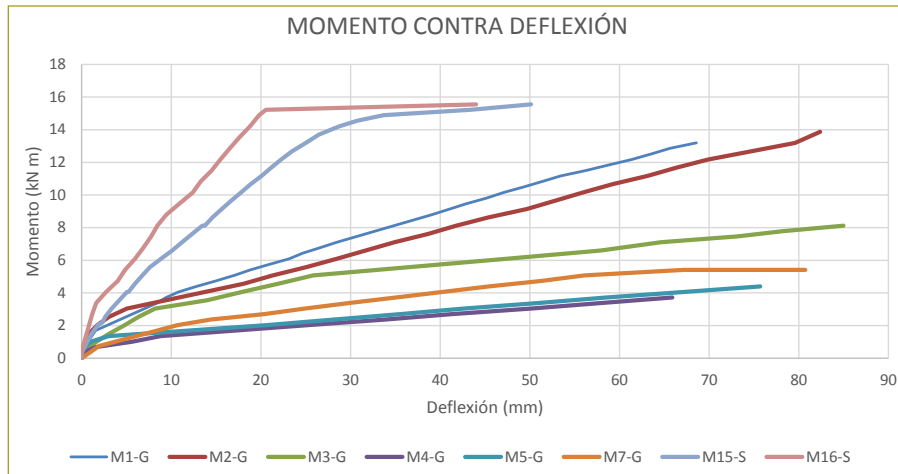


Figura 11. Curvas de momento contra deflexión de los muros reforzados con GFRP.

hasta el momento de agrietamiento del muro, la segunda hasta el punto de fluencia del acero y de allí en adelante una recta sin pendiente hasta la falla del muro.

el momento de agrietamiento y otra pendiente menor a partir de dicho momento.

A continuación se presentan los modos de falla típicos en los muros (figura 13).

Muros reforzados con barras de GFRP

Con base en los resultados obtenidos de los deformímetros electrónicos y la carga registrada en la celda de carga se construyó la envolvente de carga de los muros (figura 12). Se muestran los resultados de todos los muros reforzados con barras de CFRP, así como los muros que están reforzados con barras de acero convencional para comparar el comportamiento en una misma escala. Al igual que los muros reforzados con barras de GFRP, en las gráficas se registra un comportamiento linealmente elástico hasta la falla, con una pendiente hasta

Comparación de los resultados

En la figura siguiente se aprecian las relaciones entre los momentos calculados teóricamente y los experimentales. La recta representa el valor teórico del momento y los puntos representan los resultados experimentales.

Las observaciones 1 y 2 se refieren a:

- *Observación 1.* Indica que el ensayo fue adecuado y que los resultados se admiten, aunque el muro M9-C tuvo una carga experimental un poco inferior a la

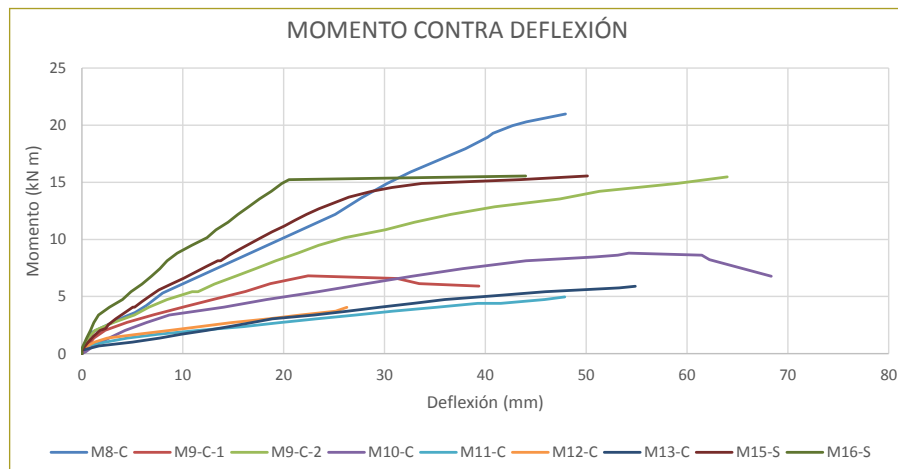


Figura 12. Curvas de momento contra deflexión de los muros reforzados con CFRP.



Figura 13. Modos de falla típicos en los muros.

carga teórica y esto se debe a que durante el ensayo se alcanzó una deformación muy grande (la cual ofreció inestabilidad y posible colapso del muro) y por motivos de seguridad no se continuó aumentando la carga.

- *Observación 2.* Hace referencia a que el ensayo no alcanzó la carga teórica debido a que posiblemente no hubo suficiente adherencia entre los materiales (*grout* de relleno, barras de FRP y unidades de arcilla).

Cabe anotar que más adelante se muestran los resultados de resistencia última de los muros, y que el 57 % de ellos no alcanzó el resultado esperado, por los motivos que se presentan en las conclusiones del documento. Sin embargo, los muros se revisaron en estados límites de servicio, donde su carga teórica resistente se factora por 0,625 (lo cual simula las combinaciones de servicio), y se presenta la gráfica de momento contra deflexión para uno de ellos, resultados que se ajustan

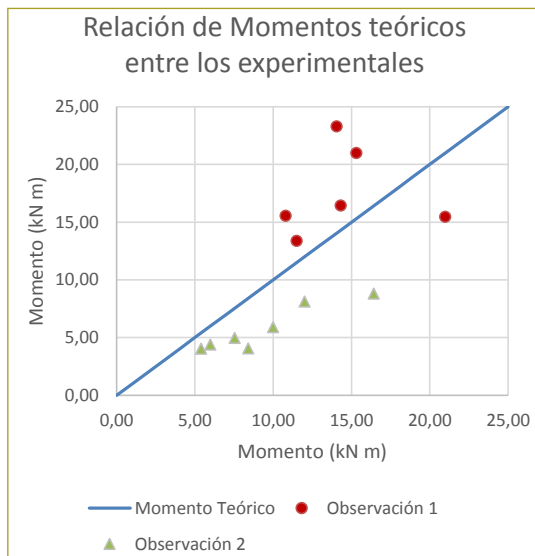


Figura 14. Momentos experimentales máximos de muros en relación con los teóricos.

satisfactoriamente a los teóricos para todos los muros (figura 14).

Comparación de deflexiones teóricas contra experimentales

Para comparar las deflexiones calculadas teóricamente contra las experimentales, se grafican en un mismo sistema coordinado la curva experimental y la curva teórica de momento flector contra la deflexión en el centro del muro.

