

- Lineamientos de inspección de seguridad vial en entornos escolares para el desarrollo de un plan de seguridad vial en su componente de infraestructura para las instituciones educativas oficiales municipales (IEOM) (preescolar, básica y media). Estudio de caso: municipio de Chía (Cundinamarca).
- Sistemas de prerrefuerzo en frentes de excavación de túneles en suelo y roca.
- Evaluación de pérdidas de agua en la ducha por el uso de agua caliente.
- Análisis crítico de la metodología implementada por el Ideam y las empleadas en el ámbito internacional para definir el índice de escasez del agua superficial.
- Evaluación de una alternativa de compostaje para el tratamiento de los residuos orgánicos biodegradables de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- Modelación de fuentes de emisión en Aermod, con información meteorológica de Bogotá.
- Comportamiento ante carga perpendicular al plano de muros de mampostería en concreto, reforzados con barras de FRP.
- Análisis y comparación de los resultados de la simulación de flujo de un modelo físico a escala con el modelo numérico utilizado por el software IBER 2D
- Ecuaciones constitutivas de módulo resiliente de materiales tratados con asfalto espumado.



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
EDUARDO SARMIENTO PALACIO

DIRECCIÓN EDITORIAL CRISTINA SALAZAR PERDOMO

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

DIRECCIÓN COMERCIAL EDITORIAL ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA

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

AUTOPISTA NORTE AK 45 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

Retos de la educación posgradual en Colombia

Germán Ricardo Santos Granados

7-24

Lineamientos de inspección de seguridad vial en entornos escolares para el desarrollo de un plan de seguridad vial en su componente de infraestructura para las instituciones educativas oficiales municipales (IEOM) (preescolar, básica y media). Estudio de caso: municipio de Chía (Cundinamarca)

Yohana Catalina Parra Gómez - Maritza Cecilia Villamizar Roperó

En el presente documento se caracterizan los entornos educativos oficiales del municipio de Chía y se analizan las prácticas que los centros educativos públicos deben desarrollar para promover entornos escolares seguros y saludables; también se hace un enfoque cualitativo de estudio de caso, mediante el análisis documental (legislación educativa y análisis de documentos institucionales) y las entrevistas semiestructuradas a directivos, estudiantes y profesores de la IEO participante.

25-38

Sistemas de prerrefuerzo en frentes de excavación de túneles en suelo y roca

Damaris Contreras Carrillo - Ramiro Gutiérrez Rodríguez

Esta investigación tuvo como finalidad desarrollar una metodología práctica para diseñar los elementos de prerrefuerzo o presostenimiento utilizados para la estabilización temporal del frente de excavación de un túnel. El objetivo es brindar una herramienta práctica que facilite a los ingenieros el cálculo o estimación del sistema de presostenimiento, usando enfilajes y pernos en fibra de vidrio como sistema de estabilización del frente en túneles excavados en materiales de suelo con baja cohesión y relativamente superficiales.

39-43

Evaluación de pérdidas de agua en la ducha por el uso de agua caliente

Giovanny Andrés Lizcano Castro - William Nivaldo Uscátegui Ciendua -

Jairo Alberto Romero Rojas

En este artículo se presentan los resultados de la evaluación de pérdidas de agua en la ducha por el uso de agua caliente en la ciudad de Bogotá.

45-51

Análisis crítico de la metodología implementada por el Ideam y las empleadas en el ámbito internacional para definir el índice de escasez del agua superficial

Jorge Andrés Vega Ortiz - Héctor Matamoros Rodríguez

En el presente artículo se habla sobre la metodología para calcular el índice de escasez elaborada por el Ideam, para lo cual se abordarán los siguientes aspectos: la descripción de algunas metodologías de cálculo usadas a escala internacional, exactamente en Estados Unidos, Israel, Países Bajos y Canadá; críticas de autores nacionales sobre la metodología, ventajas y desventajas del indicador de escasez, y finalmente, los ajustes propuestos para el cálculo del indicador.

53-60

Evaluación de una alternativa de compostaje para el tratamiento de los residuos orgánicos biodegradables de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Laura Cristina Lesmes Posada - María Paulina Villegas De Brigard

En el presente artículo se establecen las condiciones óptimas de operación de un proceso de compostaje por medio de una comparación de los resultados obtenidos en una planta piloto. Los análisis se realizaron para dos modelos de mezcla de residuos orgánicos biodegradables provenientes de las actividades de corte de césped, poda de árboles y preparación de alimentos en la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

61-68

Modelación de fuentes de emisión en Aermod, con información meteorológica de Bogotá

Gustavo Adolfo Burbano Sefair

La ejecución de modelos de calidad de aire en Aermod requiere el uso de datos de horarios de temperatura, humedad relativa, nubosidad, precipitación, presión atmosférica, velocidad y dirección del viento de manera horaria. Sin embargo, las estaciones meteorológicas en Colombia no poseen suficientes datos, por lo cual hay que utilizar información proveniente de modelos de pronóstico de clima para obtener 8760 horas de datos anuales requeridos para cada variable climática necesaria para correr el modelo.

69-76

Comportamiento ante carga perpendicular al plano de muros de mampostería en concreto, reforzados con barras de FRP

Daniel Otálora Barros - Nancy Torres Castellanos

Se planteó un programa experimental para evaluar la capacidad ante cargas perpendiculares al plano de muros de mampostería reforzados internamente con barras de polímeros reforzados con Fiber Reinforced Polymer (FRP), con el fin de generar un protocolo de diseño preliminar para evaluar la capacidad teórica de dichos muros, tomando como base los requisitos especificados en el ACI 440.1R-15 y el TMS 402-16.

77-85

Análisis y comparación de los resultados de la simulación de flujo de un modelo físico a escala con el modelo numérico utilizado por el software IBER 2D

Diego Andrés García Mendivelso - Héctor Matamoros Rodríguez

En el presente escrito se expone la manera en la que se combinan tanto la modelación matemática como los modelos a escala para recrear la bocatoma de la central hidroeléctrica La Naveta, con el fin de comparar los resultados expresados por un modelo físico a escala elaborado por el Centro de Estudios Hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

87-94

Ecuaciones constitutivas de módulo resiliente de materiales tratados con asfalto espumado

Sandy Jazmín Pardo Herreño - Sandra Ximena Campagnoli Martínez

En este trabajo se presentan las ecuaciones constitutivas del M_r , obtenidas sobre mezclas con diferentes proporciones en peso de granular/RAP (100/0 %, 85/15 %, 70/30 % y 50/50 %) y espuma de asfalto (60/70 1/10 mm) de las refinerías de Barrancabermeja y Apiay (Colombia), de dos procedencias distintas. Las mezclas se elaboraron siguiendo la metodología propuesta por la Academia del Asfalto de Sudáfrica, en la guía técnica Bitumen Stabilized Materials TG2, de 2009.

95 / ALCANCE Y POLÍTICAS

Editorial

Retos de la educación posgradual en Colombia

GERMÁN RICARDO SANTOS GRANADOS

Profesor titular y director de posgrados de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

german.santos@escuelaing.edu.co

En el mundo actual, los cambios son cada vez más acelerados y conducen a escenarios distantes de los tradicionales. El desarrollo socioeconómico y el bienestar de la población se basan en la capacidad de generar, transferir y utilizar los conocimientos científicos y tecnológicos. Los profesionales se dan cuenta rápidamente de que deben adquirir estos nuevos conocimientos y fortalecer sus competencias generales, en tanto que los directores de posgrados están llamados a estar muy atentos a identificar, analizar, divulgar, transferir y, especialmente, a propiciar los nuevos desarrollos.

Al analizar las últimas cifras reportadas por el Ministerio de Educación Nacional, se encuentra que entre los años 2000 y 2017 el número de estudiantes matriculados para pregrado se duplicó, mientras para posgrados se triplicó, alcanzando la cifra de 160.000 estudiantes. Así mismo, es particularmente llamativo que la cantidad de matriculados en maestrías se multiplicó por once. Esto es una muestra de la creciente demanda de formación avanzada, atendida a cabalidad por las instituciones universitarias del país.

Adicionalmente, en Colombia la pirámide poblacional se ha estrechado: cerca del 20 % de la población tiene menos de 24 años y la esperanza de vida ha aumentado a 74 años. Esto representa una gran oportunidad para que las universidades amplíen su oferta y atraigan a profesionales de todas las edades.

Sin embargo, los altos crecimientos en la matrícula han disminuido en los últimos años. Entre 2016 y 2017 la matrícula en los posgrados disminuyó cerca del 4 %, y en la actualidad es menos del 10 % de la de pregrado, lo que refleja los nuevos retos que deben afrontar las instituciones.

¿Los programas que estamos ofreciendo responden a lo que la sociedad necesita en materia de generación de empleo, transferencia de adelantos científicos y tecnológicos y formación en las competencias requeridas?

¿Cómo estamos respondiendo a los retos de la globalización y las nuevas tecnologías? Hay que tener en cuenta que las ofertas virtuales de instituciones de primer nivel representan una fuerte competencia, la información de punta está cada vez más disponible, las posibilidades de estudios en el exterior son cada vez mayores, y las certificaciones de entidades no tradicionales en el sector académico son más apetecidas y valoradas por el mercado.

La sociedad del futuro estará impulsada por el conocimiento, por lo que seguramente se perderán categorías de empleos y vendrán grandes cambios en el desempeño profesional. La educación continuada y la posgradual están llamadas a ser el soporte fundamental para que las personas respondan a los cambios, así como también para proveer las nuevas habilidades, herramientas y conocimientos requeridos.

Es indispensable actualizar permanentemente los planes de estudios y los contenidos de los cursos, revitalizar la oferta y estar atentos a lo que la sociedad requiere. Es imperativo incorporar la vasta información digital, las plataformas y las herramientas virtuales hoy fácilmente disponibles. Es necesario alentar a los profesores a innovar en sus prácticas docentes, a tener una interacción más cercana con sus estudiantes y a permitir fracasos en los intentos. Es imperioso motivar a los estudiantes a que comprendan tanto los avances de punta como las modernizaciones pertinentes.

Los posgrados deben ser espacios en los que se respiren la actualización, los intercambios internacionales y la discusión de los nuevos conocimientos, pero también tienen la obligación de proponer soluciones innovadoras a los problemas cotidianos. Deben articularse con los pregrados para diseminar conocimientos profundos y ser parte de las estrategias de los grupos de investigación e innovación para su crecimiento e impacto en la sociedad.

En resumen, la educación posgradual no puede estar por fuera de los cambios propiciados por la era del conocimiento, porque esta es su esencia.

Lineamientos de inspección de seguridad vial en entornos escolares para el desarrollo de un plan de seguridad vial en su componente de infraestructura para las instituciones educativas oficiales municipales (IEOM) (preescolar, básica y media). Estudio de caso: municipio de Chía (Cundinamarca)

Road safety guidelines in school surroundings to develop a road safety plan for the infrastructure of official educational institutions (K-12 and secondary). Case study: Municipality of Chía (Cundinamarca)

YOHANA CATALINA PARRA GÓMEZ¹ - MARITZA CECILIA VILLAMIZAR ROPERO²

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

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

yohana.parra@mail.escuelaing.edu.co - maritza.villamizar@escuelaing.edu.co

Recibido: 17/01/2019 Aceptado: 20/01/2019

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

Resumen

Las instituciones educativas oficiales (IEO) son los lugares donde los niños y jóvenes pueden desarrollarse plenamente, por lo que su ambiente debe brindar bienestar y seguridad. Para esto es necesario que la administración municipal y los actores que se desempeñan en estos ámbitos como profesionales y la comunidad educativa en general se involucren aceleradamente mediante el impulso de políticas escolares saludables, certificando la existencia de entornos físicos apropiados y la creación de un ambiente de bienestar emocional y social positivo.

En el presente documento se caracterizan los entornos educativos oficiales del municipio de Chía y se analizan las prácticas que los centros educativos públicos deben desarrollar para promover entornos escolares seguros y saludables; también se hace un enfoque cualitativo de estudio de caso, mediante el análisis documental (legislación educativa y análisis de documentos institucionales) y las entrevistas semiestructuradas a directivos, estudiantes y profesores de la IEO participante. Los lineamientos trabajados evidencian que la seguridad y salud física, emocional y social son aspectos contemplados en la dinámica de funcionamiento de los centros educativos. Además, existe una coherencia entre el contenido de la legislación educativa, lo explicitado en los

documentos institucionales y lo implementado en los centros a través de programas, proyectos y acciones diarias.

Finalmente, se hizo la auditoría de seguridad vial como caso de estudio en la IEO San Josemaría Escrivá de Balaguer, del municipio de Chía, donde se diagnosticó el problema que presenta la zona de la institución educativa oficial en relación con la seguridad vial, con el objetivo de implementar como política pública los lineamientos de seguridad vial en los entornos escolares por el municipio de Chía.

Palabras claves: entornos escolares seguros, institución educativa, bienestar, estudiante, docente, siniestros viales, infraestructura segura.

Abstract

Official educational institutions (OEI) are places where children and young people can fully develop, so their environment should provide welfare and safety. Therefore, it is necessary for municipal authorities, and other stakeholders who work in these areas, such as professionals and the educational community in general, to get involved through the implementation of healthy school policies, which promote appropriate physical environments and spaces for emotional and social well-being.

This document characterizes official educational environments of the municipality of Chía, including an analysis of practices that public schools must develop to promote safe and healthy school environments. Additionally, a qualitative approach is performed on a case study, through document analysis (educational legislation and analysis of institutional documents) and semi-structured interviews to managers, students, and teachers from the participating OEI.

The analyzed guidelines show that security as well as physical, emotional, and social health are considered in the operation of educational centers. In addition, there is coherence between the content of educational legislation, institutional documents, and what is implemented in the centers through programs, projects, and daily actions.

Finally, an audit of road safety was carried out as a case study at OEI San Josemaría Escrivá de Balaguer in Chía, where the problems related to road safety surrounding the educational institution were diagnosed to implement road safety guidelines in school environments as a public policy by the municipality of Chía.

Keywords: safe school environments, educational institution, welfare, student, teacher, road traffic accidents, secure infrastructure.

INTRODUCCIÓN

La tasa media de mortalidad por lesiones de tránsito de los países de la región es de 19,2, de los cuales siete países tienen tasas por encima de esta media. En promedio, estos países gastan entre 1 y 3 % de su producto interno bruto (PIB) por esta causa. En edades escolares, los traumatismos ocasionados por el tránsito se convierten en uno de los principales escenarios que hay que trabajar, toda vez que se encuentra como la principal causa de defunción entre los 15 y 19 años, y la segunda causa entre los 10 y 14 años.

El mejoramiento del servicio educativo está directamente relacionado con el mejoramiento de las prácticas pedagógicas, de la organización escolar y de las condiciones ambientales de sus instalaciones. En lo referente a las condiciones ambientales, es de gran importancia el componente de la arquitectura escolar, pensada, asumida y desarrollada en concordancia con la calidad pedagógica.

En este trabajo se realiza un estudio de tipo mixto (cuantitativo y cualitativo) a partir de información de las entidades que trabajan en las instituciones educativas oficiales (IEO) del municipio de Chía. Se inicia con el análisis de la base de datos de las IEO, la totalidad de estudiantes y la evolución de los establecimientos educativos; posteriormente, se presentan los lineamientos de la Norma Técnica Colombiana 4595. La Secretaría de Movilidad del Municipio de Chía hizo la encuesta a los estudiantes y profesores de la institución educativa (IE) del municipio de Chía con el objetivo de obtener

información para analizar las dificultades, modo de transporte del estudiante, lugar de residencia, tiempo de viaje, entre otras, dentro del marco de las mesas técnicas que se realizan con las IEO del municipio de Chía.

Con esta encuesta se busca obtener información específica sobre la población atendida por las IEO, así como hacer análisis para optar por las mejores opciones para mejorar los entornos escolares con el objetivo de establecer acciones preventivas.

En la IE San Josemaría Escrivá de Balaguer hay déficits claros de área de aulas de clases (hacinamiento en ambiente A), al igual que el índice de ocupación e índice de construcción, de acuerdo con la Norma Técnica Colombiana 4595, de marzo de 2006, expedida por el Ministerio de Educación Nacional (NTC 4595). Sumado a esto, los colegios deben migrar a la jornada única, lo que aumentará el déficit al atender simultáneamente a los estudiantes de ambas jornadas.

RESULTADOS

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), los siniestros viales causan más de 100.000 muertes en la región, y además de muchas lesiones graves (World Health Organization [WHO], 2013), América Latina y el Caribe aportan aproximadamente 9 % de todas las muertes por siniestros viales en el mundo. La tasa media de mortalidad por lesiones de tránsito de los países de la región es de 19,2, de los cuales siete países tienen tasas por encima de esta media. En promedio, los países de la región gastan entre 1 y 3 % de su producto interno bruto (PIB) por esta causa. La Organización Mundial de la Salud (2013) ha logrado identificar las áreas en las que necesitamos duplicar esfuerzos y las estrategias que han demostrado funcionar. Por ejemplo, mejorar la legislación existente y su aplicación.

En el mundo, una de las principales causas de muerte infantil son las lesiones a los niños, por lo que esta causa se convierte en uno de los principales problemas de salud pública que requieren atención urgente. Las lesiones provocan cada año cerca de 950.000 defunciones en niños y jóvenes menores de 18 años (OMS, Carga mundial de morbilidad: actualización del 2004). Las lesiones no intencionales representan casi el 90 % de estos casos, y son la principal causa de defunción entre los niños y niñas (Peden, Oyegbite, Ozanne-Smith, Hyder, Branche, Rahman & Bartolomeos, 2012). En

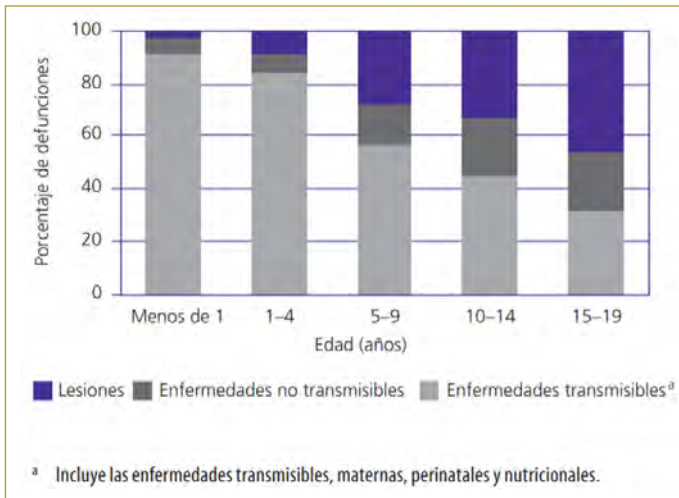


Figura 1. Principal causa de muerte en los niños del mundo. Fuente: OMS, 2004.

edades escolares, los traumatismos ocasionados por el tránsito se convierten en uno de los principales esce-

narios que hay que trabajar, toda vez que se encuentra como la principal causa de defunción entre los 15 y 19 años, y la segunda causa entre los 10 y 14 años. En el caso de los niños de 0 a 14 años, los traumatismos producidos por el tránsito y las caídas se encuentran entre las quince causas principales (figura 1).

Metodología de trabajo

A continuación se listan las entidades y dependencias que facilitaron la información:

- Dirección de Sistemas de Información para la Planificación (Dirsip) de la Alcaldía Municipal de Chía.
- Secretaria de Movilidad del Municipio de Chía (SMMCH).
- Secretaría de Educación del Municipio de Chía (Semch).

Tabla 1
Principales causas de muerte en los niños, de uno y otro sexo, en el mundo

Lugar	Menores de 1 año	1-4 años	5-9 años	10-14 años	15-19 años	Menores de 20 años
1	Causas perinatales	Infecciones de las vías respiratorias bajas	Infecciones de las vías respiratorias bajas	Infecciones de las vías respiratorias bajas	Traumatismos causados por el tránsito	Causas perinatales
2	Enfermedades diarreicas	Enfermedades diarreicas	Traumatismos causados por el tránsito	Traumatismos causados por el tránsito	Lesiones autoinfligidas	Infecciones de las vías respiratorias bajas
3	Infecciones de las vías respiratorias bajas	Sarampión	Malaria	Ahogamiento	Violencia	Enfermedades diarreicas
4	Malaria	Malaria	Enfermedades diarreicas	Malaria	Infecciones de las vías respiratorias bajas	Malaria
5	Anomalías congénitas	Infección por el VIH/sida	Meningitis	Meningitis	Ahogamiento	Sarampión
6	Tos ferina	Anomalías congénitas	Ahogamiento	Infección por el VIH/sida	Tuberculosis	Anomalías congénitas
7	Infección por el VIH/sida	Malnutrición proteico-calórica	Malnutrición proteico-calórica	Tuberculosis	Quemaduras por fuego	Infección por el VIH/sida
8	Tétanos	Ahogamiento	Sarampión	Enfermedades diarreicas	Infección por el VIH/sida	Traumatismos causados por el tránsito
9	Meningitis	Traumatismos causados por el tránsito	Tuberculosis	Malnutrición proteico-calórica	Leucemia	Tos ferina
10	Sarampión	Meningitis	Infección por el VIH/sida	Lesiones autoinfligidas	Meningitis	Meningitis
11	Malnutrición proteico-calórica	Quemaduras por fuego	Quemaduras por fuego	Leucemia	Hemorragia materna	Ahogamiento
12	Sífilis	Tos ferina	Caldas	Quemaduras por fuego	Caidas	Malnutrición proteico-calórica
13	Trastornos endocrinos	Tuberculosis	Anomalías congénitas	Guerra	Intoxicaciones	Tétanos
14	Tuberculosis	Infecciones respiratorias altas	Epilepsia	Violencia	Aborto	Tuberculosis
15	Infecciones respiratorias altas	Sífilis	Leucemia	Tripanosomiasis	Epilepsia	Quemaduras por fuego

Fuente: OMS, 2004.

- Sistema de Gestión de la Calidad del Municipio de Chía.
- Dirección de Educación y Seguridad Vial de la Secretaría de Movilidad Municipal de Chía.
- Visita de campo a la IEO seleccionada.

Se hace el análisis de la base de datos de las IEO, la totalidad de estudiantes y la evolución de los establecimientos educativos.

Se presentan los lineamientos de la Norma Técnica Colombiana 4595, de marzo de 2006, expedida por el Ministerio de Educación Nacional para establecer el cumplimiento de los requisitos de las áreas escolares. La distribución de los accidentes y la descripción de la malla vial permiten identificar la magnitud del problema de choques que existen en el municipio.

Un análisis más amplio de las IEO permite identificar un ejemplo crítico para mostrar los problemas que surgen en cuanto a la seguridad vial. Este procedimiento se apoya en un análisis de representación gráfica y un análisis de riesgo.

Finalmente, se realiza la caracterización de la IEO seleccionada como caso de estudio y se analiza el entorno escolar, para sacar una conclusión sobre el problema explorado en este trabajo.

Información secundaria o existente

A continuación se hace una breve descripción de la información secundaria requerida para el análisis que hay que desarrollar.

Con el objetivo de evaluar los ambientes escolares en su componente arquitectónico se crea un *shape* con polígonos para identificar las instituciones educativas, el área del predio, su área construida, índice de ocupación (IO), índice de construcción (IC), entendiendo el índice de ocupación como el cociente que resulta de dividir el área construida del primer piso por el área total de un predio donde se encuentra localizada la IEO y el índice de construcción como el cociente que resulta de dividir el área total construida por el área total del predio.

Para la evaluación del componente arquitectónico conforme a los lineamientos de la NTC 4595, “Norma Técnica Colombiana 4595, de marzo de 2006, expedida por el Ministerio de Educación Nacional, ingeniería civil y arquitectura. Planeamiento y diseño de instalaciones y ambientes escolares”, adicionalmente a lo expuesto en el párrafo anterior se requieren los datos del censo

escolar, número de alumnos por sede, por jornada, por grado, por sede, total del municipio de Chía, para hacer la evaluación de las instalaciones escolares existentes.

Tabla 2
Censo estudiantes IEO

Nombre IEO por sede	Número de estudiantes
IE Bojacá	934
IE Bojacá, sede principal	779
Sede Mercedes de Calahorra	155
IE Cerca de Piedra	878
IE Cerca de Piedra, sede principal	878
IE Diosa Chía	984
IE Diosa Chía, sede principal	984
IE Diversificado	2680
IE Diversificado, sede principal	1417
Sede Jardín Infantil Luna Nueva	195
Sede Santa Lucía	1068
IE Fagua	1303
IE Fagua, sede principal	687
Sede Tíquiza	616
IE Fonquetá	762
IE Fonquetá, sede principal	762
IE Fusca	702
IE Fusca, sede principal	150
Sede El Cerro	357
Sede La Caro I	195
IE José Joaquín Casas	1569
IE José Joaquín Casas, sede principal	1342
Sede General Santander	227
IE La Balsa	675
IE La Balsa, sede principal	675
IE Laura Vicuña	1193
IE Laura Vicuña, sede principal	997
Jardín Infantil Los Niños y su Mundo	196
IE San Josemaría Escrivá de Balaguer	1765
IE San Josemaría Escrivá de Balaguer, sede principal	1208
Sede Samaria	557
IE Santa María del Río	902
IE Santa María del Río, sede principal	902
(En blanco)	
(En blanco)	
Total general	14.347

Fuente: Semch, 2018.

Tabla 3
Censos estudiantes IEO

Nombre IEO por sede	Número de estudiantes
IE Bojacá	757
IE Bojacá, sede principal	644
Sede Mercedes de Calahorra	113
IE Cerca de Piedra	642
IE Cerca de Piedra, sede principal	642
IE Diosa Chía	737
IE Diosa Chía, sede principal	737
IE Diversificado	2283
IE Diversificado, sede principal	1058
Sede Jardín Infantil Luna Nueva	181
Sede Santa Lucía	1044
IE Fagua	1098
IE Fagua, sede principal	471
Sede Tíquiza	627
IE Fonquetá	621
IE Fonquetá, sede principal	621
IE Fusca	489
IE Fusca, sede principal	99
Sede El Cerro	243
Sede La Caro I	147
IE José Joaquín Casas	1171
IE José Joaquín Casas, sede principal	923
Sede General Santander	248
IE La Balsa	528
IE La Balsa, sede principal	528
IE Laura Vicuña	1006
IE Laura Vicuña, sede principal	819
Jardín Infantil Los Niños y su Mundo	187
IE San Josemaría Escrivá de Balaguer	1444
IE San Josemaría Escrivá de Balaguer, sede principal	975
Sede Samaria	469
IE Santa María del Río	802
IE Santa María del Río, sede principal	802
(En blanco)	
(En blanco)	
Total general	11.578

Fuente: Semch, 2017.

De conformidad con las cifras del reporte histórico del periodo 2013 - 2016, se tiene que el mayor número de establecimientos educativos en el municipio de Chía

está representado en el sector no oficial (privado); se observa un incremento en el año 2015 con 77 establecimientos educativos privados, mientras que para el año 2016 y 2017 se registra un leve descenso de los establecimientos educativos privados.

Tabla 4
Evolución de los establecimientos educativos en el municipio de Chía

Sector	2013	2014	2015	2016	2017**
Oficial	13	12	12	12	12
No oficial	70	70	77	76	76
Total	83	82	89	88	88

(**) 2017. Corte Simat abril. Subdirección de Acceso MEN.

Fuente: Caracterización y perfil del sector educativo del municipio de Chía, 2016-2017.

Esto se hace teniendo en cuenta los lineamientos de la Norma Técnica Colombiana 4595, de marzo de 2006, expedida por el Ministerio de Educación Nacional, ingeniería civil y arquitectura. Planeamiento y diseño de instalaciones y ambientes escolares, toda vez que si bien esta norma establece los requisitos para el planeamiento y diseño físico-espacial de nuevas instalaciones escolares, también se puede usar para la evaluación y adaptación de las instalaciones escolares existentes.

Por otro lado, la base de datos de siniestros viales sirve como insumo para evaluar las condiciones generales del municipio de Chía en cuanto a seguridad vial, con el objetivo adicional de puntualizar las condiciones de riesgo de las IEO frente a los siniestros viales y realizar un análisis espacial de los siniestros viales. Accidentes reportados por comparendos del periodo comprendido entre enero de 2017 y agosto del 2018, agentes de tránsito adscritos a la Secretaría de Movilidad y Policía Nacional de Carreteras.

Con el fin de procesar los datos entregados por la Secretaría de Movilidad, se efectuó la siguiente caracterización:

Por año

El periodo analizado para este trabajo corresponde al comprendido entre el 1.º de enero de 2017 y agosto de 2018, lo que corresponde a un total de siniestros viales de 1135 registros en la base de datos, discriminados así:

734 incidentes para el año 2017 y 401 incidentes para el año 2018. Comparando el mismo periodo de tiempo (enero - agosto) para los dos años, se tiene que en el 2018 han disminuido los accidentes en un 13,8 %, toda vez que entre enero y agosto de 2017 se presentaron 465 incidentes.

Por área

En la zona rural del municipio de Chía se han presentado 686 siniestros viales, lo que corresponde al 60,4 %, en tanto que en la zona urbana ha habido 449, lo que corresponde al 39,6 %.

Por clase de accidente

Del total de siniestros viales presentados en el municipio de Chía, el choque ocupa el primer lugar al concentrar 1051 incidentes, lo que corresponde a 92,6 %, seguido por el atropello con 43 incidentes reportados, que corresponden al 3,8 %; continúa en ese orden el volcamiento, con 22 incidentes, lo que corresponde al 1,9 %; otros, con 11 incidentes, corresponde al 1 %; caída del ocupante, con 5 incidentes, que corresponde al 0,4 %; desprendimiento, con 2 incidentes, que corresponde al 0,2 %, y finalmente incendio, con 1 incidente, que corresponde al 0,1 %.

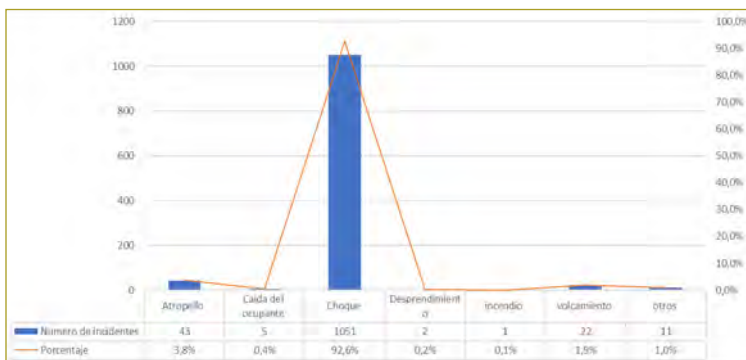


Figura 2. Incidentes por clase de siniestro vial en el municipio de Chía. Fuente: Base de datos SMMCH 2017-agosto 2018. Elaboración propia.

Por gravedad

De los siniestros viales ocurridos en el municipio de Chía, teniendo en cuenta que la gravedad de los accidentes es más alta cuando compromete la vida humana o la integridad física de las personas, se observa que hubo 5 incidentes con fallecidos, lo que corresponde

al 0,4 %; 169 incidentes ocurrieron con heridos, lo que corresponde a un 15 %; 952 incidentes fueron con daños materiales, y 9 incidentes no reportan.

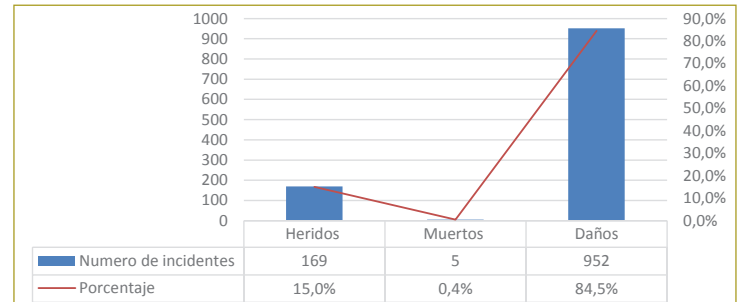


Figura 3. Incidentes por gravedad en el municipio de Chía. Fuente: Base de datos SMMCH 2017-agosto 2018. Elaboración propia.

En cuanto a los incidentes que por su gravedad involucran la vida humana, se observó en la base de datos que hubo 43 incidentes, discriminados así: 28 atropellos en zona rural, lo que corresponde al 65 % y 15 atropellos en zona urbana, que corresponden al 35 %.

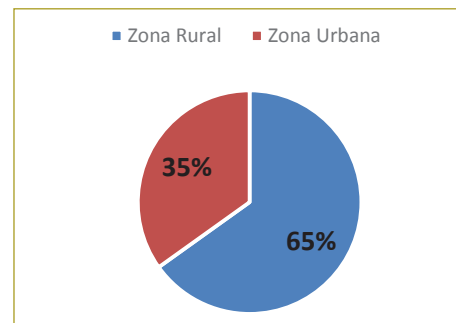


Figura 4. Análisis de atropellos por zona. Fuente: SMMCH, 2018. Elaboración propia.

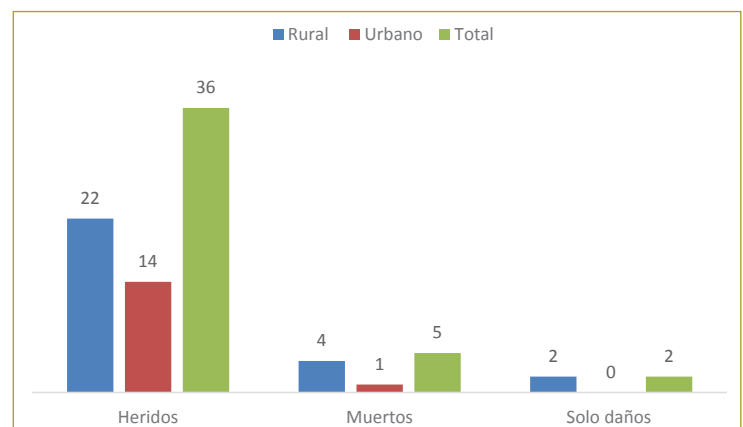


Figura 5. Análisis de atropellos por zona. Fuente: SMMCH, 2017-2018. Elaboración propia.

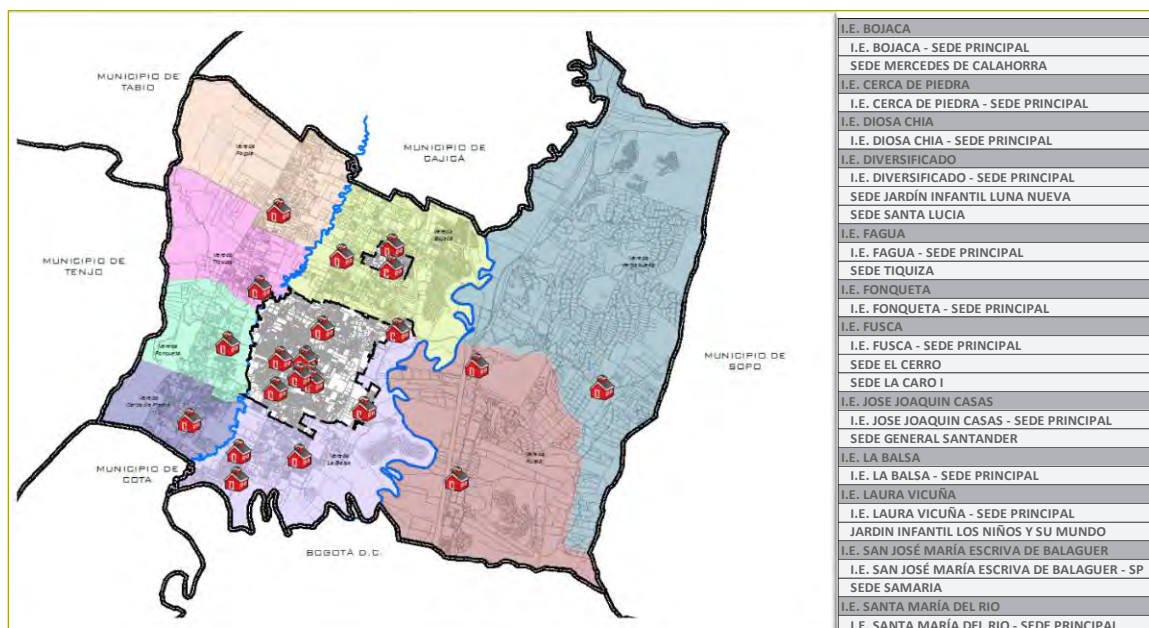


Figura 6. Localización general de las IEO del municipio de Chía.
Fuente: Base de datos Dirsip del municipio de Chía. Elaboración propia.

Entre los incidentes en que se involucra el peatón está el atropello. Para el municipio de Chía se identificaron los siguientes incidentes dentro de la base de datos (figura 5).

En cuanto al atropello, se observa que 22 de los 36 incidentes presentados ocurrieron en la zona rural, lo que corresponde al 61 %, y 14 incidentes ocurrieron en la zona urbana; al igual que los incidentes con muerto el mayor número se concentra en la zona rural, debido a que las principales vías que muestran este comportamiento son las que se encuentran concesionadas por la nación y el departamento de Cundinamarca, localizadas en la zona rural del municipio de Chía.

Información general de IEO

El municipio de Chía cuenta con 12 IEO y 21 sedes, de las cuales 9 son urbanas y 12 son rurales, dando así cobertura tanto en el casco urbano como en las veredas del municipio de Chía.

Para el año 2018, de los 14.347 alumnos atendidos por las IEO del municipio de Chía el 47 % corresponde a la zona urbana con un total de 6805 alumnos y el 53 % corresponde a la zona rural con un total de 7542 alumnos.

Para el año 2017, de los 11.578 alumnos atendidos por las IEO del municipio de Chía el 48 % correspon-

de a la zona urbana con un total de 5548 alumnos y el 52 % corresponde a la zona rural con un total de 6030 alumnos.

En la zona urbana se evidencia que las tres IEO con mayor número de estudiantes son la IE San Josemaría Escrivá de Balaguer (sede principal) con 1208 alumnos, equivalente al 18 %; la IE José Joaquín Casas (sede principal) con 1342 alumnos, equivalente al 20 %; la IE Diversificado (sede principal) con 1417 alumnos, lo que equivale al 21 % (cifras de 2018).

En la zona urbana se evidencia que las tres IEO con mayor número de estudiantes son la IE San Josemaría Escrivá de Balaguer (sede principal) con 975 alumnos,

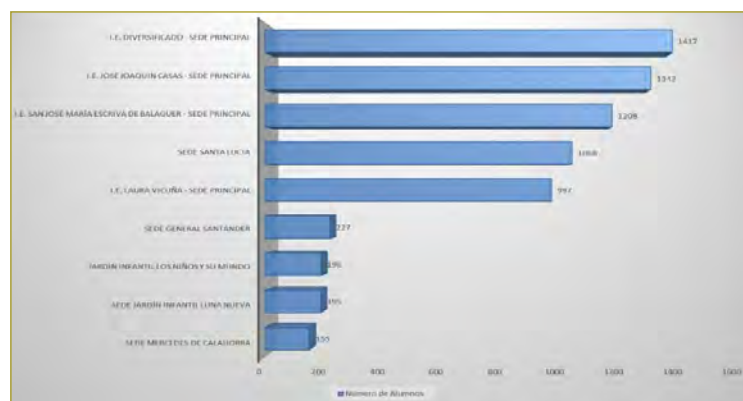


Figura 7. Censo de estudiantes en la zona urbana, año 2018.

equivalente al 18 %; la sede Santa Lucía con 1044 alumnos, equivalente al 19 %, y la IE Diversificado (sede principal) con 1058 alumnos, equivalente al 19 %. Esto para el año 2017.