La curva experimental se obtuvo de los resultados leídos en los transductores de desplazamiento (LDVT) y de la carga aplicada en los tercios de la luz mediante el gato mecánico. Para la construcción de la curva teórica se utilizó la metodología del cálculo de deflexiones propuesta por Branson, al igual que el método del cálculo de la inercia efectiva propuesto por Bischoff.

A continuación se presentan las curvas teóricas por el método de Branson y por la metodología de Bischoff, y la curva experimental del muro M1-G, el cual está reforzado con barras GFRP (figura 15).

La curva experimental se ajusta bien a los resultados teóricos propuestos por el método de Branson, y está por encima de la curva teórica propuesta por Bischoff.

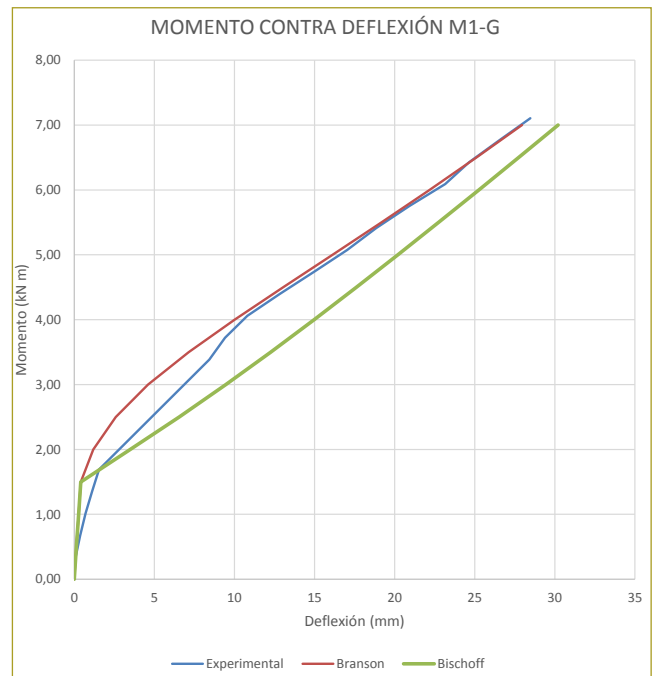


Figura 15. Curva experimental y curva teórica (Branson y Bischoff) de momento contra deflexión del muro de mampostería de concreto M1-G.

CONCLUSIONES

- Como se muestra tanto teórica como experimentalmente, los muros reforzados con barras de FRP experimentan deflexiones mayores que los muros reforzados con acero convencional (debido a su bajo módulo de elasticidad). Por tal motivo, se debe prestar especial atención a los estados límites de servicio en el diseño de estos muros, ya que las deflexiones son altas en estados de carga bajos.
- Los momentos o cargas resistentes teóricas estuvieron por encima de los resultados experimentales en la mayoría de los ensayos, debió posiblemente a dos motivos: primero a que las barras tenían un corrugado con una capa de arena, por lo que la adherencia entre el mortero de relleno y la barra se perdía en cierto estado de carga, lo cual hacía que el muro perdiera resistencia, o como segunda hipótesis podría pensarse que la adherencia entre el *grout* de relleno y la unidad de mampostería posiblemente no era la más óptima. Y segundo, las deflexiones en estados de carga altos (tercer y cuarto ciclo de carga) presentaban deformaciones muy altas en el muro, lo cual hacía que los ladrillos se separaran del mortero de pega y que el muro no pudiera absorber más carga.
- Cuando se compara el diseño de muros con acero convencional y el de muros reforzados con FRP se debe prestar especial atención a los estados límites de servicio, ya que los muros reforzados con FRP presentan deflexiones mayores y, por lo tanto, anchos de fisuras mayores que los de acero bajo cargas relativamente bajas (para el primer y segundo ciclo de carga). En cuanto al estado límite de resistencia, la mampostería reforzada con FRP podría tener valores mayores que si se reforzara con acero convencional y si se mejorara la adherencia entre mortero de pega y las unidades de arcilla, y entre barras y mortero de relleno; esto demuestran los cálculos teóricos.
- Los muros reforzados con acero tienen deflexiones menores que los muros reforzados con FRP para un mismo estado de carga, y además presentan menor

cantidad de fisuras y anchos de fisuras inferiores a los muros reforzados con barras de FRP.

- Los resultados experimentales muestran que los muros con cuantías superiores a 0,0047 alcanzan momentos similares a los momentos teóricos, esto para los muros reforzados con GFRP y con CFRP. Los muros que tenían cuantías inferiores estuvieron lejos de las cargas teóricas, lo cual indica que aun cuando el modo de falla sea aplastamiento en la mampostería, se debería tener una mínima cantidad de refuerzo para que el comportamiento sea el que indica la teoría.
- Los muros reforzados con una sola barra fueron los que indicaron un comportamiento bastante inferior al esperado por los cálculos teóricos. Claramente, estos muros eran los que tenían las cuantías más bajas y fueron los que tuvieron un comportamiento inferior al teórico en cuanto a resistencia.
- La metodología de Branson para el cálculo de las deflexiones de los muros de esta investigación subestima el valor de la deflexión de los muros, y aunque la metodología de Bischoff ajusta un poco mejor los resultados, las deflexiones experimentales de los muros resultaron mayores que las deflexiones teóricas calculadas mediante estos dos métodos.

REFERENCIAS

- Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10). Bogotá: AIS.
- American Concrete Institute, ACI Committee 440.
- American Concrete Institute, ACI Committee 530.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2003b). Método de ensayo para determinar la resistencia a la compresión de muretes de mampostería (NTC 3495). Bogotá, D.C.: Icontec.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (2010). Concretos. Ensayo de resistencia a la compresión de cilindros normales de concreto (NTC 673). Bogotá, D.C.: Icontec.
- American Society for Testing and Materials (2011). Tensile Properties of Fiber Reinforced Polymer Matrix Composite Bars (ASTM D7205).
- Nanni, A., Luca A. & Zadeh, H. (2014). Reinforced Concrete with FRP Bars Mechanics and Design. CRC Press. Taylor & Francis Group.

Evaluación de la resistencia a compresión en morteros de cal, sometidos a diferentes condiciones de curado

Compression resistance assessment in lime mortars, exposed to different curing conditions

ANDRÉS FELIPE ESPITIA MORALES¹ - NANCY TORRES CASTELLANOS²

1. Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Estructuras.

2. Magíster en Estructuras y doctora en Ingeniería, Ciencia y Tecnología de Materiales. Profesora asociada de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

andres.espitia-m@mail.escuelaing.edu.co - nancy.torres@escuelaing.edu.co

Recibido: 10/06/2018 Aceptado: 30/07/2018

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

Resumen

En este artículo se presenta la evaluación de la resistencia a compresión en morteros de cal, sometidos a diferentes condiciones de curado y diferentes edades de ensayo. En total, se evaluaron las propiedades mecánicas sobre tres tipos de morteros: uno con cal, y los restantes adicionados con puzolanas como metacaolín y polvo de ladrillo. Adicionalmente, en cada uno de los componentes de los morteros se evaluó la composición química mediante el ensayo de fluorescencia de rayos X. La resistencia a compresión se evaluó a cuatro edades, utilizando tres ambientes de curado: cámara de humedad y temperatura, cámara de carbonatación acelerada y condiciones atmosféricas. Los resultados mostraron que las muestras curadas en cámara de carbonatación presentaron resistencias superiores a las de los especímenes curados en cámara de humedad, debido a que los morteros de cal aumentan su resistencia con la carbonatación del $\text{Ca}(\text{OH})_2$ de la cal. Así mismo, se encontró que la resistencia de las probetas expuestas a condiciones atmosféricas resultó inferior a las curadas con las otras metodologías. A partir de la investigación, se destaca que el uso de puzolanas en morteros de cal mejora las propiedades mecánicas, lo cual resulta atractivo para la rehabilitación de edificaciones patrimoniales y que el tipo de curado se encuentra ligado al desarrollo de la resistencia.

Palabras claves: mortero, cal, metacaolín, polvo de ladrillo, carbonatación, resistencia a compresión.

Abstract

This article shows the compression resistance assessment in lime mortars, exposed to different curing conditions and trial age. The mechanical properties of three types of mortars were assessed: one of lime, and the rest with added pozzolan such as metakaolin and brick dust. Additionally, the chemical composition of the mortars' components was evaluated through an X-ray fluorescence trial. Compression resistance was assessed at four different ages, using three curing environments: moisture chamber and temperatura, accelerated carbonation chamber, and atmospheric conditions. Results showed that samples cured in carbonation chamber had stronger resistances than those cured in moisture chambers, due to lime mortars increasing their resistance with $\text{Ca}(\text{OH})_2$ carbonation of lime. Likewise, it was found that test tubes exposed to atmospheric conditions showed a weaker resistance than the other two methods. From this research, it can be highlighted that pozzolan-added lime mortars improve their mechanical properties, which is attractive for rehabilitating patrimonial buildings since the curing method is linked to resistance development.

Keywords: mortar, lime, metakalin, brick dust, carbonation, compression resistance.

INTRODUCCIÓN

Los morteros de cal son materiales que se han utilizado con frecuencia a lo largo de la historia y cuyo uso se expandió desde la antigüedad (Luque, Cultrone & Sebastián, 2010). De este modo, la mayoría de las edificaciones construidas antes del siglo XX contienen morteros de cal (Pozo-Antonio, 2015). Sin embargo, con la aparición del cemento Pórtland en 1824 y sus bondades, como endurecimiento rápido y alta resistencia mecánica, el empleo de aglomerantes de cal disminuyó (Álvarez y González, 1994; Radonjic et al., 2001, citados por Luque et al., 2010).

Muchas de estas edificaciones han comenzado a presentar deterioro por la incidencia de diferentes factores, entre ellos cambio en el uso de la estructura (Mercado, 2007; Peñaranda, 2011), demolición parcial de los inmuebles (Peñaranda, 2011), asentamientos en la cimentación (Maldonado, Martín & Maldonado, 2011), empleo de materiales incompatibles con los originales (Lourenço, Van Hees, Fernandes & Lubelli, 2014), o simplemente por los efectos del paso del tiempo en la construcción (Maravelaki-Kalaitzaki, Bakolas, Karatasios & Kilikoglou, 2005).

Es así como durante buena parte del siglo XX los morteros de cemento se destinaron para restauración (Vejmelková, Keppert, Keršner, Rovnaníková & Černý, 2012). Con el tiempo, varios autores indicaron que la utilización de morteros de cemento para rehabilitaciones patrimoniales generaba algunos problemas en las estructuras, entre ellos cristalización de sales y baja flexibilidad de los morteros de cemento (Pozo-Antonio, 2015). Por consiguiente, en algunos inmuebles considerados históricos se ha observado que el proceso de deterioro se acelera con las intervenciones de reparación (Gleize, Motta, Silva & Román, 2009; Vejmeková et al., 2012), debido a la incompatibilidad entre los morteros de cemento y los materiales originales (Lanas & Álvarez, 2003).

Ciertamente, al momento de rehabilitar una edificación patrimonial, el punto de partida para una adecuada selección de los materiales de reparación radica en analizar los materiales existentes (Forster, 2012; Gleize et al., 2009; Maravelaki-Kalaitzaki et al., 2005). Por ende, es importante considerar que las estructuras históricas poseen características constructivas y materiales que difieren de los modernos (Iucolano, Liguori & Colella, 2013). Aparte de esto, los materiales presentan

variaciones en su composición, por lo que hay dudas relacionadas con las condiciones ambientales a las que se encuentran expuestos (Ball, El-Turki & Allen, 2011).

Con respecto a los morteros de cal, tienen ciertas ventajas: compatibilidad físico-química con aglomerantes antiguos y mayor plasticidad, lo cual les permite acomodarse a las deformaciones de la mampostería (Lanas & Álvarez, 2003; Pozo-Antonio, 2015). Por otro lado, existen ciertos inconvenientes al utilizar aglomerantes de cal, entre los que se encuentran baja resistencia, endurecimiento lento, alta retracción y baja cohesión entre los morteros y las unidades de mampostería. Para mitigar dichos problemas, se utilizan adiciones ricas en aluminio-silicatos como metacaolín o polvo de ladrillo (Nežerka, Antoš, Litoš, Tesárek & Zeman, 2016).

Por otra parte, el proceso de endurecimiento de los morteros de cal se desarrolla a partir de la reacción entre el CO_2 presente en la atmósfera, con el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ de la cal (Pavlík, Benešová, Matiašovský & Pavlíková, 2012), el cual se transforma en CaCO_3 (Arizzi, Martínez, Cultrone & Benavente, 2011; Luque et al., 2010). De este modo, la tasa de carbonatación resulta ser un factor decisivo que influye en la resistencia y durabilidad de estas mezclas (Arizzi et al., 2011; El-Turki, Ball & Geoffrey, 2009; Pavlík et al., 2012), debido a que la reacción que se presenta genera modificaciones en la estructura de los morteros (Arandigoyen & Álvarez, 2006; Cazalla, 2002). Al parecer, durante el proceso hay un incremento en la masa y el volumen de las partículas endurecidas (Pavlík et al., 2012). Adicionalmente, se ha observado que dicho fenómeno se inicia desde la zona exterior y va hasta la zona interna de los aglomerantes (Arizzi et al., 2011).