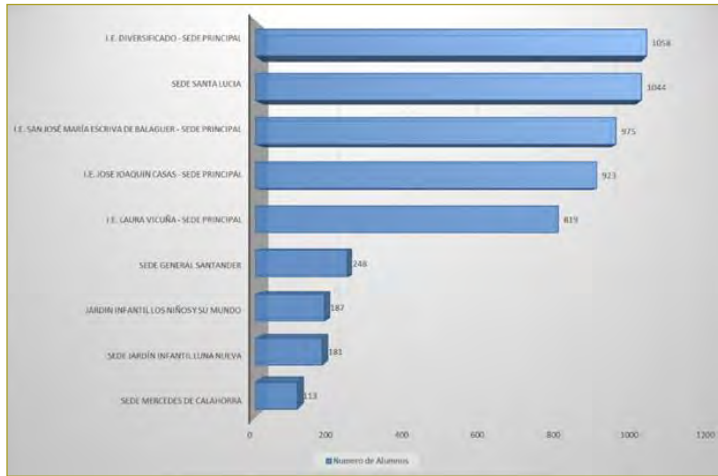


Figura 8. Censo de estudiantes en la zona urbana, año 2017.

Fuente: Elaboración propia.

En los últimos dos años, las IEO en la zona urbana que por volumen de estudiantes atendidos se encuentran entre los primeros puestos son la IE San Josemaría Escrivá de Balaguer (sede principal) y la IE Diversificado (sede principal). Sin embargo, las IEO en esta zona que han presentado mayor crecimiento en número de alumnos con respecto al año inmediatamente anterior son la IE José Joaquín Casas (sede principal) con un aumento del 31 %; la sede Mercedes de Calahorra con

un incremento del 27 %; la IE Diversificado (sede principal) con un aumento del 25 %, y la IE San Josemaría Escrivá de Balaguer (sede principal) con un incremento del 19 %. Es oportuno aclarar que la sede Mercedes de Calahorra, con un aumento del 27 % (42 estudiantes nuevos), no representa sino el 3% de crecimiento con respecto al total de alumnos matriculados nuevos en la zona urbana.

Por otro lado, en relación con el número de niños matriculados nuevos en el total de las IEO de la zona urbana, correspondiente a 1257 alumnos, las IEO que presentaron mayor crecimiento fueron la IE José Joaquín Casas (sede principal) con el 33 %, la IE Diversificado (sede principal) con el 29 % y la IE San Josemaría Escrivá de Balaguer (sede principal) con el 19 %. Se observa que en ambos casos la IE San Josemaría Escrivá de Balaguer (sede principal), se encuentra localizada dentro de las tres IEO que tuvieron mayor crecimiento.

Volumen

Los volúmenes utilizados para el caso de estudio lo suministró la Secretaría de Obras Públicas (SOP), resultados obtenidos dentro del marco del contrato de consultoría 214-2013. Estudios y diseños para el mejoramiento y ampliación de la avenida Pradilla primera etapa, en el municipio de Chía (Cundinamarca). Capítulo 4: Estudios de tránsito y transporte. Cálculo de TPDS, capacidad y niveles de servicio, entregados el 24 de marzo de 2015.

Tabla 5
Análisis del número de niños matriculados en la zona urbana (2017-2018)

Nombre de la IEO zona urbana	Número de alumnos 2017	Número de alumnos 2018	Diferencia de estudiantes matriculados	% de estudiantes matriculados con respecto al total de la IEO	% de estudiantes matriculados con respecto a cada IEO
IE José Joaquín Casas (sede principal)	923	1342	419	33	31
Sede Mercedes de Calahorra	113	155	42	3	27
IE Diversificado (sede principal)	1058	1417	359	29	25
IE San Josemaría Escrivá de Balaguer (sede principal)	975	1208	233	19	19
IE Laura Vicuña (sede principal)	819	997	178	14	18
Sede Jardín Infantil Luna Nueva	181	195	14	1	7
Jardín Infantil Los Niños y su Mundo	187	196	9	1	5
Sede Santa Lucía	1044	1068	24	2	2
Sede General Santander	248	227	-21	-2	-9

Fuente: Secretaría de Educación del municipio de Chía, 2018. Elaboración propia.

Para efectos del caso de estudio se extrajo el capítulo correspondiente a volúmenes vehiculares de la avenida Pradilla, entre la glorieta de la calle 21 y la ruta 45A (Troncal Central o camino de los Zipas); los volúmenes obtenidos corresponden a los días 15 (viernes), 16 (sábado), 17 (domingo) y 18 (lunes) de noviembre de 2013, aforos obtenidos a partir de los conteos realizados en los puntos 6 y 7.

En la siguiente tabla se muestra el tránsito promedio diario de las 24 horas aforadas, obtenido a partir de los volúmenes vehiculares contabilizados en las calzadas norte y sur de la avenida Pradilla, en el tramo definido en el párrafo anterior (tabla 6).

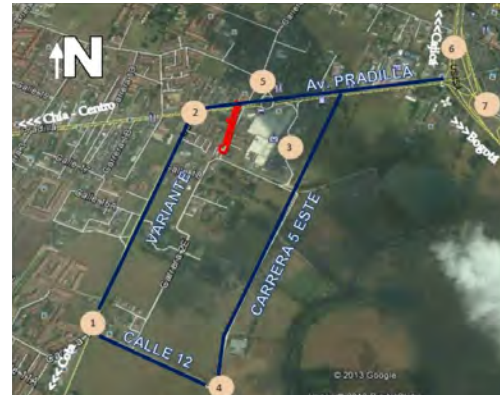


Figura 9. Localización de los puntos de aforo.
Fuente: SOP Consultoría, 2015.

Tabla 6

Volumen promedio 24 horas de la avenida Pradilla entre la ruta 45A (camino de los Zipas) y la glorieta Cra. 2.^a Este

Calzada norte - Av. Pradilla										
Día	Fecha	Autos	Buses	C2P	C2G	C3	C4	C5	>C5	Total
1	15/11/2013	15.736	1788	674	1637	212	70	121	286	20.524
2	16/11/2013	15.987	944	375	750	52	39	42	166	18.355
3	17/11/2013	16.804	1080	307	347	30	12	37	87	18.704
4	18/11/2013	15.790	1809	375	1186	123	95	82	304	19.764
Prom. típico		15.763	1799	525	1412	168	83	102	295	20.144
Prom. atípico		13.396	1012	341	549	41	26	40	127	18.530
TPD		15.944	1574	473	1165	132	67	84	247	19.686
Composición		81,0 %	8,0 %	2,4 %	5,9 %	0,7 %	0,3 %	0,4 %	1,3 %	
		81,0 %	8,0 %	11,0%						
Calzada sur - Av. Pradilla										
Día	Fecha	Autos	Buses	C2P	C2G	C3	C4	C5	>C5	Total
1	15/11/2013	16.048	1918	599	3005	488	170	241	546	23.015
2	16/11/2013	15.254	1543	383	2185	215	156	217	445	20.398
3	17/11/2013	15.025	1132	199	652	31	35	82	180	17.336
4	18/11/2013	17.165	2057	670	3118	532	211	287	624	24.664
Prom. típico		16.607	1988	635	3062	510	191	264	585	23.840
Prom. atípico		15.140	1338	291	1419	123	96	150	313	18.867
TPD		16.188	1802	537	2593	400	164	232	508	22.424
Composición		72,2 %	8,0 %	2,4 %	11,6 %	1,8 %	0,7 %	1,0 %	2,3 %	
		72,2 %	8,0 %	19,8%						
Ambas calzadas										
Día	Fecha	Autos	Buses	C2P	C2G	C3	C4	C5	>C5	Total
1	15/11/2013	31.784	3706	1273	4642	700	240	362	832	43.539
2	16/11/2013	31.241	2487	758	2935	267	195	259	611	38.753
3	17/11/2013	31.829	2212	506	999	61	47	119	267	36.040
4	18/11/2013	32.955	3866	1045	4304	655	306	369	928	44.428
Prom. típico		32.370	3786	1159	4473	678	273	366	880	43.984
Prom. atípico		31.535	2350	632	1967	164	121	189	439	37.397
TPD		32.132	3376	1009	3757	531	230	316	754	42.105
Composición		76,3 %	8,0 %	2,4 %	8,9 %	1,3 %	0,5 %	0,8 %	1,8 %	
		76,3 %	8,0 %	15,7 %						
Direccionalidad occidente - oriente										53,3 %

Fuente: SOP Consultoría, 2015.

De la anterior tabla se tiene que el 53,3 % de los vehículos transitan por el carril sur (en sentido occidente-oriente). La participación por tipo de vehículo es de 76,3 % para autos, 8,0 % para buses y el 15,7 % restante corresponde a los camiones.

El porcentaje de la hora pico respecto al promedio total es del 6,93 %, que corresponde a los 2918 vehículos mixtos de la hora máxima de las 16:45 a 17:45, dividido por el valor medio de los siete días en vehículos mixtos de la tabla anterior (42.105 vehículos mixtos/día), valor que utilizó el consultor para el cálculo del nivel de servicio.

La demanda está representada por los volúmenes vehiculares, distribuidos por movimiento para cada intersección y el tipo de regulación en cada nodo. Para alimentar el modelo se dispuso de la información de campo registrada durante la hora pico.

A continuación se muestra el nivel de servicio de cada una de las intersecciones evaluadas, por medio de la modelación efectuada por el consultor de la SOP, de acuerdo con la geometría de las vías analizadas y el tránsito actual en la hora de mayor demanda, mediante procesos de modelación estática y dinámica, basados en el HCM-2000 (tabla 7).

Tabla 7

Nivel de servicio de las intersecciones evaluadas. Situación actual

Intersección	Nivel de servicio
Avenida Pradilla por variante Cota-Chía	F
Calle 12 por variante Cota-Chía	F
Glorieta de la avenida Pradilla	C

Fuente: SOP Consultoría, 2015.

Tomando en consideración que actualmente la avenida Pradilla opera en niveles de servicio F, con la proyección normal de volúmenes vehiculares y la implantación de los proyectos urbanísticos, generará mayores inconvenientes en la movilidad de la vía. Por tal razón, es indispensable contar con una solución de infraestructura que permita generar mejoras en la circulación vehicular del municipio, como las troncales previstas por el Plan de Ordenamiento Territorial (POT).

Análisis de la representación gráfica

Se obtiene la georreferenciación de los siniestros viales en el municipio de Chía, como puntos localizados en el territorio, y la zona urbana en blanco, definida por el Plan de Ordenamiento Territorial, Acuerdo 100 de 2016. La zona rural está organizada administrativamente por veredas.

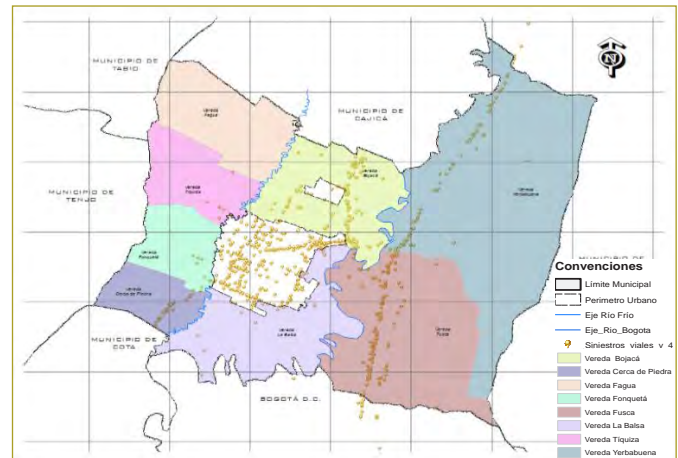


Figura 10. Plano del municipio de Chía con la localización de los siniestros viales.

Fuente: Base de datos SMMCH, 2018. Elaboración propia.

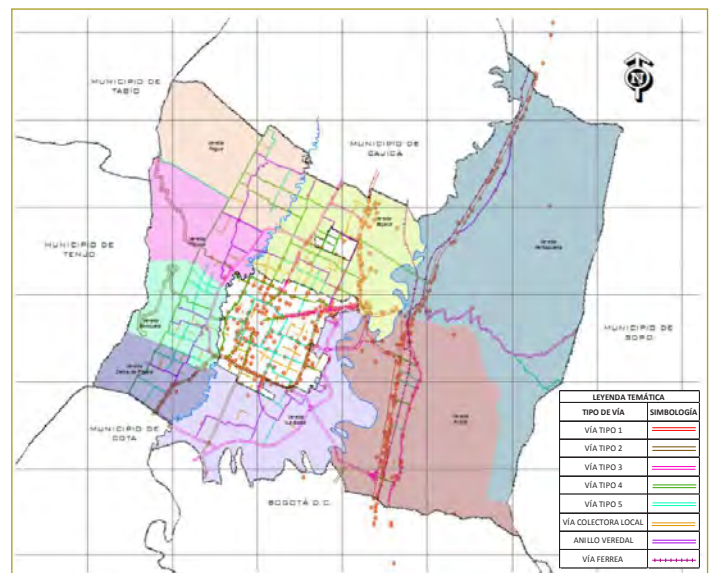


Figura 11. Plano del municipio de Chía con la localización de los siniestros viales.

Fuente: Base de datos SMMCH y el plan vial POT. Acuerdo 100 de 2016 del municipio de Chía. Elaboración propia.

Análisis de riesgo

Con el objetivo de realizar un análisis de densidad para poder localizar los puntos de calor donde la concentración de los accidentes es mayor, con la ayuda de la herramienta de análisis de densidad (*spatial analyst tools - density - Kernel density*) de Arcgis se obtuvo la figura 14. El análisis de densidad toma cantidades conocidas de algunos fenómenos y las expande a través del paisaje, basándose en la cantidad que se mide en cada ubicación y la relación espacial de las ubicaciones de las cantidades medidas. Las superficies de densidad muestran dónde se concentran las entidades de punto o línea (Esri, 2018).

Se observa que la principal concentración de siniestros viales que se presentan en la zona urbana es en la avenida Pradilla, en la glorieta con carrera 2.^a Este (frente a Jumbo).

Producto de la inspección visual al lugar, se identificaron las causas de esta concentración de siniestros viales. Por ejemplo, el tramo de vía conecta una vía nacional como la autopista Norte, vía Chía-Cajicá, con la variante Chía-Cota; su diseño geométrico presenta una dificultad de giro o da la sensación de que la vía la tiene el que está en la avenida Pradilla y no el que se encuentra dentro de la glorieta; adicionalmente, transitan por

este tramo varias rutas de transporte público urbano, intermunicipal, escolar, etc. También hay superposición de rutas y pasos peatonales con dificultad.

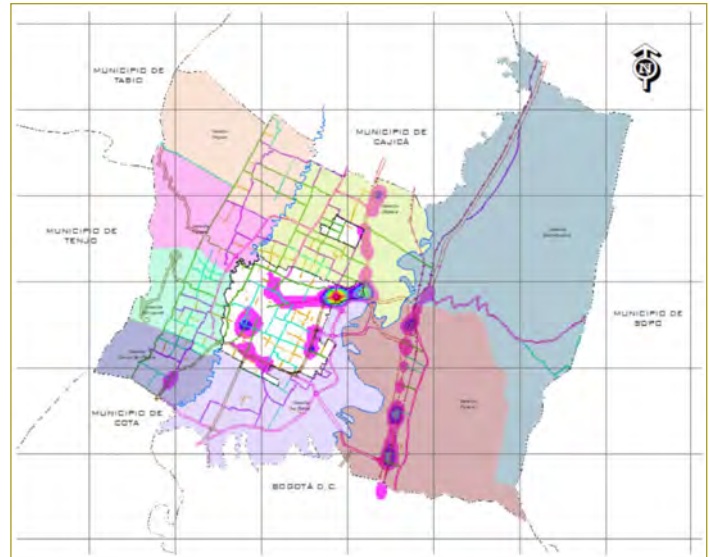


Figura 12. Plano del municipio de Chía con análisis de densidad de los siniestros viales.

Fuente: Base de datos SMMCH, 2018. Elaboración propia.

Otros sectores en la zona urbana que presentan concentración de siniestros viales son la intersección



Figura 13. Plano de la zona urbana del municipio de Chía con análisis de densidad de los siniestros viales.

Fuente: Base de datos SMMCH, 2018. Elaboración propia.

de la calle 7 con carrera 12, donde se encuentran localizados varios equipamientos públicos, como la plaza de mercado, el terminal de transporte intermunicipal y el urbano colectivo, la intersección del camino de los Zipas, vía Chía-Cajicá y la avenida Pradilla, y el intercambiador de Centro Chía, concesionado Accenorte, de carácter nacional.

Determinación de IEO para caso de estudio

La IEO que formara parte de la caracterización para definir los lineamientos es la IE San Josemaría Escrivá de Balaguer (sede principal), localizada en el municipio de Chía, y de conformidad a los siguientes lineamientos:

Por cobertura, la IE San Josemaría Escrivá de Balaguer (sede principal), para el año 2017 atendió a 975 estudiantes y para el año 2018 atendió a 1208 estudiantes, lo que corresponde a un crecimiento del 19 %; esto significa un total de 233 estudiantes nuevos, recibidos durante el año 2017 - 2018 en el municipio de Chía, lo que la clasifica dentro de las tres IEO que más cobertura tienen en el municipio de Chía. Ver tabla 5. Análisis del número de niños matriculados Zona Urbana (2017 -2018).

En cuanto al alto nivel de riesgo, la IE San Josemaría Escrivá de Balaguer (sede principal) se encuentra ubica-

da a menos de 400 metros de dos de los lugares donde se concentran el mayor número de siniestros viales en la zona urbana del municipio de Chía: la glorieta de la avenida Pradilla con carrera 2.^a Este y el intercambiador frente a Centro Chía.

Caracterización de IEO. Caso de estudio

Aplicación del manual

IE San Josemaría Escrivá de Balaguer (sede principal)

Fase 1. Clasificación de centros escolares y entornos

Según tipo de población

Por el tipo de población que tiene el municipio de Chía, la IE San Josemaría Escrivá de Balaguer (sede principal) se encuentra dentro de la zona urbana del municipio de Chía. Tiene una población proyectada de conformidad con los datos del DANE (DANE, 2018) y una población estimada de 135.752 para el 2018, acorde con centros escolares de ciudades medianas.

El municipio de Chía, situado a 10 kilómetros al norte de Bogotá, D.C., forma parte de los 116 municipios del departamento de Cundinamarca; su cabecera urbana principal está localizada a los 4° 52' latitud norte y 74° 04' longitud oeste, y a una altura sobre el nivel medio del mar de 2550 metros.

División político-administrativa

El municipio de Chía tiene una extensión de 80 kilómetros cuadrados, aproximadamente; limita por el norte con el municipio de Cajicá, por el oriente con el municipio de Sopó, por el sur con Bogotá, Distrito Capital y con el municipio de Cota, por el occidente con los municipios de Tenjo y Tabio. La mayor parte de su territorio corresponde a la estructura orográfica de sus cerros orientales y occidentales, y en menor proporción a la zona del valle con terrenos planos, donde se enmarcan ocho veredas: Bojacá, Yerbabuena, Fusca, La Balsa, Cerca de Piedra, Fonquetá, Tíquiza, Fagua, y dos zonas urbanas.

El sistema educativo colombiano lo conforman la educación inicial, la educación preescolar, la educación básica (primaria cinco grados y secundaria cuatro grados), la educación media (dos grados y culmina con el título de bachiller) y la educación superior.

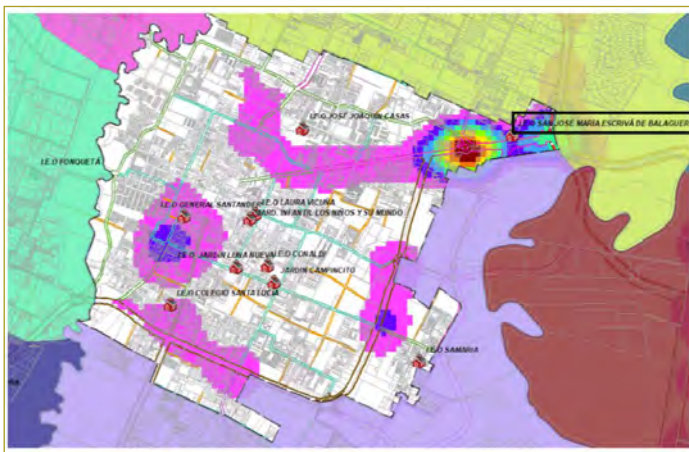


Figura 14. Localización de las IEO del municipio de Chía en la zona urbana versus el análisis de densidad de los siniestros viales.