De acuerdo con lo anterior, a escala internacional se han hecho varias investigaciones en morteros de cal, en las que se ha encontrado que el desarrollo de la resistencia está relacionado con la calidad de la cal (Lanas & Álvarez, 2003), dado que ésta influye en las propiedades mecánicas e hidráulicas de las mezclas (Vejmelková et al., 2012). También se ha observado que las tasas de endurecimiento de estos morteros son bajas, lo cual se refleja en la evolución de las propiedades mecánicas (Moropoulou, Bakolas, Moundoulas, Aggelakopoulou & Anagnostopoulou, 2005). Esto se debe a que la resistencia máxima que alcanzan estos aglomerantes se encuentra ligada con la presencia de portlandita sin

carbonatar (Lanas & Álvarez, 2003). Además de esto, la rigidez de los morteros aumenta durante la hidratación de los componentes hidráulicos de los materiales. Por tal razón, las condiciones de curado influyen en la resistencia mecánica, por las reacciones químicas que se presentan (Pozo-Antonio, 2015). Así mismo, a medida que disminuye la relación cal/agregado la resistencia decrece (Lanas & Álvarez, 2003), por lo que los morteros con mayores contenidos de cal presentan mayores resistencias debido a que son más porosos, lo cual facilita el proceso de carbonatación y por ende, el desarrollo de las propiedades mecánicas (Lanas, Pérez Bernal, Bello & Álvarez, 2006).

Como se mencionó anteriormente, al utilizar adiciones ricas en aluminosilicatos se pueden mitigar algunos problemas que se registran en los morteros de cal. Entre dichas adiciones se encuentra el metacaolín, material que al emplearse en morteros presenta algunas ventajas como aumento de resistencia mecánica, mejora de resistencia ante ataques químicos, incremento en la durabilidad, disminución de retracción por fraguado (Cazalla, 2002; Siddique, 2008). Por consiguiente, en morteros de cal adicionados con metacaolín se han observado propiedades mecánicas y microestructurales compatibles con las encontradas en materiales tradicionales (Vejmelková et al., 2012), por lo que pueden ser útiles para rehabilitaciones de mampostería (Aggelakopoulou, Bakolas & Moropoulou, 2011).

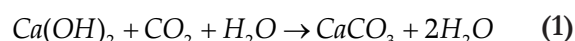
Por otra parte, en algunos estudios se han evidenciado caídas de resistencia a largo plazo en este tipo de morteros, lo cual se atribuye a la aparición de microfisuras por la retracción de las mezclas (Aggelakopoulou et al., 2011; Velosa, Rocha & Veiga, 2009). Otro factor relevante es el tipo de metacaolín, el cual puede influir en las propiedades de los morteros, como en el caso de Velosa et al. (2009), quienes encontraron que los metacaolines ricos en caolinita y alúmina pueden dar lugar a mezclas con resistencias superiores.

Otro material que se ha utilizado en morteros de cal es el polvo de ladrillo, el cual puede traer beneficios económicos y ambientales, considerando que éste tiene alta resistencia a la degradación, dificultando las actividades de acondicionamiento de desperdicios industriales (Matias, Faria & Torres, 2008). Adicionalmente, en algunos morteros históricos se han identificado partículas de ladrillo triturado. Incluso el arquitecto romano Vitruvio, en su obra *Diez libros de arquitectura*, recomendaba añadir

una porción de ladrillos triturados en los morteros, con el objetivo de aumentar su durabilidad y resistencia (Nežerka et al., 2016). Autores como Navrátilová Rovnaníková (2016), Matias et al. (2008) y Nežerka et al. (2016) observaron que la adición de polvo de ladrillo en las mezclas mejoraba las propiedades mecánicas, lo cual puede atribuirse a la reducción de fisuras por efectos de retracción, debido a la presencia de los granos de ladrillo (Nežerka et al., 2016), por lo que este tipo de aglomerantes puede ser aceptable para morteros de reparación (Matias et al., 2008).

Carbonatación en morteros de cal

El proceso de carbonatación de los morteros incide en su tasa de endurecimiento, durabilidad y la resistencia de éstos (Pavlík et al., 2012). Adicionalmente, durante este fenómeno, en general se presentan cinco etapas (Arandigoyen & Álvarez, 2006; Papadakis et al., 1991, citados por Cazalla, 2002; Pavlík et al., 2012): difusión del CO_2 en la mezcla, condensación de agua en los poros, disolución del $\text{Ca}(\text{OH})_2$, disolución del CO_2 en la solución de poros, finalizando con la precipitación de CaCO_3 . En resumen, la carbonatación se representa como la transformación de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en CaCO_3 , debido a la presencia de CO_2 . La ecuación que describe el proceso completo es la siguiente:



Reacciones que se producen entre el metacaolín y la cal

Dado que el metacaolín es un producto a base de sílice y alúmina, al mezclarlo con la cal y agua se presenta una reacción entre los componentes de la puzolana y el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ de la cal. De esta forma, se producen silicatos cálcicos hidratados (CSH) y productos cristalinos que incluyen aluminato cálcico hidratado (CAH) y aluminosilicatos hidratados (Siddique, 2008).

Reacciones que se producen entre el polvo de ladrillo y la cal

La reactividad de la puzolana puede verse afectada por diferentes factores: cantidad de sílice y alúmina, temperatura de cocción de los materiales cerámicos,

cantidad y tipo de arcilla que conforman las piezas cerámicas, granulometría de la adición y la finura del material triturado. Por consiguiente, cuando se mezcla el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ de la cal con agua y los componentes silico-aluminosos de los elementos cerámicos, se presenta una reacción que da origen a silicatos de calcio y aluminatos de calcio. Sin embargo, algunas investigaciones indican que la reacción puzolánica depende de la reacción del sílice y la alúmina con el CaO de la cal (Matias, Faria & Torres, 2014). Lo anterior resulta análogo con el fenómeno químico que se presenta entre el metacaolín y la cal, al ser hidratados con agua.

En este artículo se presenta un estudio realizado en la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito sobre la evolución de la resistencia a compresión, en morteros de cal, sometidos a tres ambientes de curado: cámara de humedad y temperatura, cámara de carbonatación acelerada y condiciones atmosféricas. También se evalúa el comportamiento mecánico de mezclas adicionadas con metacaolín (MK) y polvo de ladrillo (PL).