Fuente: Base de datos SMMCH y Secretaría de Educación, 2018. Elaboración propia.



Figura 15. División administrativa del municipio de Chía.

Fuente Osiae, 2016.

Teniendo en consideración el sistema educativo colombiano, el contenido del manual estará enfocado en centros educativos en los que se imparta al menos uno de los siguientes niveles:

- Educación preescolar
- Educación básica
- Educación media

Según la distancia a la que se encuentre la residencia de los alumnos

Una de las variables más importantes que hay que tomar en cuenta es la distancia existente entre el colegio y las residencias de los alumnos. En este sentido, se van a establecer cuatro zonas:

Zona 1

La distancia máxima entre el colegio y la residencia del alumno es de 400 a 500 metros.

En la auditoría se analizarán las condiciones de accesibilidad y seguridad vial en el entorno inmediato del colegio, así como en los caminos de acceso, para que sea factible el acceso seguro de los alumnos a pie o en bicicleta, sin que sea necesario que un adulto los acompañe.

La IE San Josemaría Escrivá de Balaguer (sede principal) se encuentra localizada sobre la avenida Pradilla

y la Cra. 5A Este. Dentro de esta zona se encuentran localizadas adicionalmente la Cra. 2 Este, la calle 24, vía Chía - Cajicá, y la avenida Chilacos. La señalización en esta zona es deficiente, los andenes se encuentran en mal estado, discontinuos, y en otros sectores la franja para el andén no existe; en otras palabras, no hay una red de infraestructura segura para el peatón, ni se tienen las condiciones de infraestructura segura, como sardineles. En algunos tramos los andenes se encuentran al mismo nivel de la rasante de la vía, lo que permite el parqueo y obstaculiza el paso peatonal. Los dos tramos de ciclorruta dentro de la zona están localizados en la Cra. 2 Este con 531 m y la avenida Chilacos con 140 m dentro de la zona 1, los cuales no tienen conexión con la IE; es decir, que sobre la avenida Pradilla y la Cra. 5 Este no se dispone de infraestructura para este medio de transporte.



Figura 16. Zona 1 de la IE San Josemaría Escrivá de Balaguer (sede principal).

Fuente: Inspección 2018.

Se requiere mejorar las condiciones de accesibilidad en el entorno escolar. Se sugiere, como medida a corto plazo, la implementación de un circuito de vías ciclo-adaptadas, identificadas en la *Guía de cicloinfraestructura para ciudades colombianas*, que se reglamentó mediante la Resolución 3258 del 3 de agosto de 2018, expedida por el Ministerio de Transporte. Para este caso de estudio se adoptaría la banda ciclopreferente, espacio de la calzada dedicado a la bicicleta, pero que excepcionalmente puede ser utilizado por el resto de los vehículos. Esta ciclorruta se puede implementar sobre las vías



Figura 17. Bandas ciclopreferentes.

Fuente: Guía de cicloinfraestructura para ciudades colombianas.

que conectan las vías que cuentan con carril exclusivo para bicicleta (avenida Chilacos y Cra 2.^a Este) con las vías que conectarían a la institución (avenida Pradilla, calle 24, Cra. 5.^a Este y vía camino de los Zipas Chía-Cajicá), lo que aumentaría en 2,4 km la infraestructura para ciclistas. Esto se puede implementar con el uso de la misma infraestructura actual, unidireccionales y señalizándola mediante una línea discontinua.

A largo plazo, hay que ampliar las vías en las condiciones estipuladas en el Plan de Ordenamiento Territorial:

Carrera 2.^a Este, entre la avenida Pradilla y la avenida camino de los Zipas (vía Chía-Cajicá), denominada en el Plan de Ordenamiento Territorial como un anillo veredal de 16,00 m. De conformidad con la Resolución 3177 de 2017, el caso 1 sección vial de andenes será de 2,70 m a cada costado, calzada vehicular de 7,50 m y ciclorruta a un costado de 3,0 m a nivel de calzada.

Avenida Pradilla desde Centro Chía hasta el parque Ospina, denominada en el Plan de Ordenamiento Territorial como un arterial V-3, tramo Centro Chía - carrera 2.^a Este de 43,00 m. De conformidad con la Resolución

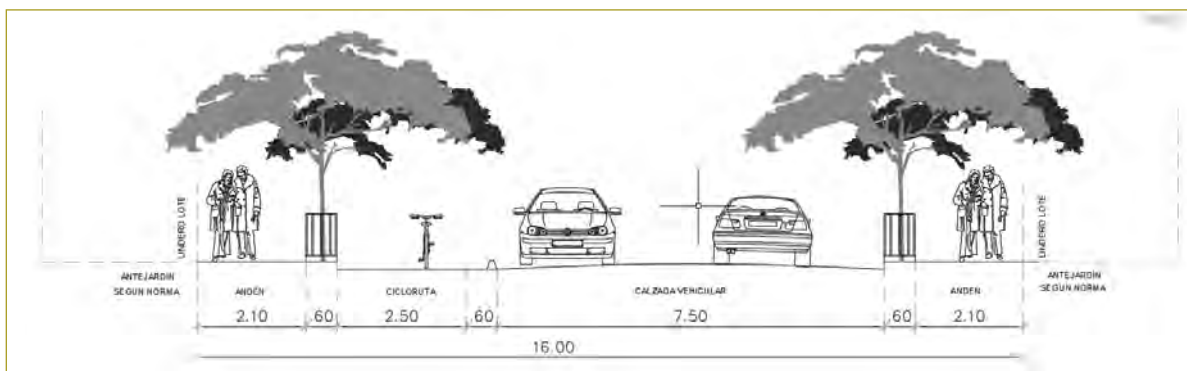


Figura 18. Sección transversal típica del anillo veredal.

Fuente: Resolución 3177 del 27 de septiembre de 2017 del municipio de Chía.

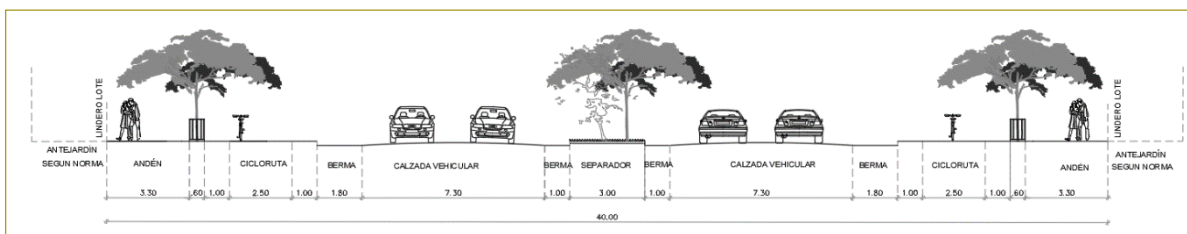


Figura 19. Sección transversal típica del arterial V3, caso 4.

Fuente: Resolución 3177 del 27 de septiembre de 2017 del municipio de Chía.

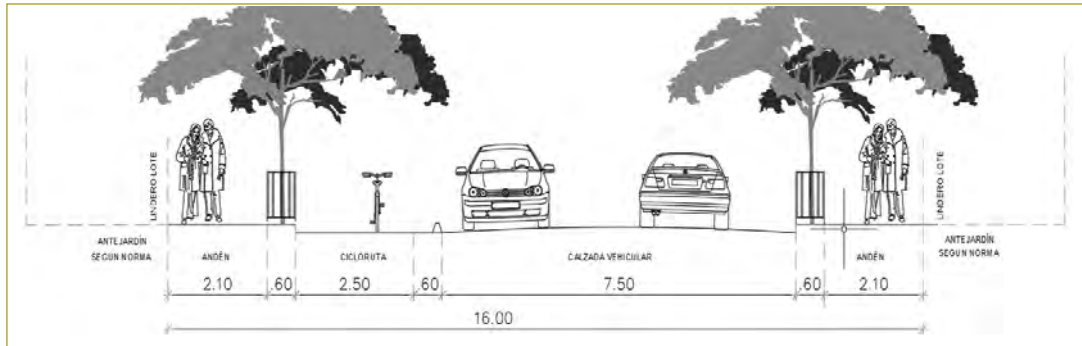


Figura 20. Sección transversal típica, local V4, caso 1.

Fuente: Resolución 3177 del 27 de septiembre de 2017 del municipio de Chía.

3177 de 2017, habrá una sección vial de andenes de 3,90 m en ambos costados, calzadas vehiculares de 7,30 m en los dos sentidos, bermas de 2,80 m, separador central de 3,00 m y ciclorruta de 4,50 m en ambos costados.

Calle 24 entre la avenida Paseo de los Zipas y carrera 2 Este, denominada en el Plan de Ordenamiento Territorial como una vía local V4 de 16,00 m, que de conformidad con la Resolución 3177 del 27 de septiembre de 2017 debe tener una sección vial de andenes de 2,70 m a cada costado, calzada vehicular de 7,50 m y ciclorruta de 3,10 m.

En cuanto a las condiciones de seguridad vial en el entorno inmediato del colegio, de acuerdo con el análisis de densidad hecho se observa que los dos núcleos generadores del mayor número de siniestros viales en el municipio de Chía están localizados a menos de 500 m de la institución educativa: en la glorieta de la avenida Pradilla con carrera 2 Este y la intersección de la avenida Pradilla con el intercambiador del camino de los Zipas, frente al Centro Comercial Centro Chía.

De la misma forma se observa que frente al colegio hay un semáforo de peatones y zona peatonal definida, lo que ha mejorado notablemente la seguridad de los alumnos y la reducción de los siniestros viales en este sector.

Zona 2

La distancia máxima entre el colegio y la residencia del alumno es de 1000 metros.

En este caso, la auditoría estará enfocada en analizar los corredores peatonales usados por los alumnos que se desplazan a pie acompañados por adultos, en mejorar sus condiciones, así como en buscar corredores peatonales más seguros en ese entorno.

En la zona 2 se observa una deficiente red de infraestructura segura; en algunos tramos está consolidada la zona peatonal, en otros se halla en buen estado y continua como el tramo de la avenida Chilacos, y en otro se encuentra deteriorada, como la avenida Pradilla, donde se identifica la zona peatonal pero con deficiencia, ya que no cuenta con la continuidad; en algunos tramos se encuentra al mismo nivel de la vía, lo que permite el parqueo de vehículos motorizados. Además, carece de elementos de seguridad y de señalización adecuada en las intersecciones; en la Cra. 2.^a Este los andenes existentes son los de algunos paramentos de casas o conjuntos, pero no se encuentran articulados, por lo que existen zonas donde los andenes están suspendidos o eliminados. Por esto los peatones compiten con los vehículos motorizados y las bicicletas, que cuentan con su infraestructura.

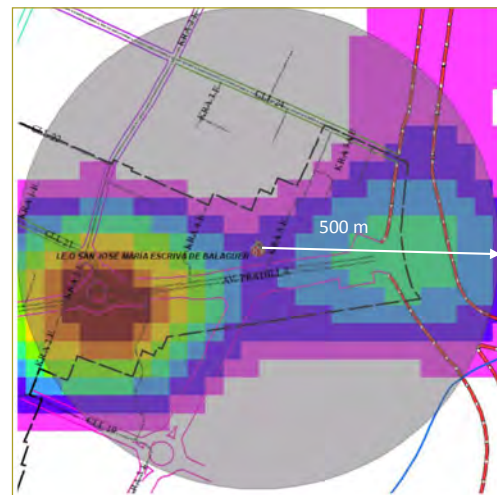


Figura 21. Densidad de siniestros viales versus zona 1. Entorno escolar IEO San Josemaría Escrivá de Balaguer.

Fuente: SMMCH y SEMCH.



Figura 22. Zona 2 de la IE San Josemaría Escrivá de Balaguer (sede principal).

Fuente: Inspección 2018. Elaboración propia.

En cuanto a la infraestructura para bicicletas, existe ciclorruta bidireccional en los tramos que corresponden al camino de los Zipas, vía Chía-Cajicá, costado occidental; la autopista Norte, frente a Centro Chía, en el costado oriental, y en la Cra. 2.^a Este en el costado occidental, y un tramo de la ciclorruta unidireccional en ambos costados (norte y sur) de la avenida Chilacos, tramos que no se encuentran interconectados entre sí ni con pasos seguros en las intersecciones. Como se observó en la zona 1, esta infraestructura no tiene conexión con la IEO San Josemaría Escrivá de Balaguer.

En esta zona se requiere dar continuidad a la propuesta que se presentó en la zona 1 dentro de las actividades propuestas a mediano plazo. A corto plazo se pretende eliminar los obstáculos de la ciclorruta

de la avenida Chilacos, como los pompeyanos de los paraderos, y generar las conexiones seguras entre los otros tramos de ciclorrutas, para así ir armando una red eficiente.

Zona 3

La distancia máxima entre el colegio y la residencia del alumno es de 3000 metros.

La auditoría de seguridad vial estará enfocada en el análisis, en su caso, del estado de conservación de carriles bici, y en caso contrario, en la valoración del establecimiento de posibles rutas en bicicleta seguras para los alumnos.

Zona 4

La distancia entre el centro escolar y la residencia es mayor de 3000 metros.

La auditoría se centrará en el estudio de posibles áreas de aparcamiento en el ámbito cercano al colegio, desde donde sea posible enlazar con los caminos seguros usados por los alumnos que se desplazan a pie.

Así mismo, se analizarán tanto las condiciones de seguridad vial en que se desarrollan las rutas escolares si ya estén implantadas, y en caso contrario, se llevará a cabo una valoración en términos de seguridad vial para la implantación de una o varias rutas escolares, tanto en lo que se refiere a las rutas como a las paradas.

Análisis e interpretación del entorno escolar IEO. Caso de estudio

Teniendo en cuenta la metodología planteada y la aplicación del caso de estudio, se identifican los lineamientos

Tabla 8
Lineamientos de auditoría

LINEAMIENTOS AUDITORIA Análisis e Interpretación del Entorno Escolar IEO Caso de Estudio	<p>Fase I: Recopilación de datos de la Institución Educativa Oficial IEO SAN JOSÉ MARIA ESCRIVA DE BALAGUER - SEDE PRINCIPAL</p>	<p>• Actividad 1: Recopilación de la información de la IEO SAN JOSÉ MARIA ESCRIVA DE BALAGUER - SEDE PRINCIPAL aplicando el instrumento descriptivo, mediante el cual se obtuvieron los datos generales de la IEO.</p>	<p>dirección de la IEO SAN JOSÉ MARIA ESCRIVA DE BALAGUER - SEDE PRINCIPAL y su entorno, con el fin de establecer las características y la situación de la institución con respecto al entorno de seguridad vial.</p>		
	<p>Fase II: Realización de la inspección a detalle para determinar las condiciones en las que se encuentra IEO SAN JOSÉ MARIA ESCRIVA DE BALAGUER - SEDE PRINCIPAL en materia de seguridad vial.</p>	<p>• Actividad 1: Identificar la muestra a la cual fue aplicado el instrumento, teniendo en cuenta el tipo de población representada por el número de habitantes de la IEO SAN JOSÉ MARIA ESCRIVA DE BALAGUER - SEDE PRINCIPAL.</p>	<p>• Actividad 2: Aplicar y analizar el instrumento evaluativo según las respuestas obtenidas a la encuesta realizada.</p>	<p>• Actividad 3: Diagnosticar la situación actual con relación a la seguridad vial en la IEO SAN JOSÉ MARIA ESCRIVA DE BALAGUER - SEDE PRINCIPAL de los datos obtenidos en la encuesta.</p>	
	<p>Fase III: Realización de la Auditoría de Seguridad Vial para identificar los factores de riesgo detectados.</p>	<p>• Actividad 1: Identificar el área de estudio</p>	<p>• Actividad 2: Realizar y aplicar la lista de control a fin de inspeccionar los elementos requeridos en la auditoría de seguridad vial.</p>	<p>• Actividad 3: Diagnosticar la situación de seguridad vial a través del análisis de los datos obtenidos en la lista de chequeo.</p>	<p>• Actividad 4: Identificar los factores de riesgos a partir de los resultados obtenidos en la fase anterior con el objetivo de entrega las recomendaciones y las posibles soluciones a las deficiencias encontradas en el sistema de</p>

Fuente: SEMCH, 2018. Fundación Mapfre, 2014. Manual de Inspecciones de Seguridad Vial en Entornos Escolares.

que hay que considerar al hacer una evaluación en un entorno escolar, los cuales se presentan a continuación.

CONCLUSIONES

Los siniestros viales presentan una localización, de acuerdo con el análisis de densidad, mayor en algunos sectores. Estos puntos críticos, como la glorieta de la avenida Pradilla con carrera 2 Este, la avenida Pradilla e intercambiador de Centro Chía, autopista Norte en el peaje de los Andes, ingreso al predio denominado Aguapanes Internacional y la intersección de La Caro, se deberán analizar específicamente para determinar cuáles son las causas principales y adoptar las medidas que se puedan implementar con el objeto de reducir el riesgo, tema que no se ahondó en este proyecto por no estar dentro del objetivo de la tesis, pero que se puede desarrollar en otros estudios de caso.

El municipio de Chía tiene varias actividades económicas reconocidas, como la vivienda campestre y recientemente las edificaciones en altura, las cuales la han identificado como una ciudad dormitorio; esto también hace que sea una ciudad que genera una alta demanda de servicios para sus habitantes, como la educación y la infraestructura vial, que no son caso de este estudio, por lo que se observa que la población ha tenido un crecimiento significativo pero las IEO y las vías no, lo que ha generado un déficit en áreas, IO e IC, en los equipamientos de las IEO y en las vías que garantizan una movilidad segura para uno de los sectores de la población más vulnerables, como los estudiantes (peatones y ciclistas).

En la IE San Josemaría Escrivá de Balaguer hay déficits claros de área de aulas de clases (hacinamiento en ambiente A), al igual que el índice de ocupación e índice de construcción de acuerdo con la Norma Técnica Colombiana 4595, de marzo de 2006, expedida por el Ministerio de Educación Nacional NTC 4595. Sumado a esto, los colegios deben migrar a la jornada única, lo que aumentará el déficit al atender simultáneamente a los estudiantes de ambas jornadas.

Por otro lado, gran parte de la población educativa, es decir, el 26 % y 18 % de los estudiantes de este mismo colegio, se movilizan a pie y en bicicleta, respectivamente, por lo que representan la población más vulnerable y superan la tasa de los transportados en ruta escolar (38 %). En cuanto al medio de transporte motorizado

más utilizado por la población encuestada, el primero es el transporte escolar, que corresponde al 38 %, seguido por el transporte público con el 13 %, pero si valoramos juntos los medios de transporte no motorizados, como la bicicleta y los viajes a pie, se tendría que el 44 % de la población encuestada se moviliza a través de estos medios de transporte sostenible, por lo que ocuparía el primer lugar

A corto plazo la solución al déficit de espacios está dada, ya que se ha contemplado el traslado de la institución educativa. De la misma manera, se sugiere como medida a corto plazo la implementación de un circuito de vías cicloadaptadas, identificadas en la *Guía de cicloinfraestructura para ciudades colombianas*, que se reglamentó mediante la Resolución 3258 del 3 de agosto de 2018, expedida por el Ministerio de Transporte. Para este caso de estudio se adoptaría la banda ciclopreferente, espacio de la calzada dedicado a la bicicleta, pero que excepcionalmente puede ser utilizado por el resto de los vehículos. Esta ciclorruta se puede implementar sobre las vías que conectan las vías que cuentan con carril exclusivo para bicicleta (avenida Chilacos y Cra. 2.^a Este) con las vías que conectarían a la institución (avenida Pradilla, calle 24, cra. 5.^a Este y vía camino de los Zipas Chía-Cajicá), lo que aumentaría en 2,4 km la infraestructura para ciclistas, la cual se puede implementar con el uso de la misma infraestructura actual, unidireccionales y señalizándola mediante una línea discontinua.