MATERIALES Y METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Para el estudio se adquirieron la cal (hidráulica) y la arena de peña en la ferretería La Concordia, ubicada en el centro histórico de Bogotá. El metacaolín (Fortacret) usado como adición lo suministró la empresa colombiana Insumos Industriales Corona, mientras que el polvo de ladrillo (tamaño máximo de 300 mm) provenía de bloques número cinco, no estructurales, correspondientes a residuos de ensayos prestados por el servicio externo de los laboratorios de la Escuela Colombiana de Ingeniería. Éstos se fragmentaron inicialmente utilizando una trituradora (figura 1), y después los trozos resultantes se pulverizaron en la máquina de Los Ángeles. El polvo obtenido se tamizó empleando el tamiz de 300 mm. La composición química de los materiales se determinó mediante fluorescencia de rayos X, utilizando un espectrómetro de fluorescencia de rayos X, MagixPro PW-2440 (WDXRF). Este ensayo lo realizó el Laboratorio de Fluorescencia de Rayos X de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Además, en la arena y en el polvo de ladrillo se efectuaron análisis granulométricos.

A continuación se indican las proporciones en peso utilizadas para la elaboración de las mezclas. Adicionalmente, para determinar la cantidad de agua, se



Figura 1. Triturado de ladrillos.
Fuente: Los autores.

buscó obtener una fluidez cercana al 100 %. Para esto, se efectuaron ensayos de fluidez de acuerdo con el procedimiento descrito en la norma NTC 111, debido a que no existe una normativa nacional que se aplique para la tipología de morteros de estudio (tabla 1). Así mismo, se presentan las cantidades de materiales para un metro cúbico de cada mortero (tabla 2).

Tabla 1
Proporciones de los morteros

Mortero	Denominación	Proporción
Cal : Arena	MCA	1:3
Cal : Arena : Metacaolín	MMK	1:3:0,2
Cal : Arena : Polvo de Ladrillo	MPL	1:3:1

Fuente: Los autores.

Tabla 2
Dosificación de los morteros por metro cúbico

Mortero	Cal (kg)	Arena (kg)	MK (kg)	PL (kg)	Agua (kg)	Fluidez (%)
MCA	450	1350	-	-	405	101
MMK	430	1290	86	-	452	97
MPL	360	1080	-	360	454	100

Fuente: Los autores.

Los especímenes de ensayo consistieron en cubos de mortero de 50 mm de arista. Para su fabricación, se tomó como referencia el procedimiento descrito en la NTC 220, para lo cual se mezclaron los materiales y se colocaron las mezclas en moldes cúbicos. Éstos se dejaron por tres días en una cámara de humedad y temperatura, en las siguientes condiciones controladas: temperatura de 25 ± 2 °C y humedad relativa de 55 ± 5 %.

Posteriormente, se retiraron las muestras de los moldes y se procedió a su curado. Para esto, se utilizaron tres ambientes de curado: el primero consistió en la cámara de humedad y temperatura; el segundo correspondió a una cámara de carbonatación acelerada (figura 2), con los siguientes parámetros controlados: temperatura de 23 °C, humedad relativa de 65 % y concentración de CO₂ de 5 %. Este proceso se desarrolló para acelerar el proceso de envejecimiento de las mezclas y de ganancia de resistencia. El tercer ambiente de curado fue en condiciones atmosféricas, para lo cual las probetas se dejaron bajo una carpa al aire libre. De este modo, se buscaba simular las condiciones ambientales a las que pueden verse sometidos los morteros, dado que no pueden asegurarse las condiciones de laboratorio durante las actividades de rehabilitación de una edificación. Para este último ambiente de curado se fabricaron tres morteros adicionados con metacaolín y uno de cal y arena, con las mismas dosificaciones de sus homólogos.

Los ensayos de resistencia a compresión se desarrollaron en una máquina Universal Shimadzu de mil kilonewtons de capacidad. Para esto, se ensayaron tres cubos para las siguientes edades: 7, 28, 60 y 90 días para los especímenes curados en las cámaras de humedad y temperatura y de carbonatación acelerada. Con respecto a las probetas curadas en condiciones atmosféricas, las edades de ensayo fueron: 7, 28, 60 y 165 días.



Figura 2. Cámara de carbonatación acelerada.

Fuente: Los autores.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Propiedades químicas y físicas de los materiales

A renglón seguido se presenta la composición química de la cal, el metacaolín (MK) y el polvo de ladrillo (PL) (tabla 3). Adicionalmente, se muestran la curva granulométrica de la arena y la del polvo (figuras 3 y 4).

Tabla 3
Composición química de los materiales

Cal		MK		PL	
Elemento	%	Elemento	%	Elemento	%
CaO	86,834	SiO ₂	58,040	SiO ₂	67,270
SiO ₂	6,666	Al ₂ O ₃	38,140	Al ₂ O ₃	23,130
Al ₂ O ₃	2,355	Fe ₂ O ₃	1,360	Fe ₂ O ₃	5,560
Fe ₂ O ₃	1,876	TiO ₂	1,230	K ₂ O	1,590
MgO	0,877	K ₂ O	0,590	TiO ₂	1,080
SO ₃	0,600	MgO	0,200	MgO	0,430
K ₂ O	0,240	CaO	0,140	Na ₂ O	0,350
TiO ₂	0,215	Na ₂ O	0,070	CaO	0,170
P ₂ O ₅	0,156	SO ₃	0,050	Ba	0,140
SrO	0,086	Ba	0,050	P ₂ O ₅	0,080
MnO	0,057	P ₂ O ₅	0,040	SO ₃	0,060
ZnO	0,025	Zr	0,040	V	0,030
				Zr	0,030
				Cr	0,020
				Zn	0,020
				Sr	0,020
				Cl	0,010
				MnO	0,010

Fuente: Informes XRF-148-16, XRF-024-17 y XRF-228-17 del Laboratorio de Fluorescencia de Rayos X de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Modificado: Los autores.

Se observa que la cal tiene un alto contenido de CaO, el cual se espera que al hidratarse se transforme en Ca(OH)₂, y que a su vez se precipite en CaCO₃ durante el proceso de carbonatación. De igual manera, se aprecia que el material presenta cierto contenido de SiO₂ y Al₂O₃, compuestos que intervienen en la formación de CSH y CAH al hidratar la cal.