A mediano plazo, se propone hacer un análisis de las rutas escolares. Por último, a largo plazo se plantea ejecutar las vías como están proyectadas en el Plan de Ordenamiento Territorial, dándoles prioridad a las vías que conectan las instituciones educativas.

Este estudio permite identificar algunos elementos que hay que entrar a evaluar, y las dependencias e instituciones que deben evaluar la expedición de la licencia de nuevos proyectos educativos.

Uno de los beneficios tangibles y generales de adoptar medidas de movilidad sostenible es que en la medida en que se disponga de infraestructura que garantice la seguridad de los usuarios que se desplazan caminando y en bicicleta, se tendrá una continuidad de los usuarios actuales, además de que se incentivará el uso de estos medios alternativos de transporte, en vez de medios motorizados. Adicionalmente, permite priorizar el uso de los recursos públicos mediante la sustentación téc-

nica de las inversiones más importantes que debe hacer la administración pública.

Así las cosas, se propone hacer un manual de auditorías de seguridad vial utilizando los lineamientos expuestos en el presente trabajo de grado, con el propósito de que las IEO del municipio de Chía puedan evaluar las condiciones en las cuales se encuentran y el nivel de conocimiento que poseen los estudiantes acerca del tema.

REFERENCIAS

- BID (2013). *Avances en seguridad vial en América Latina y el Caribe, 2010-2012*. (A. D.-I.-P.-I.-P. Taddia, Ed.). Banco Interamericano de Desarrollo.
- DANE (5 de diciembre de 2018). *Departamento Administrativo Nacional de Estadística*. Obtenido de <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/proyecciones-de-poblacion>.
- De la Peña, E., Millares, E., Díaz, L., Taddia, A., & Bustamante, C. (2016). *Experiencias de éxito en seguridad vial en América Latina y el Caribe: resumen ejecutivo*.
- De la Peña, E., Millares, E., Taddia, A. P., & Bustamante, C. (2016). *Experiencias de éxito en seguridad vial en América Latina y el Caribe: resumen ejecutivo*.
- Esri (4 de diciembre de 2018). *ArgisPRO*. Obtenido de <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/tool-reference/spatial-analyst/understanding-density-analysis.htm>.
- Laria-del-Vas, J., Monclús-González, J., & Ortega-Perez, J. (2014). *Manual de Inspecciones de Seguridad Vial en Entornos Escolares*. Fundación Mapfre. Trabajo elaborado en colaboración con la Asociación Española de la Carretera.
- Mignot, D. (2017). *Topical collection on human factors and safety*.
- Municipio de Chía (3 de diciembre de 2018). *Consulta de procesos Secop*. Obtenido de <https://www.contratos.gov.co/consultas/detalleProceso.do?numConstancia=18-12-7584027>.
- Peden, M. (2004). *Informe mundial sobre prevención de los traumatismos causados por el tránsito (N.º 599)*. Pan American Health Org.
- Peden, M., Oyegbite, K., Ozanne-Smith, J., Hyder, A. A., Branche, C., Rahman, A. F., & Bartolomeos, K. (2012). *Informe mundial sobre prevención de las lesiones en los niños*. Washington, DC: Organización Mundial de la Salud, Organización Panamericana de la Salud, Unicef.
- Sanz, A. (2004). Pasos adelante: ideas para recuperar el protagonismo del peatón en la movilidad. *Revista de Colegios de Ingenieros de Camino, Canales y Puertos IT*, 69, 61, 62.
- Semch (2017). *Caracterización del perfil sector educativo 2016-2017*. Chía: Municipio de Chía.
- World Health Organization (WHO) (2013). *Informe sobre la situación mundial de la seguridad vial: apoyo al decenio de acción*.

Sistemas de prerrefuerzo en frentes de excavación de túneles en suelo y roca

Pre-reinforcement systems in excavation fronts for soil and rock tunnels

DAMARIS CONTRERAS CARRILLO¹ - RAMIRO GUTIÉRREZ RODRÍGUEZ²

1. Magíster en Ingeniería Civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
2. Director del Departamento de Túneles de Ingetec S.A.

damaris.contreras@mail.escuelaing.edu.co - ramiro.gutierrez@escuelaing.edu.co

Recibido: 15/01/2019 Aceptado: 01/02/2019

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

Resumen

Esta investigación tuvo como finalidad desarrollar una metodología práctica para diseñar los elementos de prerrefuerzo o presostenimiento utilizados para la estabilización temporal del frente de excavación de un túnel. El objetivo es brindar una herramienta práctica que facilite a los ingenieros el cálculo o estimación del sistema de presostenimiento, usando enfilajes y pernos en fibra de vidrio como sistema de estabilización del frente en túneles excavados en materiales de suelo con baja cohesión y relativamente superficiales.

Para esto se tomó como base el método analítico de Tamez [12], quien lo desarrolló a partir de varias experiencias de túneles excavados en Ciudad de México para el metro. Con dicho método se aplican las ecuaciones planteadas por ese autor mediante análisis de sensibilidad de los parámetros de resistencia del suelo, el diámetro de excavación del túnel y la longitud de avance, y con ello se prepararon varios ábacos que simplifican el proceso de diseño. De igual manera, para explicar el procedimiento de la metodología analítica y el uso de los ábacos de diseño se realizó un ejemplo típico que se complementó con la modelación numérica mediante el *software* RS2 o Phases 2D (V9). De los resultados obtenidos se pudo establecer que el uso de elementos de prerrefuerzo antes de la excavación mejora considerablemente las condiciones de estabilidad del frente de excavación, limitando la zona de falla, las deformaciones y los desplazamientos en el frente y la clave, eliminando consecuentemente posibles fallas en chimenea.

En la metodología propuesta no se considera el diseño para garantizar la estabilidad a largo plazo o permanente del túnel, sino tan sólo la estabilidad temporal del frente de excavación.

Palabras claves: túnel, prerrefuerzo o presostenimiento, deformaciones, zona de falla, enfilajes, pernos en fibra de vidrio, frente de excavación.

Abstract

The purpose of this research was to develop a practical methodology for the design of the pre-reinforcement or pre-support used in the excavation front as temporary stabilization. The objective is to afford a practical tool that eases calculation and estimation of pre-reinforcement systems, using forepoling and fiberglass bolt as front stabilization.

The analytic Tamez methodology was used as its basis and through sensibility analysis of the ground's resistance parameters, the tunnel's excavation parameters, and the feed length, abacuses were obtained to simplify the design. Similarly, to explain the analytics methodology procedure and the abacus use in design, a typical example was made, complemented with numerical software models like R2 and Phases 2D (V9). Due to the results achieved, the benefits of pre-reinforcement were established, the stability conditions were substantially improved in the excavation front, limiting the failure zone, distortions, front displacements, and crown tunnel, and, consequently, chimney failures are avoided.

The proposal does not consider the design to ensure long term or permanent stability; it just considers the temporal stability in the excavation front.

INTRODUCCIÓN

El crecimiento acelerado de la infraestructura vial en Colombia, a raíz de los acuerdos comerciales firmados con otras naciones y de la necesidad de ser más competitivos, ha impulsado al país a invertir en el mejoramiento de la malla vial existente y en la construcción de nueva infraestructura, incluyendo la urbana. Por otro lado, una geología compleja y la topografía tan variada del territorio colombiano, así como la necesidad de reducir tiempos y distancias de recorrido, han llevado a los ingenieros a implementar el diseño y la construcción de una cantidad importante de túneles viales, para lo cual se ha requerido la utilización de técnicas y herramientas que faciliten el diseño y la construcción de dichos túneles. No obstante, en la geología colombiana existen muchos materiales con fallas o condiciones difíciles que afectan la excavación de los túneles, lo que consecuentemente lleva a utilizar sistemas de presoporte para garantizar la estabilidad del frente de excavación.

Existen metodologías empíricas o analíticas que permiten diseñar elementos de presostenimiento, pero éstas no ofrecen herramientas prácticas para el diseño y no consideran el diseño de un sistema de presoporte combinado. Adicionalmente, para emplear metodologías numéricas se requieren *softwares* especializados, de altos costos, que implican largas horas de modelación y pericia en su manejo. Ante tal necesidad, se propuso hacer este trabajo para desarrollar una metodología práctica para el diseño de un sistema de prerrefuerzo en el frente de excavación, utilizando como elementos de sostenimiento enfilajes y pernos en fibra de vidrio, en materiales deleznales o de muy baja cohesión.

La metodología propuesta se desarrolla en función de un método analítico que evalúa el factor de seguridad en el frente de excavación de un túnel. El análisis se hace para dos escenarios o condiciones: sin considerar soporte y considerando soporte con enfilajes y pernos en fibra de vidrio, para diferentes parámetros de resistencia de suelo, longitud de avance y diámetro de excavación. Finalmente, se plantean unos ábacos de diseño y se realiza un ejemplo típico del método analítico, que luego se complementa con modelación numérica en 2D, mediante el *software* RS2 de Rocscience. Con esto se evalúa el comportamiento del frente de excavación del túnel (extrusión y convergencia).

El propósito de este trabajo es dejar una guía y una serie de ábacos de diseño que les permitan a los ingenieros facilitar el cálculo o la estimación de los elementos de presostenimiento en un frente de excavación de un túnel.

MÉTODOS PARA LA EXCAVACIÓN DE TÚNELES

Entre los métodos utilizados para la excavación de túneles se destacan los métodos convencionales, el método NATM (nuevo método austriaco) y el método Adeco (método de control de las deformaciones).

Métodos convencionales

Estos métodos, los primeros utilizados para la excavación de túneles, consisten en la excavación de pequeñas secciones de área que se van entibando a medida que avanza la excavación. Tales métodos dieron paso al nuevo método austriaco. En la figura siguiente se puede observar un método convencional con secciones parcializadas (figura 1).

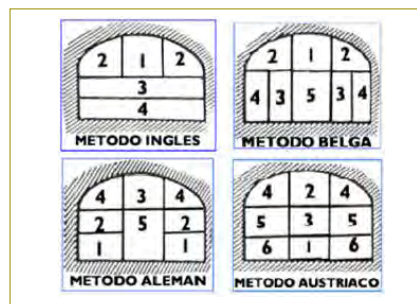


Figura 1. Métodos convencionales.

Fuente: López Jimeno, 1997.

Método NATM (nuevo método austriaco)

Se basa principalmente en dejar relajar el estado de esfuerzos alrededor de la excavación, permitiendo deformaciones controladas de la sección hasta el punto de que el sostenimiento flexible controle dicha deformación. La filosofía de diseño del método NATM integra el terreno que rodea la excavación y el anillo estructural de soporte formado en el entorno a la cavidad.

Este método está enfocado principalmente en el análisis de excavaciones de túneles en roca y en el diseño del sistema de soporte (figura 2), mas no hace énfasis en el diseño del presoporte (referencia [5]).

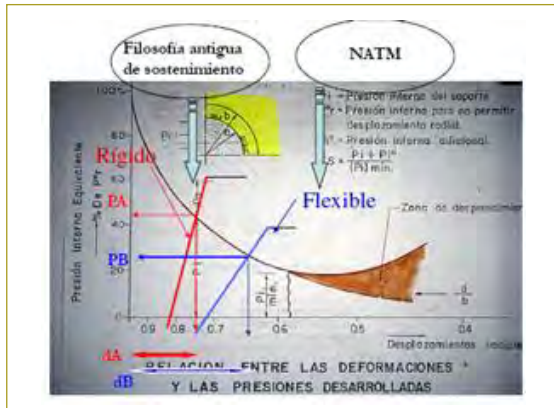


Figura 2. Filosofía del método NATM.
Fuente: Ingetec, 2015.

Sistema Adeco (análisis de la deformación controlada en rocas y suelos)

Se introdujo por primera vez en Italia, gracias al profesor Lunardi [8].

En esta metodología se considera importante analizar la causa que genera la deformación del túnel y no sólo la respuesta de deformación del medio. Es decir, se plantea que el éxito para el control del comportamiento tensodeformacional de un túnel está en actuar primero en la rigidez de la zona de avance, controlando la extrusión y la convergencia (figura 3). En otras palabras, esto se logra utilizando un presostenimiento. Con este método se introdujo el concepto de presoporte o presostenimiento para la excavación de túneles.

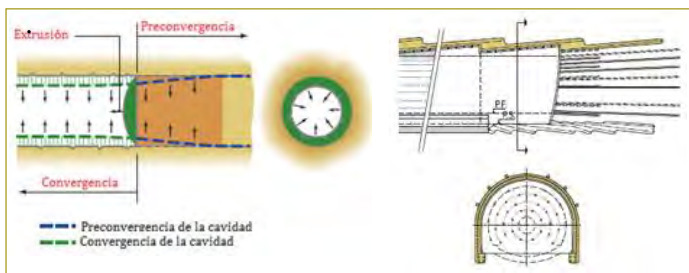


Figura 3. Control de extrusión y convergencia.
Fuente: Lunardi, 2008.

DEFINICIÓN DEL SISTEMA DE PRERREFUERZO

El prerrefuerzo es un conjunto de elementos que se instalan en el terreno para proporcionar la estabilidad temporal del frente de avance durante la excavación y mejorarla. Se usan en portales, en suelos deleznables con baja cohesión o en macizos rocosos de muy mala calidad geotécnica.

Entre los elementos de prerrefuerzo utilizados se encuentran los enfilajes, los pernos en fibra de vidrio y las inyecciones.

Para el desarrollo de este trabajo no se tuvo en cuenta el efecto de mejoramiento del terreno mediante inyecciones, y sólo se consideró el mejoramiento causado por el efecto mecánico de los sistemas de presostenimiento con enfilajes y pernos en fibra de vidrio.

Enfilajes

Tienen como función soportar y transmitir las cargas concentradas sobre la clave del túnel, reduciendo el esfuerzo principal mayor (σ_1) en el frente de excavación (figura 4).

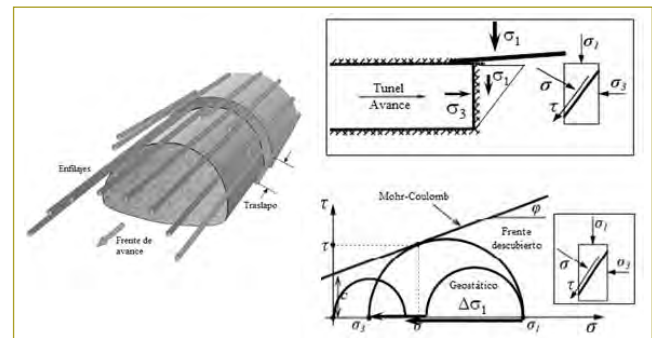


Figura 4. Sistema prerrefuerzo con enfilajes.
Fuente: Kavvadas, 2005.

Pernos en fibra de vidrio

Su función es restringir las deformaciones en el frente de avance (extrusión), incrementando el esfuerzo horizontal (σ_3) y brindando confinamiento constante (figura 5).

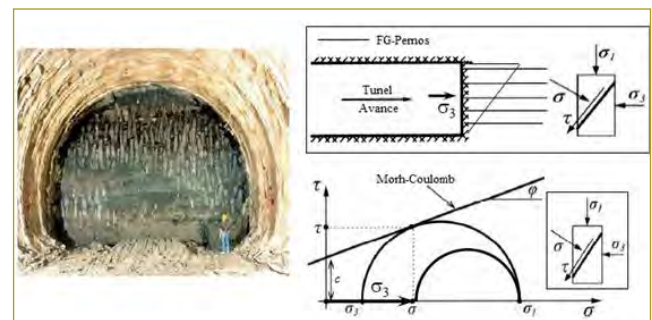


Figura 5. Sistema de prerrefuerzo con pernos en fibra de vidrio.
Fuente: Kavvadas, 2005.

PLANTEAMIENTO DE LA METODOLOGÍA DE DISEÑO DE LOS ELEMENTOS DE PRERREFUERZO

Para el desarrollo de la metodología de diseño se tomó como referencia el método simplificado de análisis de estabilidad de un túnel, propuesto por Enrique Tamez (1997). Tamez, mediante observación y estudio del mecanismo de falla ocurrido durante la construcción de túneles en suelos, planteó la siguiente ecuación general de estabilidad:

$$FSg = \frac{S_{m2}Z_d D(a+L) + 2S_{m2}Z_d L(a+\frac{L}{2}) + S_{m2}Z_d a^2 + (2,7c\sqrt{k_p} + p_j k_p)LD(a+\frac{L}{2})}{\frac{1}{2}\gamma ALD(a+\frac{L}{2}) + \gamma LDH(a+\frac{L}{2}) + \frac{1}{2}(\gamma H - p_o)Da^2 + \frac{1}{2}q_c D(a+L)^2 - \frac{1}{2}p_j DA^2}$$

Diseño de enfilajes

Con base en la ecuación general de estabilidad de Tamez, se plantea la ecuación para el cálculo de la carga que aporta el sistema de enfilajes, de la siguiente manera (figura 6):

$$P \text{ en } f = q_{enf} N(a+L)x$$

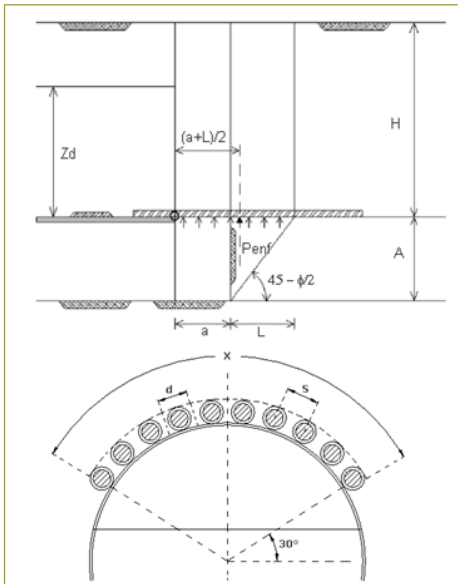


Figura 6. Distribución de carga de los enfilajes.

Fuente: Elaboración propia.

$$FSg = \frac{S_{m2}Z_d D(a+L) + 2S_{m2}Z_d L(a+\frac{L}{2}) + S_{m2}Z_d a^2 + (2,7c\sqrt{k_p} + p_j k_p)LD(a+\frac{L}{2})}{\frac{1}{2}\gamma ALD(a+\frac{L}{2}) + \gamma LDH(a+\frac{L}{2}) + \frac{1}{2}(\gamma H - p_o)Da^2 + \frac{1}{2}q_c D(a+L)^2 - \frac{1}{2}p_j DA^2 - q_{enf} N(a+\frac{L}{2})x}$$

$$q_{enf} N = \frac{2FSg(\frac{1}{2}\gamma ALD(a+\frac{L}{2}) + \gamma LDH(a+\frac{L}{2}) + \frac{1}{2}(\gamma H - p_o)Da^2 + \frac{1}{2}q_c D(a+L)^2 - \frac{1}{2}p_j DA^2)}{FSg(a+L)^2 x}$$

$$q_{enf} N = \frac{2(S_{m2}Z_d D(a+L) + 2S_{m2}Z_d L(a+\frac{L}{2}) + S_{m2}Z_d a^2 + (2,7c\sqrt{k_p} + p_j k_p)LD(a+\frac{L}{2}))}{FSg(a+L)^2 x}$$

Para el diseño estructural de los elementos se adopta la metodología del Ministerio de Fomento (2005) [9], que considera el diseño estructural como una viga con apoyo intermedio entre una viga simplemente apoyada y una viga doblemente empotrada. A partir de ahí, se realiza la verificación a flexión y cortante para el sistema de enfilaje.

Diseño de los pernos en fibra de vidrio

Para determinar la presión de confinamiento p_f se consideran los planteamientos de Tamez (1997), para un túnel profundo o un túnel somero.

Túnel profundo ($H/D > 1,7$ y $Z_d/D = 1,7$)

$$p_f = \frac{\gamma(H + \frac{D}{3})FS - \gamma(H - 1,2D)N_2 - cN_1}{k_p FS}$$

Túnel somero ($H/D < 1,7$ y $Z_d = H$)

$$p_f = \frac{\gamma(H + \frac{D}{3})FS - 0,5\gamma DN_2 - cN_1}{k_p FS}$$

Para el cálculo de la cantidad de elementos requeridos se consideran el área de la sección transversal del túnel, la presión de confinamiento y la resistencia a la tracción del elemento:

$$\# \text{ de pernos} = \frac{p_f A}{\text{Carga unitaria de cada elemento } (T; T_{v-c}; T_{c-t})}$$

Consideraciones

Para el desarrollo de la metodología se adoptaron las siguientes consideraciones, basadas en recomendaciones dadas en la bibliografía consultada y en el criterio propio de los ingenieros de esta investigación:

Parámetros de resistencia en función de la cohesión (c) y ángulo de fricción interna (ϕ). Para los cálculos se adoptaron valores de cohesión de 10, 20, 40, 60 y 80 kPa, y valores de ángulo de fricción de 20, 25, 30, 35 y 40°.

Peso unitario del terreno de 18 kN/m³.

Cobertura del terreno de 50 m.

Longitud de avance de 0,50 m y 1,0 m, considerando un terreno de baja resistencia que limita longitudes de avance mayores.

Diámetros de túnel de 3,0 a 12,0 m.

Y para los enfilajes se adoptaron diámetros de tubería entre 50 y 140 mm, espesor de 3 a 8 mm y separación entre elementos hasta de 60 cm, según lo que sea más frecuente encontrar en obra.

DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA DE DISEÑO

El desarrollo de la metodología consiste en aprovechar un conjunto de ábacos cuya finalidad fue facilitar el diseño de los elementos de sostenimiento antes de la excavación. En total, se desarrollaron 28 ábacos, como se explica a continuación:

1. Se analizó el comportamiento del túnel sin soporte, variando los parámetros de resistencia del suelo, el diámetro del túnel y la longitud de avance, en términos del factor de seguridad general en el frente. A partir de este análisis se desarrollaron los primeros ábacos de diseño FS vs. Diámetro, para longitudes de avance de 0,5 y 1,0 m. A renglón seguido se muestra un ejemplo:

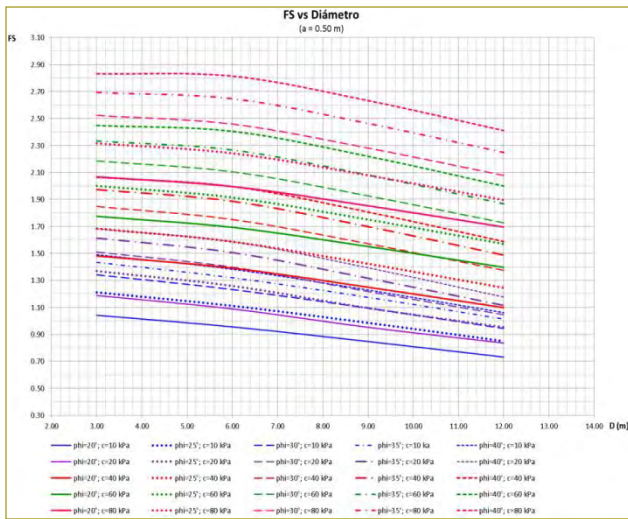


Figura 7. Ábaco de diseño FS vs. Diámetro, para longitud de avance de 0,50 m.

Fuente: Elaboración propia.

2. Se realizó el análisis considerando soporte. Primero con enfilajes. Se adoptaron FS= 2, 3 y 4, para determinar la carga que debe soportar el sistema de enfilajes, variando los parámetros de resistencia del suelo, el diámetro del túnel y la longitud de avance. Mediante este análisis se

obtuvieron los ábacos de diseño Cargas de enfilajes vs Diámetro, para FS=2, 3 y 4, y longitud de avance de 0,5 y 1,0 m. Seguidamente, se muestra un ejemplo.

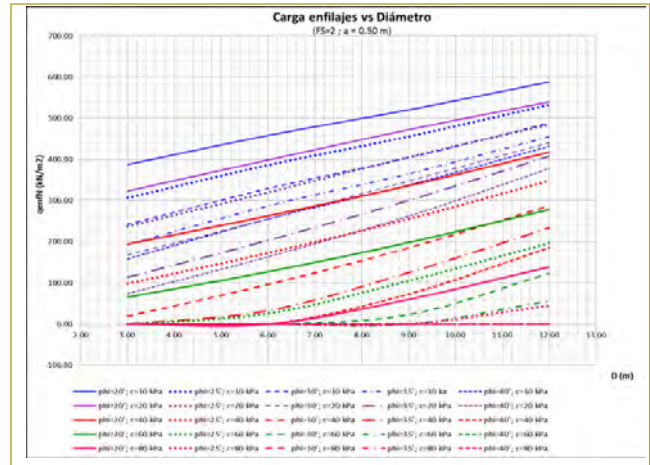


Figura 8. Ábaco de diseño Carga de enfilajes vs. Diámetro, para longitud de avance de 0,50 m y FS=2.

Fuente: Elaboración propia.

3. Se determinó el número de enfilajes que se requieren, considerando en los análisis el chequeo a flexión y cortante de los elementos que conforman los enfilajes. A continuación se muestra el ábaco de diseño desarrollado.

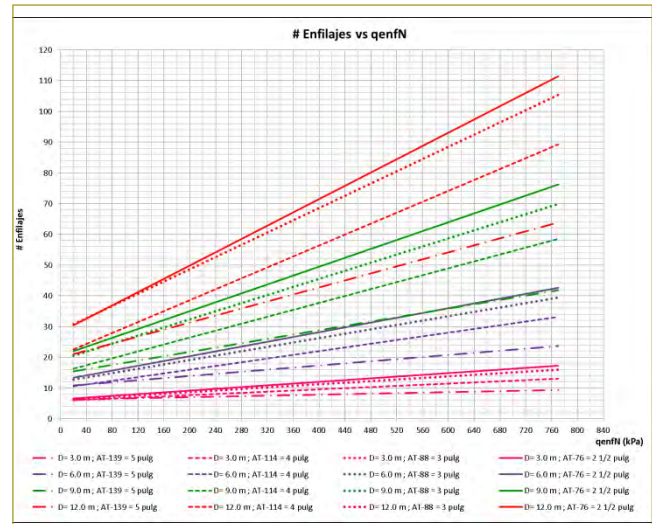


Figura 9. Ábaco de diseño #enfilajes vs. qenfN.

Fuente: Elaboración propia.

4. Se realizó el análisis considerando soporte con un sistema combinado: enfilajes y pernos en fibra de vidrio. Para la simplificación de los cálculos se asumió como valor fijo la carga que aportan los pernos en fibra de vidrio, es decir, se asumieron valores de presión

de confinamiento de $p_f = 50$ kPa, 100 kPa y 150 kPa. A partir de ello se determinó la carga adicional que deben soportar los enfilajes, variando los parámetros de resistencia del suelo, el diámetro del túnel y la longitud de avance. De los análisis se obtuvieron los ábacos de diseño Cargas de enfilajes vs. Diámetro, para longitudes de avance de 0,5 y 1,0 m, FS= 2, 3 y 4, y los valores de p_f . A continuación se muestra un ejemplo:

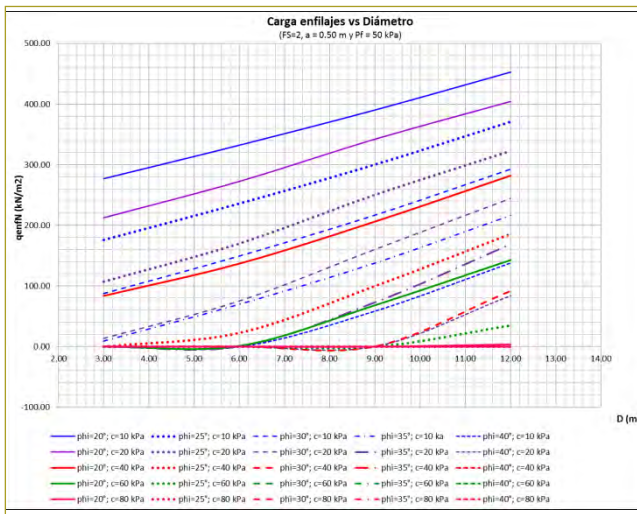


Figura 10. Ábaco Carga de enfilajes vs. Diámetro, para $a = 0,5$ m, $F = 2$ y $p_f = 50$ kPa.

Fuente: Elaboración propia.

5. Se determinó la cantidad de pernos en fibra de vidrio que se requieren para diferentes valores de resistencia, tomada de los catálogos (Sireg, dywidag). Mediante el análisis se obtuvo el ábaco de diseño Cantidad de pernos vs. p_f , como se muestra a continuación:

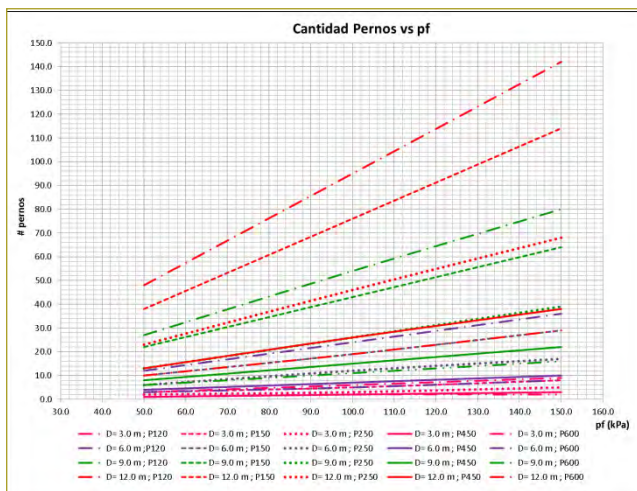


Figura 11. Ábaco Cantidad de pernos vs. p_f .

Fuente: Elaboración propia.

PROCEDIMIENTO PARA EL DISEÑO DE LOS ELEMENTOS Y EJEMPLO DE APLICACIÓN

Con el propósito de entender mejor la metodología del diseño de los elementos de presostenimiento propuesta en este trabajo, se plantea el desarrollo de un ejemplo hipotético de un túnel relativamente superficial, con las siguientes características y parámetros:

Diámetro de excavación de 9,0 m, cohesión $c = 60$ kPa y $\phi = 25^\circ$, longitud de avance de la excavación de 1,0 m y presión suministrada por los pernos en fibra de vidrio de $p_f = 100$ kPa.

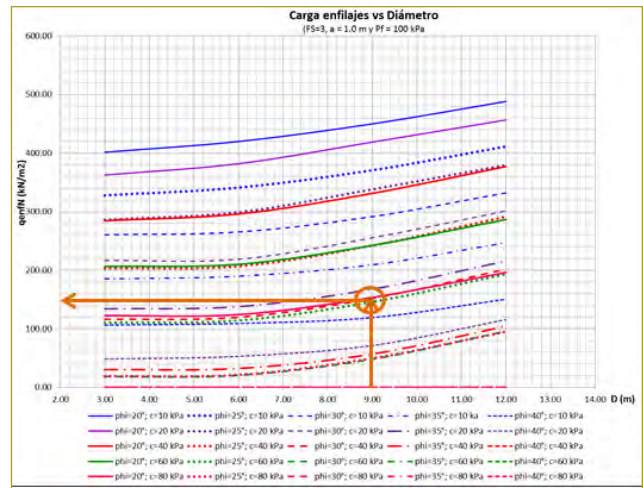
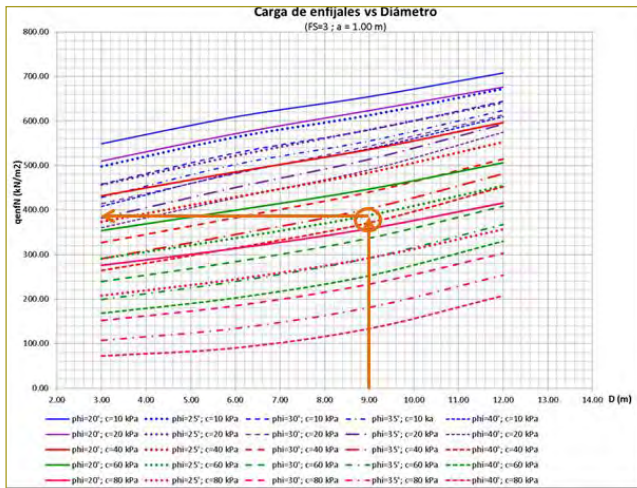
Ejemplo de aplicación mediante el uso de ábacos

1. Para las características y parámetros dados se determina el FSg sin soporte. Para el ejemplo se utiliza el siguiente ábaco de diseño:



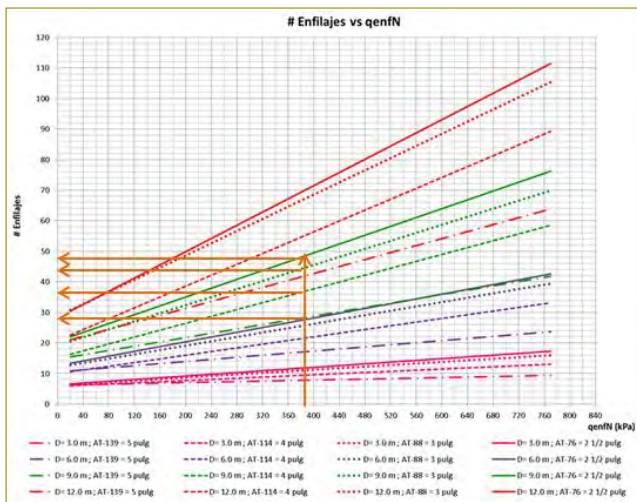
Como se puede leer en la ordenada, el FSg sin soporte es igual a 1,7. Dado que este valor es inferior a 2, que corresponde al mínimo aceptado, indica que se requiere utilizar presoste antes del avance.

2. Se determina la carga de soporte del sistema de enfilajes, para un prerreferzo sólo con enfilajes. Para efectos del ejemplo, se adoptó un FS deseado igual a 3. A continuación se muestra el ábaco de diseño aplicable para las características y parámetros dados en el ejemplo:



Como se puede leer en la ordenada, para obtener un FS= 3 se requiere una carga de soporte de los enfilajes de 393 kPa.

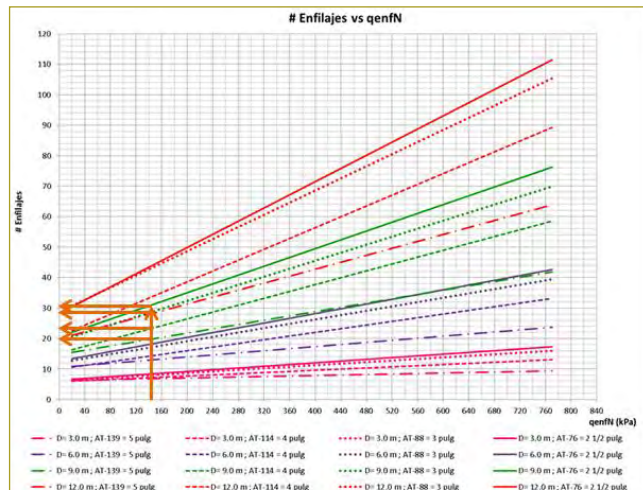
3. Determinación de la cantidad de elementos.



Como se puede leer en la ordenada, para satisfacer un FS= 3 y con una carga de confinamiento de $p_f=100$ kPa, se requiere una carga de soporte adicional por los enfilajes de 147 kPa.

Al comparar la carga de soporte requerida para el sistema de sólo enfilajes, respecto al sistema combinado, se puede observar que la carga requerida por los enfilajes se reduce en un 62 %.

5. Determinación de la cantidad de enfilajes requeridos para el sistema combinado.



Para satisfacer la carga de soporte de 393 kPa, se requieren las siguientes cantidades:

Diámetro de enfilaje y cantidad:

- 5” ; 28 enfilajes
- 4” ; 36 enfilajes
- 3” ; 44 enfilajes
- 2 1/2” ; 48 enfilajes

4. Prerrefuerzo con un sistema combinado: enfilajes y pernos.

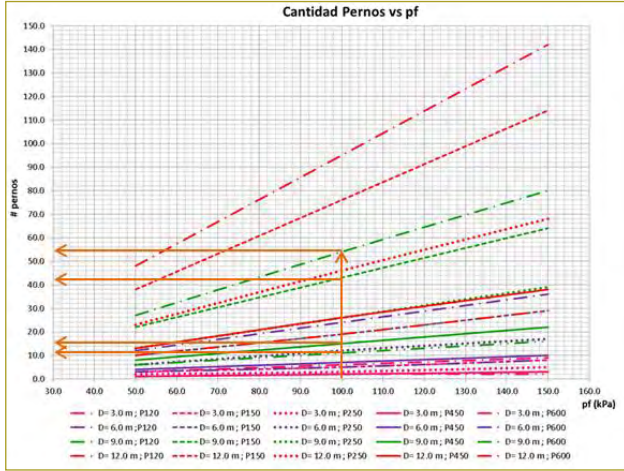
Determinación de la carga de soporte de los enfilajes, para un valor de $p_f = 100$ kPa.

Como puede verse, para satisfacer la carga de soporte de 147 kPa se requieren las siguientes cantidades:

Diámetro enfilaje y cantidad:

- 5” ; 20 enfilajes
- 4” ; 24 enfilajes
- 3” ; 29 enfilajes
- 2 1/2” ; 31 enfilajes

6. Determinación de la cantidad de pernos en fibra de vidrio.
Se determina la cantidad de pernos en fibra de vidrio que se requieren para satisfacer una carga de confinamiento de 100 kPa.



Para los valores de resistencia de los pernos, se requieren las siguientes cantidades:

- Resistencia y cantidad:
 120 kN; 54 pernos
 150 kN; 42 pernos
 450 kN; 16 pernos
 600 kN; 12 pernos

Ejemplo de aplicación mediante el uso de las ecuaciones

Para el mismo ejemplo planteado en el uso de los ábacos, a continuación se presenta el procedimiento mediante el uso de las ecuaciones:

1. Se determina el FSg sin considerar soporte, mediante la ecuación de Tamez.

$$FSg = \frac{S_{m2}Z_d D(a+L) + 2S_{m2}Z_d L(a + \frac{L}{2}) + S_{m2}Z_d a^2 + (2,7c\sqrt{k_p} + p_j k_p)LD(a + \frac{L}{2})}{\frac{1}{2}\gamma ALD(a + \frac{L}{2}) + \gamma LDH(a + \frac{L}{2}) + \frac{1}{2}(\gamma H - p_a)Da^2 + \frac{1}{2}q_z D(a+L)^2 - \frac{1}{2}p_j DA^2} = 1,68$$

Como el FSg < 2, se requiere presoporte.