En relación con el metacaolín, se aprecia que se compone principalmente por SiO₂ y Al₂O₃, en un orden de 96,18 %. De este modo, al mezclar la adición con cal y agua, los componentes de la puzolana intervienen en la formación de CSH, CAH y aluminosilicatos hidratados. La composición química del metacaolín resultó similar

a la registrada por autores como Aggelakopoulou et al. (2011), Velosa et al. (2009) y Vejmelková et al. (2012).

Con respecto al polvo de ladrillo, se observa que en mayor grado se encuentra compuesto por SiO_2 y Al_2O_3 , del orden de 90,40 %. Estos compuestos, al mezclarse con la cal y agua, intervendrán en la formación de silicatos de calcio y aluminatos de calcio.

Resistencia a compresión

A renglón seguido se presentan los resultados de resistencia a compresión de las muestras curadas en la cámara de humedad (NC) y en la cámara de carbonatación acelerada (C), a 7, 28, 60 y 90 días. El ensayo se desarrolló en tres especímenes para cada edad.

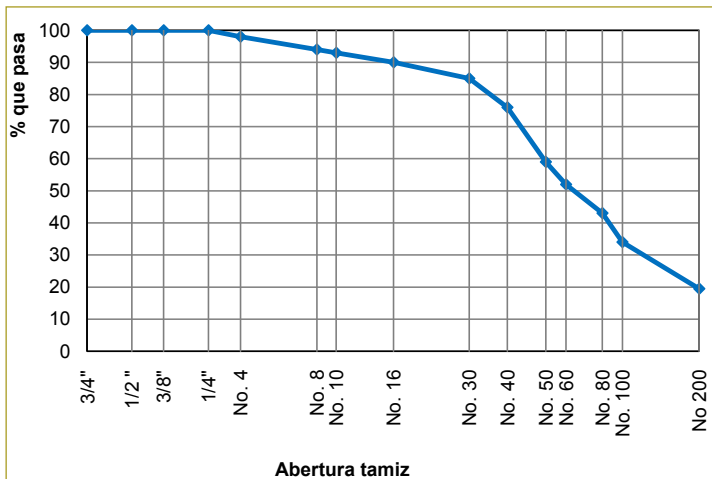


Figura 3. Curva granulométrica de la arena.

Fuente: Informe IG-024-16 del Laboratorio de Suelos y Pavimentos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

Modificado: Los autores.

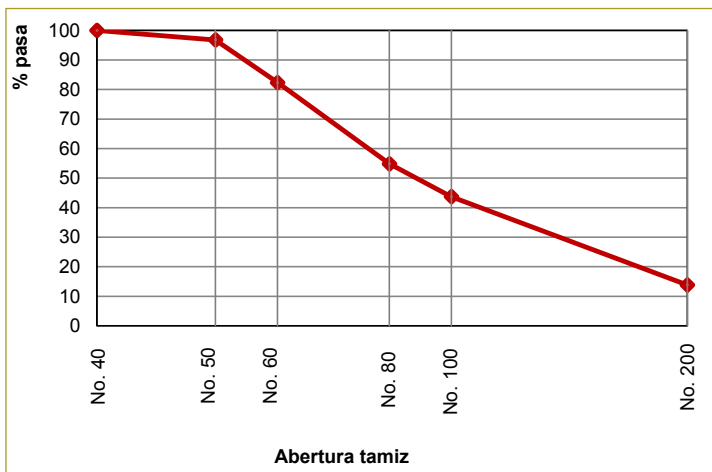


Figura 4. Curva granulométrica del polvo de ladrillo.

Fuente: Los autores.

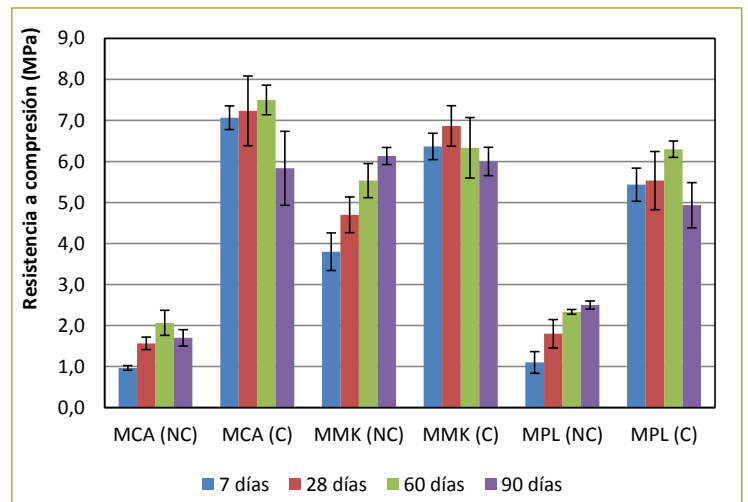


Figura 5. Evolución de la resistencia a compresión en morteros curados en cámara de humedad y cámara de carbonatación acelerada.

Fuente: Los autores.

Al evaluarse los resultados, se observa un incremento considerable de resistencia en la mezcla MCA (C) con respecto al mortero MCA (NC). A 7, 28, 60 y 90 días, dicho aumento fue de 631, 362, 263 y 243 %, respectivamente. Este fenómeno ratifica la tasa baja de endurecimiento de este tipo de mortero, tal como afirmaron Moropoulou et al. (2005). De igual manera, en los cubos carbonatados se observó una caída de resistencia del 22 %, autores como Velosa et al. (2009) y Aggelakopoulou (2011) atribuyen tal decremento a la aparición de microfisuras por la retracción del mortero. En las probetas sin carbonatar la baja de resistencia fue de 18 %, lo cual puede deberse a la presencia de portlandita sin carbonatar, según lo evidenciado por Lanás y Álvarez (2003).

En el mortero MMK (C), al comparar las resistencias con las de la mezcla MMK (NC), resultaron superiores en 68, 46 y 14 % a 7, 28 y 60 días; a 90 días resultó menor en 2%. Igualmente, la resistencia de las muestras carbonatadas registró un descenso de 13 %, fenómeno que también se observó en las investigaciones de Velosa et al. (2009) y Aggelakopoulou (2011), debido a la aparición de microfisuras por retracción.

Por otro lado, las resistencias de los morteros MMK (NC) resultaron superiores entre 168 y 293 %, con respecto a las registradas en los elementos con mortero MCA (NC). Así mismo, en la mezcla MMK (C) las resistencias fueron menores que las presentadas en el mortero MCA (C), entre 5 y 16 % durante los

primeros 60 días. A 90 días, dicho valor resultó superior un 3 %.