2. Determinación de la carga del sistema de enfilajes, considerando presoporte sólo con enfilajes.

$$q_{enf} N = \frac{2FSg(\frac{1}{2}\gamma ALD(a + \frac{L}{2}) + \gamma LDH(a + \frac{L}{2}) + \frac{1}{2}(\gamma H - P_a)Da^2 + \frac{1}{2}q_z D(a+L)^2 - \frac{1}{2}p_j DA^2)}{FSg(a+L)^2 x}$$

$$= \frac{2(S_{m2}Z_d D(a+L) + 2S_{m2}Z_d L(a + \frac{L}{2}) + S_{m3}Z_d a^2 + (2,7c\sqrt{k_p} + p_j k_p)LD(a + \frac{L}{2}))}{FSg(a+L)^2 x}$$

$q_{enf} N = 393,3 \text{ kPa}$

3. Determinación de la carga de soporte por enfilaje.
Para el cálculo se asume inicialmente una cantidad de enfilajes y se procede a realizar los chequeos a flexión y cortante. Para el ejercicio con N= 36 y diámetro de 4", la carga por enfilaje es:

$$q_{enf} = \frac{\left(\frac{2(FS_g \Sigma MA - \Sigma MR)}{FS_g (a+L)^2 x} \right)}{N} d = 2,95 \text{ kN / m}$$

4. Chequeo o verificación a flexión y cortante

- Chequeo a flexión:

$$M_{ult} = \frac{q_{enf} L^2}{10} = 11,45 \text{ kN.m}$$

$$M_R = w^p \frac{f_y}{\gamma_s} F_u = 11,52 \text{ kN.m}$$

$$M_{ult} \leq M_R \text{ Ok!}$$

- Chequeo a cortante:

$$V_{ult} = \frac{q_{enf} L}{2} = 9,19 \text{ kN}$$

$$V_R = \frac{2A_s f_y}{\sqrt{3\pi} \gamma_s} = 1415,5 \text{ kN}$$

$$V_{ult} \leq V_R \text{ Ok!}$$

5. Determinación de la carga de soporte del sistema de enfilajes, considerando un sistema de prerrefuerzo combinado: enfilajes y pernos en fibra de vidrio.
Para $pf = 100 \text{ kPa}$, se tiene que la carga adicional que deben aportar los enfilajes es:

$$q_{enf} N = \frac{2FSg(\frac{1}{2}\gamma ALD(a + \frac{L}{2}) + \gamma LDH(a + \frac{L}{2}) + \frac{1}{2}(\gamma H - P_a)Da^2 + \frac{1}{2}q_z D(a+L)^2 - \frac{1}{2}p_j DA^2)}{FSg(a+L)^2 x}$$

$$= \frac{2(S_{m2}Z_d D(a+L) + 2S_{m2}Z_d L(a + \frac{L}{2}) + S_{m3}Z_d a^2 + (2,7c\sqrt{k_p} + p_j k_p)LD(a + \frac{L}{2}))}{FSg(a+L)^2 x}$$

$q_{enf} N = 145,94 \text{ kPa}$

6. Determinación de la carga de soporte por enfilaje, para el sistema combinado.

$$q_{enf} = \frac{\left(\frac{2(FS_g \Sigma MA - \Sigma MR)}{FS_g (a+L)^2 x} \right)}{N} d = 2,77 \text{ kN / m}$$

7. Chequeo o verificación a flexión y cortante, para los enfilajes en el sistema de presoporte combinado:
- Chequeo a flexión:

$$M_{ult} = \frac{q_{enf} L^2}{10} = 10,78 \text{ kN.m}$$

$$M_R = w^p \frac{f_y}{\gamma_s} F_u = 11,52 \text{ kN.m}$$

$$M_{ult} \leq M_R \text{ Ok!}$$

- Chequeo a cortante:

$$V_{ult} = \frac{q_{enf} L}{2} = 8,65 \text{ kN}$$

$$V_R = \frac{2A_s f_y}{\sqrt{3\pi} \gamma_s} = 1415,5 \text{ kN}$$

$$V_{ult} \leq V_R \text{ Ok!}$$

8. Determinación de cantidad de pernos en fibra de vidrio.

Para un valor de $p_f = 100$ kPa y una resistencia a la tensión de 120 kN, se requiere la siguiente cantidad de pernos en fibra de vidrio:

$$\# \text{ de pernos} = \frac{p_f A}{\text{Carga unitaria de cada elemento (T; } T_{v-c}; T_{c-r})} = 54 \text{ Unid}$$

Como se puede observar, ambos procedimientos para el diseño de los elementos son completamente válidos, con valores iguales o muy similares de factores de seguridad, presiones de soporte y cantidad de elementos. No obstante, el uso de los ábacos facilita la estimación de los elementos de sostenimiento, puesto que simplifica mediante el análisis de sensibilidad los cálculos que hay que realizar, como por ejemplo la determinación de la cantidad de elementos que cumplan individualmente los chequeos estructurales a flexión y cortante.

ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS

Como complemento a la metodología planteada mediante el método analítico, se realizó la modelación numérica del ejemplo utilizado en el capítulo anterior.

El objetivo fue evaluar las deformaciones y la zona de falla en la sección de avance de excavación del túnel, al igual que la efectividad del uso de los elementos de prerrefuerzo, con dos condiciones: sin considerar soporte y considerando sistema de prerrefuerzo.

La modelación se realizó mediante el *software* Phase 2D o RS2, utilizando dos tipos de modelos:

- Modelación de la sección transversal del túnel con un análisis de tipo Plain Strain y elementos finitos (FEM): Permite analizar las deformaciones en la clave del túnel.
- Modelación de la sección longitudinal del túnel: Permite, en forma gruesa o aproximada, analizar efectos de daño y deformaciones relativas en el frente de la excavación.

Si bien la modelación de la sección longitudinal es restringida puesto que no es un túnel infinito en el análisis tipo Plain Strain, se requiere experticia en su aplicación e implementación, donde es claro que se obtienen valores de deformación posiblemente más altos de los que se podrían obtener en la práctica. No obstante, este tipo de modelos facilita observar un orden aproximado de los fenómenos que se desarrollan durante la excavación en el frente, por ejemplo, formación de fallas de tipo chimenea o cavernas, así como zona plástica o de daño alrededor de la excavación.

Para la modelación se tomó el mismo ejercicio planteado con el método analítico, considerando las siguientes características y parámetros:

Diámetro de excavación de 9,0 m, cohesión $c = 60$ kPa y $\phi = 25^\circ$, longitud de avance de la excavación de 1,0 m, módulo de deformación = 80 MPa y presión suministrada por los pernos en fibra de vidrio de $p_f = 100$ kPa.

Los enfilajes se consideran como una capa de material mejorado por encima de la clave del túnel, y los pernos en fibra de vidrio se modelan como una carga distribuida aplicada en el frente de la sección longitudinal. La metodología empleada puede consultarse en el paper N.º 3, “Numerical modelling for shallow tunnels in weak rock”, de Hoek (2004) [2].

Resultados de la modelación de la sección transversal del túnel

Para la realización del modelo se consideró como presoporte el sistema de enfilajes, y como soporte, concreto

y arcos metálicos, tal como se describe a continuación (figura 12):

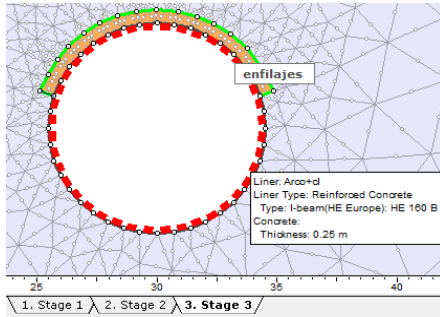
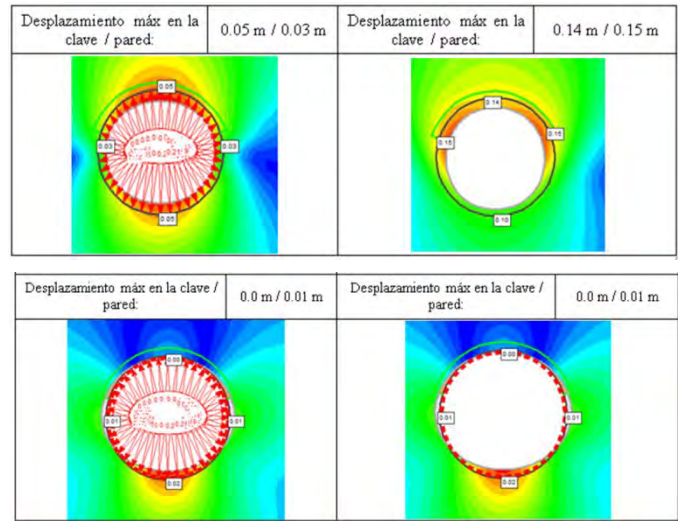


Figura 12. Modelo sección transversal del túnel.

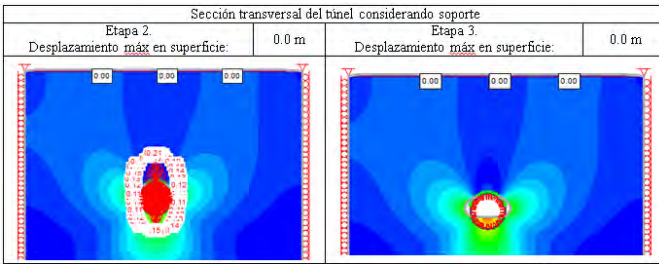
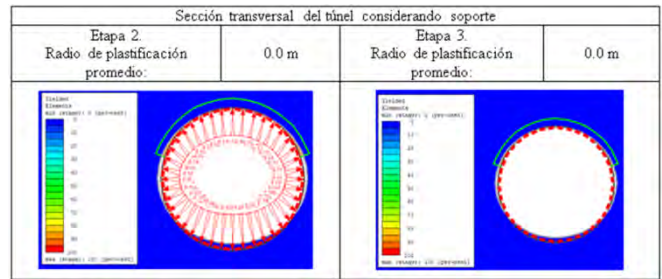
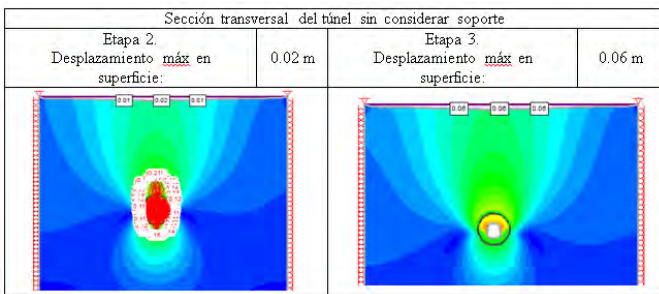
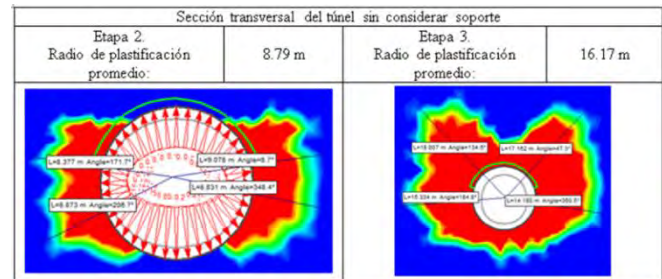
Fuente: Elaboración propia.

- Se estimó un concreto con resistencia a la compresión de $f'c = 30$ MPa, reforzado con fibra metálica de 35 kg/m^3 . Para contabilizar la fibra se hace una equivalencia y se incrementa el espesor del concreto en 5 cm, para un espesor total de 25 cm.
- Arcos metálicos tipo HEB 160, espaciados cada 50 cm.
- Deformaciones en superficie. Sin soporte y con soporte, y considerando una relajación de esfuerzos alrededor de la excavación del 30 % (figura izquierda) y 100 % (figura derecha).

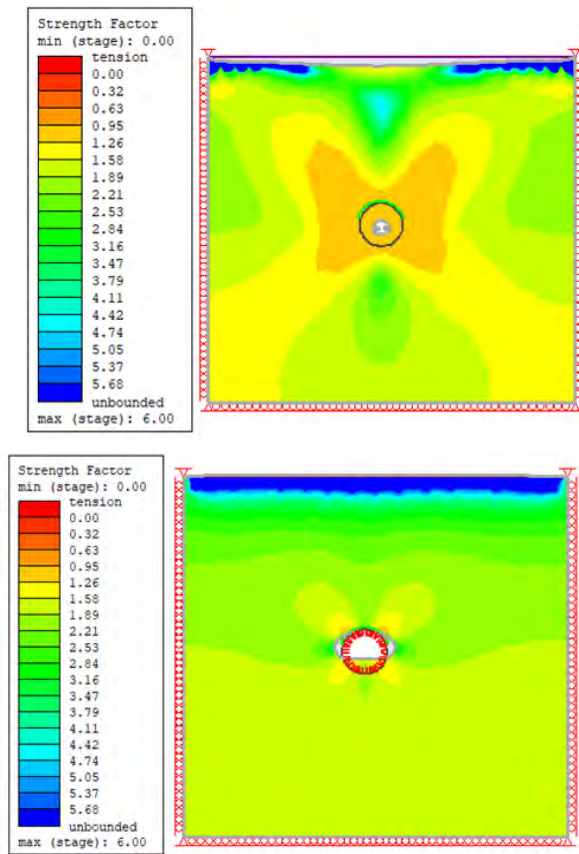
- Deformaciones alrededor de la sección del túnel.



- Zona de falla y plastificación:



- Factor de resistencia



De los resultados anteriores se concluye lo siguiente:

La utilización de un sistema de presoporte con enfilajes mejora considerablemente la estabilidad del frente de excavación. Con el ejemplo planteado se puede establecer que el efecto de los enfilajes reduce las deformaciones a valores despreciables. Cuando no se tiene un sistema de enfilajes, el material circundante a la excavación se desplaza hacia la cavidad del túnel, generando deformaciones que en el caso del ejemplo fueron del orden de 15 cm, lo que es inadmisibles para un túnel excavado en suelo.

De igual manera, se observa que la zona fallada en el caso sin soporte corresponde a un radio de plastificación del orden de 16 m, lo cual indica que el material que puede desprenderse con la excavación del túnel compromete la estabilidad total de éste, mientras que con la instalación de un sistema de presoporte no se presenta daño. La zona fallada se restringe principalmente en la bóveda, en la cual se observa un alivio total de la carga y la tendencia es a fallar hacia las paredes del

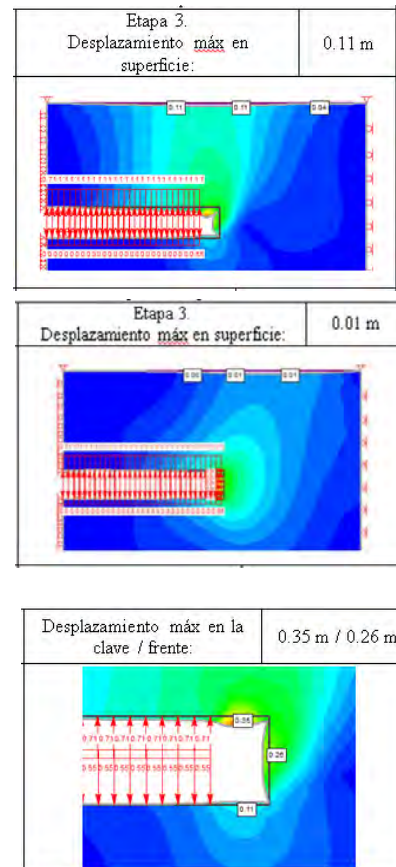
túnel. Sin embargo, para este ejemplo presentan valores de deformación relativamente despreciables.

Por otro lado, el factor de resistencia en la clave para una excavación con enfilajes se incrementa en un 50 % con respecto a la excavación sin soporte.

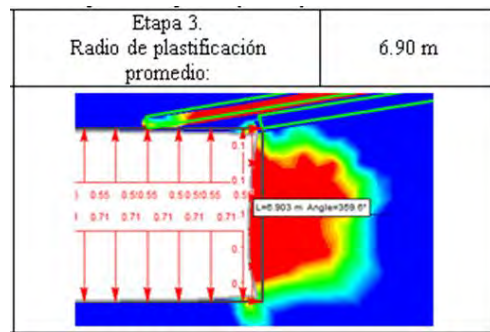
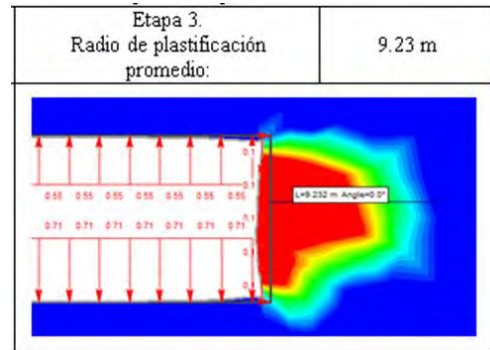
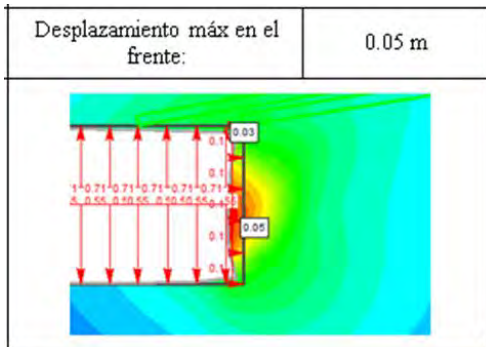
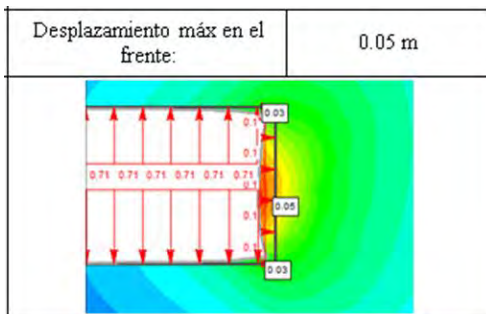
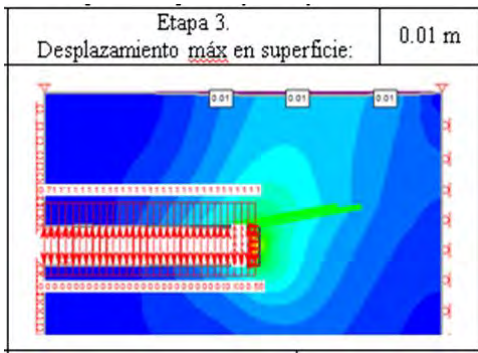
Resultados de la modelación de la sección longitudinal del túnel

Si bien esta metodología no es precisa, pues se separa de un verdadero análisis tipo Plain Strain, ya que el programa supone que el túnel es infinito, si aporta algunas conclusiones que ayudan a observar el efecto benéfico de los sistemas de presoporte. Para la modelación de la sección longitudinal se consideró inicialmente la excavación de la zona de avance sin soporte, y luego con un soporte mediante pernos en fibra de vidrio aplicados en la cara libre del frente de excavación. También se realizó un análisis con soporte con enfilajes y pernos al mismo tiempo.

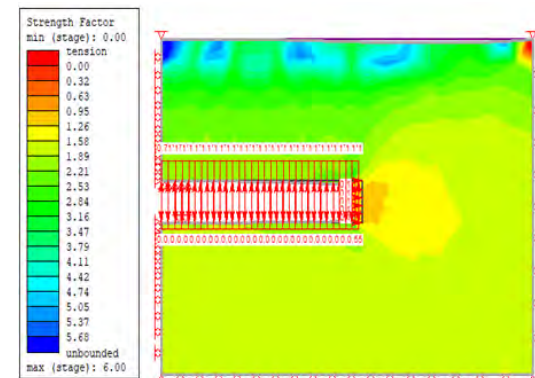
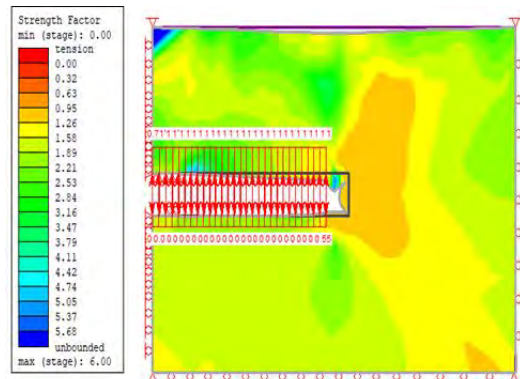
- Deformaciones o desplazamientos en superficie:



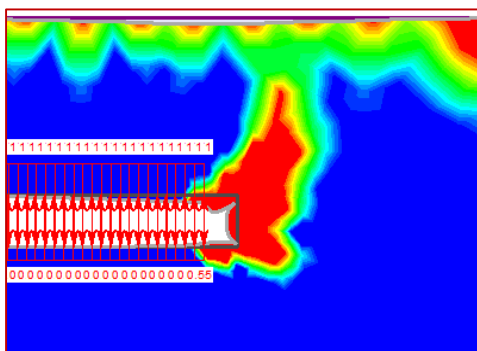
- Desplazamientos alrededor de la zona de avance

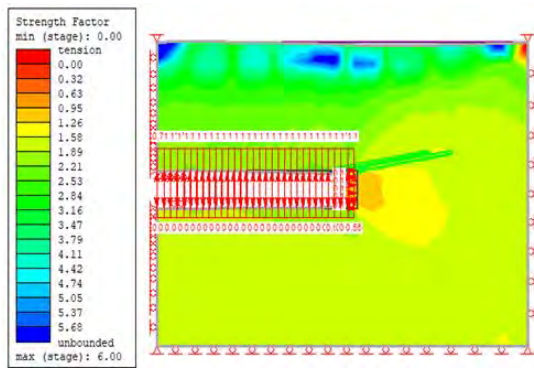


- Factor de resistencia



- Zona de falla y plastificación





De los resultados anteriores se concluye lo siguiente:

La utilización de un sistema de presoporte con enfilajes y pernos en fibra de vidrio mejora considerablemente la estabilidad del frente de la excavación, reduciendo las deformaciones en la clave y en el frente a valores despreciables o admisibles. Con el ejemplo realizado se observa que en el caso donde no se considera un sistema de presoporte, la zona de falla o de plastificación alcanza la superficie, formando una falla de tipo chimenea. Cuanto mayor es la longitud de avance sin soporte, mayor será el daño en el frente de excavación por extrusión. Por otro lado, se observa que al utilizar el sistema de presoporte combinado, la zona de falla se restringe principalmente en la clave del túnel donde se presenta un alivio de cargas, y los efectos de los elementos de presoporte en el frente de excavación limitan la expansión de la plastificación por encima de la cara del túnel. También se observó que el efecto chimenea desaparece, generando una zona de falla o plastificación local concentrada únicamente por delante del frente de excavación que luego se excava con el avance.