Las resistencias del mortero MPL (C) resultaron mayores en 394, 207, 170 y 97 % a 7, 28, 60 y 90 días, respectivamente, con respecto a las evidenciadas en la mezcla MPL (NC). Para el caso de las muestras carbonatadas, se observó un decremento de 22 % en la resistencia, paralelo al apreciado en el mortero MCA (C). Fuera de lo anterior, las resistencias de los especímenes MMK (NC) resultaron mayores entre 14 y 47 % en relación con la de los ejemplares MCA (NC). En la mezcla MMK (NC), las resistencias fueron menores entre 16 y 24 %, con respecto al mortero MCA (C).

En lo referente a la evolución de la resistencia de los morteros, se evidencia que las mezclas MMK (C) y MPL (C) presentaron resistencias similares a las obtenidas en el mortero MCA (C). Esto puede atribuirse al proceso de envejecimiento acelerado en la cámara de carbonatación, puesto que los componentes de las adiciones pudieron reaccionar rápidamente con el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ presente en la cal, formando otros compuestos como silicatos de calcio y aluminatos de calcio, lo que indica que pudo precipitarse una cantidad inferior de CaCO_3 en las mezclas adicionadas. En el caso de las mezclas curadas en la cámara de humedad, las adiciones mejoraron la resistencia a compresión.

Para evaluar la resistencia a compresión en morteros curados en condiciones atmosféricas (A), se elaboraron cuatro mezclas: una de cal y arena (MCA) y tres adicionadas con metacaolín (MMK). En la figura siguiente se

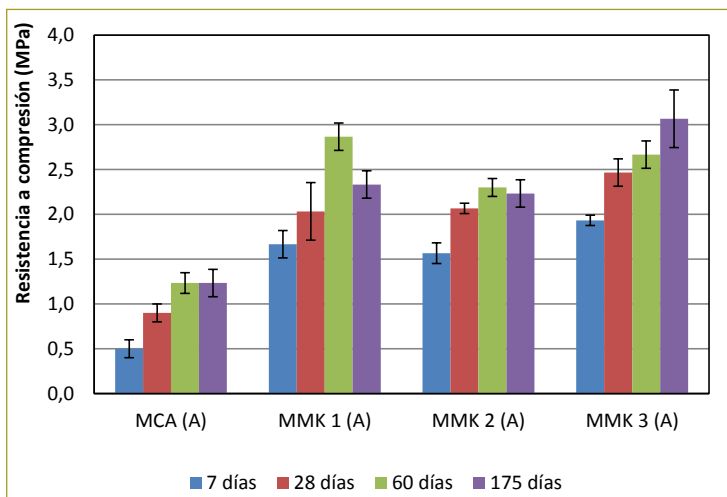


Figura 6. Evolución de la resistencia a compresión en morteros curados en condiciones atmosféricas.

Fuente: Los autores.

indican las resistencias a compresión registradas a 7, 28, 60 y 175 días (figura 6).

Se observa que el mortero MCA (A) presentó una resistencia aproximadamente un 50 % menor que la registrada en la mezcla MCA (NC). Adicionalmente, las resistencias de los morteros MMK (A) resultaron inferiores en un 60 %, en promedio, a las obtenidas en las muestras MMK (NC). Este fenómeno puede atribuirse a las variaciones de temperatura y humedad relativa del ambiente natural, lo cual pudo generar microfisuras que afectaron las propiedades mecánicas de los morteros. Adicionalmente, dichos cambios pudieron alterar de cierta manera las reacciones químicas que influyen en el desarrollo de las propiedades mecánicas.

CONCLUSIONES

1. Las resistencias determinadas en los morteros adicionados con metacaolín, curados en cámara de humedad y temperatura, en general triplicaron las registradas en las mezclas de cal y arena, curadas en las mismas condiciones. Además, estas últimas presentaron una tasa de endurecimiento menor, lo cual se reflejó en el desarrollo de la resistencia.
2. Los morteros adicionados con polvo de ladrillo, curados en cámara de humedad y temperatura, presentaron resistencias ligeramente superiores a las encontradas en la mezcla de cal y arena, en las mismas condiciones de curado.
3. Los morteros adicionados, curados en cámara de carbonatación, presentaron resistencias menores en relación con la mezcla de cal y arena. Esto puede deberse a que los componentes de las adiciones reaccionaron con el $\text{Ca}(\text{OH})_2$, presente en la cal, generando así silicatos y aluminatos de calcio. En consecuencia, no todo el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ de la cal reaccionó con el CO_2 para formar CaCO_3 .
4. En los morteros adicionados, curados en la cámara de humedad y temperatura, no se registraron caídas de resistencia, como la observada en las muestras de cal y arena. Esto podría indicar que las adiciones ayudaron a reducir microfisuras internas por retracción.
5. En los morteros curados en el ambiente, las resistencias registradas se encontraron alrededor de la mitad de las evaluadas en las mezclas curadas en la cámara de humedad y temperatura. Posiblemente, esto se atribuye a las variaciones de la temperatu-

ra y la humedad relativa del ambiente, por lo que puede presentarse pérdida de agua en los morteros, afectando así la hidratación de la matriz cementicia. De esta manera, la resistencia a compresión se ve reducida. Adicionalmente, por dichas variaciones también pueden presentarse microfisuras internas que también afectan la resistencia. Así, las diferencias encontradas en las propiedades mecánicas de los morteros resultan importantes al momento de utilizar estos materiales en la reparación o reforzamiento de edificaciones históricas, puesto que resultaría complejo y costoso mantener condiciones controladas durante dichas actividades.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda evaluar el desarrollo de la resistencia de morteros curados bajo el agua, dado que hay varios tipos de cales hidráulicas.
2. Se aconseja evaluar la actividad puzolánica del polvo de ladrillo y verificar si se requiere algún tratamiento mecánico o térmico adicional.
3. Se recomienda realizar lecturas de retracción en las muestras, para conocer más sobre el comportamiento de los morteros.

Agradecimientos

El autor desea manifestar su agradecimiento a la empresa Insumos Industriales Corona, por la donación del metacaolín.

REFERENCIAS

- Aggelakopoulou, E., Bakolas, A. & Moropoulou, A. (2011). Properties of lime-metakolin mortars for the restoration of historic masonries. *Applied Clay Science*, 53(1), 15-19. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2011.04.005>.
- Arandigoyen, M. & Álvarez, J. I. (2006). Carbonation process in lime pastes with different water/binder ratio. *Materiales de Construcción*, 56 (February), 5-18.
- Arizzi, A., Martínez Martínez, J., Cultrone, G. & Benavente, D. (2011). Mechanical Evolution of Lime Mortars during the Carbonation Process. *Key Engineering Materials*, 465 (January 2011), 483-486. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.465.483>.
- Ball, R. J., El-Turki, A. & Allen, G. C. (2011). Influence of carbonation on the load dependent deformation of hydraulic lime mortars. *Materials Science and Engineering A*, 528 (7-8), 3193-3199. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.12.070>.
- Cazalla, O. (2002). *Morteros de cal. Aplicación en el patrimonio histórico*. Universidad de Granada. Recuperado a partir de <http://hdl.handle.net/10481/28626>.
- El-Turki, A., Ball, R. & Geoffrey, A. (2009). The effect of carbonation on the mechanical and microstructural properties of lime and cement mortars. En *11th International Conference on Non-conventional Materials and Technologies (Nocmat 2009)* (p. 8). Bath: University of Bath. Recuperado a partir de http://opus.bath.ac.uk/21017/1/2009_NOCMAT_El_Turki_et_al_Paper_39.pdf
- Forster, A. (2012). Masonry Repair Options and Their Philosophical Ramifications. En J. Weber, K. Bayer & F. Pintér (eds.), *Historic Mortars* (vol. 7, pp. 197-206). <https://doi.org/10.1007/978-94-007-4635-0>.
- Gleize, P. J. P., Motta, E. V., Silva, D. A. & Roman, H. R. (2009). Characterization of historical mortars from Santa Catarina (Brazil). *Cement and Concrete Composites*, 31(5), 342-346. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.02.013>.
- Iucolano, F., Liguori, B. & Colella, C. (2013). Fibre-reinforced lime-based mortars: A possible resource for ancient masonry restoration. *Construction and Building Materials*, 38, 785-789. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.050>.
- Lanas, J. & Álvarez, J. I. (2003). Masonry repair lime-based mortars: Factors affecting the mechanical behavior. *Cement and Concrete Research*, 33(11), 1867-1876. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00210-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00210-2).
- Lanas, J., Pérez Bernal, J. L., Bello, M. A. & Álvarez, J. I. (2006). Mechanical properties of masonry repair dolomitic lime-based mortars. *Cement and Concrete Research*, 36(5), 951-960. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.10.004>.
- Lourenço, P. B., Van Hees, R., Fernandes, F. & Lubelli, B. (2014). Characterization and Damage of Brick. En A. Costa, J. Miranda, & H. Varum (eds.), *Structural Rehabilitation of Old Buildings* (vol. 2, pp. 109-130). <https://doi.org/10.1007/978-3-642-39686-1>.
- Luque, A., Cultrone, G. & Sebastián, E. (2010). The use of lime mortars in restoration work on architectural heritage. En M. Bos-ternaru, R. Prikryl & Á. Török (eds.), *Materials, Technologies and Practice in Historic Heritage Structures* (pp. 197-207). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2684-2_11.
- Maldonado, N., Martín, P. & Maldonado, I. (2011). Seismic Mitigation of a Historic Masonry Building. *The Open Construction and Building Technology Journal*, 5(1), 61-70. <https://doi.org/10.2174/1874836801105010061>.
- Maravelaki-Kalaitzaki, P., Bakolas, A., Karatasios, I. & Kilikoglou, V. (2005). Hydraulic lime mortars for the restoration of historic masonry in Crete. *Cement and Concrete Research*, 35(8), 1577-1586. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.09.001>.
- Matias, G., Faria, P. & Torres, I. (2008). Lime mortars with brick dust and grounded particles for ancient masonry: development and evaluation. En *HMC08-Historical Mortars Conference* (p. CD). LNEC.
- Matias, G., Faria, P. & Torres, I. (2014). Lime mortars with heat treated clays and ceramic waste: A review. *Construction & Building Materials*, 73, 125-136. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.028>.
- Mercado, E. (2007). Patrimonio edificado de propiedad privada: relación compleja y contradictoria entre lo público y lo privado en el Centro Histórico de Morelia. *Intervención (México, D.F.)*, (4), 27-34. Recuperado a partir de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-249X2011000200006&script=sci_arttext.
- Moropoulou, A., Bakolas, A., Moundoulas, P., Aggelakopoulou, E. & Anagnostopoulou, S. (2005). Strength development and lime reaction in mortars for repairing historic masonries. *Cement and*

- Concrete Composites*, 27(2), 289-294. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.02.017>.
- Navrátilová, E. & Rovnaníková, P. (2016). Pozzolanic properties of brick powders and their effect on the properties of modified lime mortars. *Construction and Building Materials*, 120, 530-539. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.062>.
- Nežerka, V., Antoš, J., Litoš, J., Tesárek, P. & Zeman, J. (2016). An integrated experimental-numerical study of the performance of lime-based mortars in masonry piers under eccentric loading. *Construction and Building Materials*, 114, 913-924. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.013>.
- Pavlík, Z., Benešová, H., Matiašovský, P. & Pavlíková, M. (2012). Study on Carbonation Process of Several Types of Advanced Lime-Based Plasters. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 70(2), 1005-1009. Recuperado a partir de <http://waset.org/journals/waset/v70/v70-187.pdf>.
- Peñaranda, L. (2011). *Manual para la conservación del patrimonio arquitectónico habitacional de Sucre*. Sucre. Recuperado a partir de [http://www.aecid.es/Centro-Documentacion/Documentos/Publicaciones coeditadas por AECID/Manual_de_Intervencixn_PRAHS.pdf](http://www.aecid.es/Centro-Documentacion/Documentos/Publicaciones/coeditadas_por_AECID/Manual_de_Intervencixn_PRAHS.pdf).
- Pozo-Antonio, J. S. (2015). Evolution of mechanical properties and drying shrinkage in lime-based and lime cement-based mortars with pure limestone aggregate. *Construction and Building Materials*, 77, 472-478. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.115>.
- Siddique, R. (2008). Metakaolin. En *Waste Materials and By-Products in Concrete* (pp. 41-92). Punjab: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-74294-4_2.
- Vejmelková, E., Keppert, M., Keršner, Z., Rovnaníková, P. & Černý, R. (2012). Mechanical, fracture-mechanical, hydric, thermal, and durability properties of lime-metakaolin plasters for renovation of historical buildings. *Construction and Building Materials*, 31, 22-28. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.084>.
- Velosa, A. L., Rocha, F. & Veiga, R. (2009). Influence of chemical and mineralogical composition of metakaolin on mortar characteristics. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, 6(1), 121-126.

REVISTA 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 literatura 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