En cuanto a los desplazamientos, se observó que para la excavación sin soporte la perturbación del medio genera desplazamientos (asentamientos) en superficie que pueden llegar a ser importantes. En el caso modelado fueron del orden de 11 cm y en la clave y frente de 35 y 26 cm, respectivamente, cuyos desplazamientos se consideran inadmisibles para un túnel en suelo o roca blanda. Para el caso de la excavación utilizando el sistema de presoporte con pernos y enfilajes, se observa que los desplazamientos se reducen en un 80 y 90 % con respecto a los valores estimados con el modelo sin soporte.

CONCLUSIONES

Generales

- La excavación de túneles es un arte que requiere conocimiento, práctica y buen juicio ingenieril. Los materiales de suelo o roca muy descompuesta, con poca cohesión, o deleznable, presentan tendencia a generar grandes desplazamientos del frente de excavación y, consecuentemente, la posibilidad de falla de tipo chimenea o la formación de cavernas delante del frente, poniendo en peligro el avance de los túneles.
- Existen mecanismos previos al avance de excavación que ayudan a la estabilidad del terreno, como el caso del uso de enfilajes, pernos en fibra de vidrio e inyecciones.
- Los sistemas de prerrefuerzo son útiles en suelos de baja resistencia o roca muy descompuesta.

De las metodologías consultadas se puede concluir lo siguiente:

- Los métodos empíricos y analíticos existentes no permiten completar el diseño de los elementos de presoporte. Adicionalmente, éstos no consideran el diseño de un sistema de presostenimiento combinado.

Metodología planteada

- Con el ejercicio de aplicación de la metodología mediante el uso de ábacos y el uso de ecuaciones, se pudo establecer que ambos procedimientos para el diseño de los elementos son completamente válidos, con valores iguales o muy similares de factores de seguridad, presiones de soporte y cantidad de elementos. No obstante, la utilización de los ábacos de diseño facilita la estimación de los elementos de sostenimiento, puesto que simplifica los cálculos que hay que hacer mediante el análisis de sensibilidad, como por ejemplo la determinación de la cantidad de elementos necesarios para cumplir individualmente los chequeos estructurales a flexión y cortante.
- El uso de un sistema de presostenimiento en el frente de excavación incrementa el factor de seguridad del frente, garantizando la estabilidad temporal de la zona de avance. Así mismo, el uso de un sistema de prerrefuerzo combinado es más eficiente que un

sistema con sólo enfilajes, ya que permite optimizar la cantidad de enfilajes requeridos.

Modelación mediante elementos finitos

Modelación de la sección transversal

- Se observa que se mejora considerablemente la estabilidad del frente, reduciendo las deformaciones a valores admisibles y restringiendo la zona de falla, sobre todo en la bóveda.

Modelación de la sección longitudinal

- Se observa que al utilizar sistema de presoporte se restringe la zona de falla y se limita la expansión de la plastificación por encima de la cara del túnel, desapareciendo el efecto chimenea.
- Se genera una zona de falla o plastificación local, concentrada únicamente por delante del frente de excavación que luego se excava en la siguiente fase.

De los tipos de elementos utilizados para el presostenimiento, se puede concluir lo siguiente:

Enfilajes

- Soportan mediante flexión parte de la sobrecarga que reposa sobre la clave del túnel.
- Limitan la expansión de la plastificación por encima de la cara.
- Contribuyen a la protección del túnel contra la evolución de la falla tipo chimenea, común en suelos no cohesivos o rocas muy fracturadas.

Pernos en fibra de vidrio

- Proporcionan en el frente de avance un refuerzo constante de compresión o de confinamiento que reduce la extrusión en la cara del túnel.

Sistema combinado

- Limitan las deformaciones y las zonas de daño, y permiten optimizar en el diseño de los elementos, especialmente en los enfilajes.

RECOMENDACIONES Y LIMITACIONES

- Existen algunos métodos de tipo semiempírico no presentados en esta investigación, que sólo pueden utilizarse a niveles de prefactibilidad de los proyec-

tos. En etapas de diseño de mayor detalle se deben realizar análisis complementarios con métodos más sofisticados, por ejemplo analíticos o numéricos, como lo que se ha planteado en esta investigación. En un diseño de ingeniería de detalle se deben hacer comprobaciones con métodos numéricos en 2D o 3D para revisar; desplazamientos o asentamientos, factores de seguridad del túnel, como de los elementos de sostenimiento, diagramas de capacidad estructural del sostenimiento, entre otros, y la integración de éstos con el revestimiento en concreto final para garantizar la estabilidad a largo plazo.

- La metodología propuesta no consideró el diseño del revestimiento para garantizar la estabilidad a largo plazo o permanente del túnel, puesto que el presoporte y el soporte dentro de la sección se encargan de estabilizar la obra. Se presume luego que vendrá un revestimiento en concreto para atender requerimientos propios de la operación de dichas obras y de esa manera se garantiza la estabilidad a largo plazo.

REFERENCIAS

- [1] Dywidag-Systems International (s.f.). dywidag-systems.com. Obtenido de <https://www.dywidag-systems.com/es.html>.
- [2] Hoek, E. (2004). *Numerical modelling for shallow tunnels in weak rock*.
- [3] Jiménez López, A. N. (2016). *Sistemas de presostenimiento para túneles en terrenos difíciles*. México.
- [4] Kavvas, M. (2005). *Numerical analysis in the design of urban tunnels*. Torino.
- [5] Karakus, M., & Fowell, R. (2004). An insight into the New Austrian Tunnelling Method (NATM). Sivas, Turkiye.
- [6] Gutiérrez, R. (Ingetec) (2015, noviembre). Ingeniería de rocas: túneles - elementos de sostenimiento. Presentado en Cursos de maestría.
- [7] López Jimeno, C. (1997). *Manual de túneles y obras subterráneas*. Madrid: Entorno Gráfico, s.l.
- [8] Lunardi, P. (2008). *Design and construction of tunnels - Analysis of controlled deformation in rocks and soils (Adeco-RS)*. Italia: Springer.
- [9] Ministerio de Fomento (2005). Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera. España.
- [10] Secretaría de Comunicaciones y Transporte (2016). Manual de diseño y construcción de túneles en carretera. México.
- [11] Sireg (s.f.). sireg.it. Obtenido de <http://www.sireg.it/es>.
- [12] Tamez González, E., Rangel Núñez, J., & Holguín, E. (1997). *Diseño geotécnico de túneles*. México: TGC Geotecnia.

Evaluación de pérdidas de agua en la ducha por el uso de agua caliente

Water loss assessment in showers as a result of hot water use

GIOVANNY ANDRÉS LIZCANO CASTRO¹ - WILLIAM NIVALDO USCÁTEGUI CIENDUA² - JAIRO ALBERTO ROMERO ROJAS³

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

2. Magister en Ingeniería Civil con énfasis en Recursos Hidráulicos y Medioambiente de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

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

giovanny.lizcano-c@mail.escuelaing.edu.co - william.uscategui@mail.escuelaing.edu.co - jairo.romero@escuelaing.edu.co

Recibido: 17/01/2019 Aceptado: 05/02/2019

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

Resumen

En este artículo se presentan los resultados de la evaluación de pérdidas de agua en la ducha por el uso de agua caliente en la ciudad de Bogotá.

Palabras claves: pérdida de agua, agua caliente, ducha.

Abstract

This article shows the results of a water loss assessment as a consequence of using hot water in the city of Bogotá.

Keywords: water loss, hot water, shower.

INTRODUCCIÓN

El aseo personal es un hábito indispensable en la vida de las personas, específicamente tomar una ducha. El clima frío de la ciudad de Bogotá hace que la población prefiera agua caliente para su baño diario.

En cada vivienda se instalan diversos tipos de calentadores comerciales que permiten suministrar agua caliente a los diferentes puntos de consumo: ducha, lavandería, lavamanos y lavaplatos. Dadas las configuraciones de los puntos hidrosanitarios en las viviendas, los calentadores siempre se encuentran a una distancia considerable, razón por la cual el agua caliente no llega instantáneamente cuando se abre la llave y se requiere un tiempo para obtener agua con la temperatura deseada por el usuario.

Durante dicho tiempo, el usuario deja perder el agua, lo que representa un costo adicional y un consumo innecesario. Minimizar estas pérdidas disminuye el costo para cada habitante y aumenta el uso posible de los recursos hídricos disponibles para la ciudad.

ANTECEDENTES

En un estudio hecho en Ciudad de México se estableció que la ducha es el dispositivo donde más se desperdicia agua en los hogares, un gasto de 7 litros por minuto, y un tiempo promedio para que el agua tome la temperatura adecuada de aproximadamente 1,8 minutos, para un desperdicio de agua mayor de 12 litros por ducha⁽²⁾.

En España se determinó que una persona alcanza a desperdiciar 8000 litros de agua por año, mientras espera que el agua se caliente para tomar una ducha⁽³⁾.

METODOLOGÍA

La metodología planteada para el estudio⁽¹⁾ se presenta en la figura siguiente (figura 1).

RESULTADOS

Aforos

Se hicieron muestreos de 100 viviendas, 20 por cada estrato, con excepción del estrato 1, debido a que las viviendas localizadas en este estrato no cuentan con infraestructura hidráulica para suministro de agua caliente.

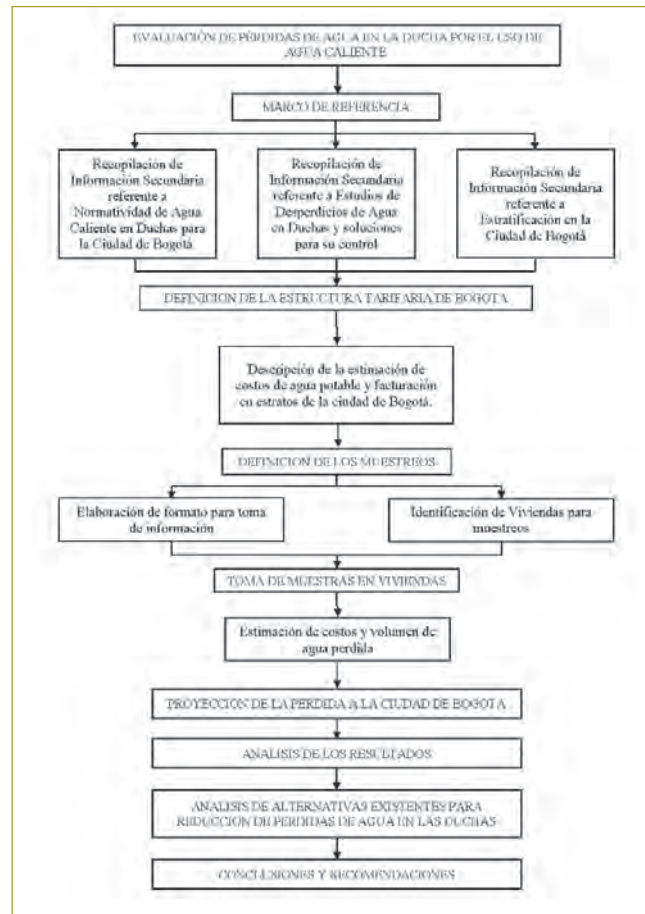


Figura 1. Metodología.

Cuando las condiciones de la vivienda lo permitieron se hicieron los aforos en tres escenarios diferentes. El primer escenario correspondía a realizar la prueba teniendo en cuenta sólo una ducha, para lo cual se hacía inicialmente una medición aproximada de la distancia a la cual se encuentra el calentador de la ducha, y después se abría la llave para tomar los tiempos y volúmenes de agua. Un segundo escenario corresponde a las viviendas con una segunda ducha, para lo cual se efectuaba el mismo procedimiento del escenario 1. Un tercer escenario, que al igual que el escenario 2 se podía desarrollar siempre y cuando la vivienda tuviera una segunda ducha, donde se llevaba a cabo la prueba y se tomaban los tiempos y volúmenes de agua que tardaba el agua en calentarse, operando las dos duchas simultáneamente.

Los tiempos y volúmenes promedio perdido por habitante por ducha en cada estrato se muestran a continuación (figura 2).

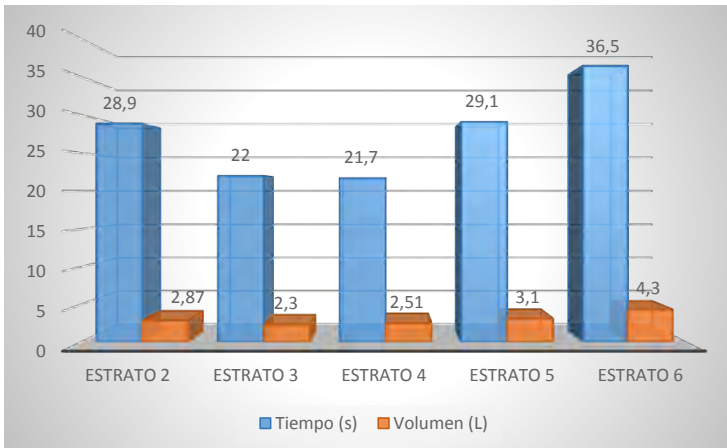


Figura 2. Tiempo y volumen promedio de pérdida por estrato.

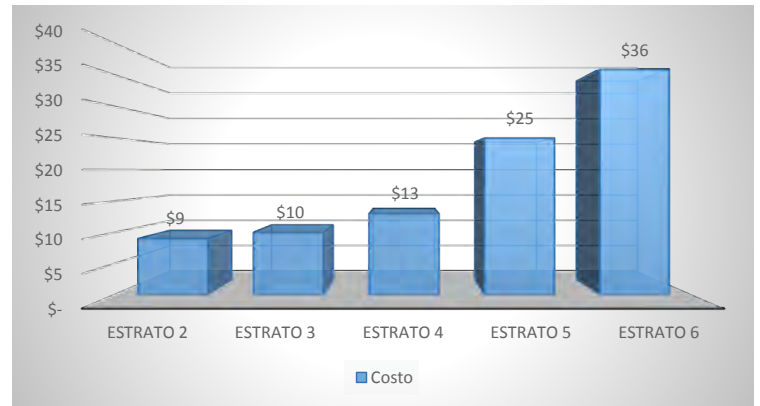


Figura 3. Costo promedio perdido por habitante por ducha y por estrato.

El costo promedio por habitante de la pérdida por ducha se presenta seguidamente (figura 3).

La proyección de pérdida de agua para la población total de Bogotá suscrita al servicio de acueducto se muestra en la tabla siguiente (tabla 1).

La proyección de pérdida en dinero por el agua de ducha en Bogotá se incluye más adelante (tabla 2).

Tabla 1
Volúmenes de agua perdidos por día, mes y año por estrato

Suscriptores Acueducto y Alcantarillado	Número de habitantes	Vol. (L) prom. perdido por hab. por ducha	Vol. (L) prom. total perdido por ducha por día	Vol. (m³) prom. total perdido por ducha por día	Vol (m3) prom. total perdido por ducha por Mes	Vol. (m3) prom. total perdido por ducha por Año
Estrato 1	485.060	-	-	-	-	-
Estrato 2	2.351.052	2,87	6.747.519,2	6.747,5	202.425,6	2.429.106,9
Estrato 3	2.559.244	2,3	5.886.261,2	5.886,3	176.587,8	2.119.054,0
Estrato 4	1.169.844	2,51	2.936.308,4	2.936,3	88.089,3	1.057.071,0
Estrato 5	387.140	3,1	1.200.134,0	1.200,1	36.004,0	432.048,2
Estrato 6	307.120	4,3	1.320.616,0	1.320,6	39.618,5	475.421,8
Total			18.090.838,9	18.090,8	542.725,2	6.512.702,0

Tabla 2
Costo promedio de pérdida por día, por mes y por año por estrato

Estrato	Costo Acueducto (\$/m³)	Costo Alcantarillado (\$/m³)	Costo pérdida por ducha por día	Costo pérdida por ducha por mes	Costo pérdida por ducha por año
1	-	-	-	-	-
2	\$1.516	\$1.585	\$20.923.922	\$627.717.666	\$7.532.611.997
3	\$2.148	\$2.245	\$25.858.699	\$775.760.959	\$9.309.131.506
4	\$2.527	\$2.642	\$15.175.723	\$455.271.687	\$5.463.260.248
5	\$3.916	\$3.989	\$9.487.299	\$284.618.979	\$3.415.427.747
6	\$4.169	\$4.253	\$11.122.254	\$333.667.631	\$4.004.011.571
TOTAL			\$82.567.897	\$2.477.036.922	\$29.724.443.068

OPCIONES PARA LA REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS DE AGUA EN LA DUCHA

- **Opción 1.** Recolección de agua no utilizada en recipiente tipo platón/balde. El usuario recoge en un platón el agua hasta cuando llegue caliente a la ducha y la utiliza en sanitarios o limpieza.



Figura 4. Campañas realizadas por el gobierno de Colombia.

- **Opción 2.** Sistemas hidráulicos con reúso del agua. Alternativa preferencial para proyectos de vivienda nueva desde la etapa de diseño con sistemas de reúso. El agua fría se almacena en un tanque para utilizarla posteriormente en inodoros o en limpieza.



Figura 5. Sistemas hidráulicos con reúso del agua.

- **Opción 3.** Uso mixto de aparatos eléctricos y de gas. Esta alternativa está compuesta por tres dispositivos: un calentador de gas de paso (1), un sensor de temperatura (2), una ducha eléctrica (3) (figura 6).

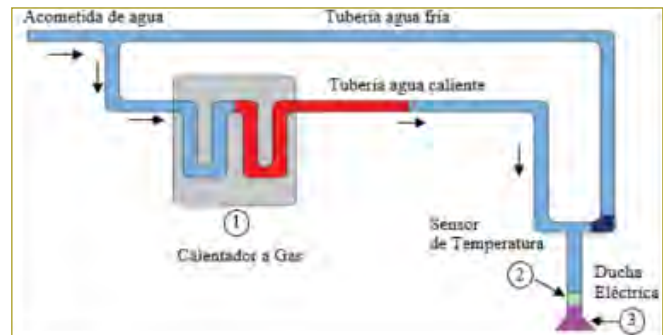


Figura 6. Sistema de uso mixto de energía.

Este sistema optimiza el uso de energía eléctrica y el gas, con cero pérdidas de agua, sin requerir modificaciones de la infraestructura de la vivienda.

El funcionamiento de esta opción consiste en:

- Paso 1. Apertura de la llave de agua caliente
Una vez que el usuario abre la llave de agua caliente, los tres dispositivos deben activarse automáticamente, de tal manera que el volumen inicial de agua fría que se encuentra en la tubería de agua caliente se calienta instantáneamente con la ducha eléctrica, garantizando así que el usuario apenas entre a la ducha tenga agua caliente. Mientras sucede lo anterior el calentador de gas inicia su operación y el sensor empieza a medir la temperatura del agua que llega justo antes de la ducha eléctrica.

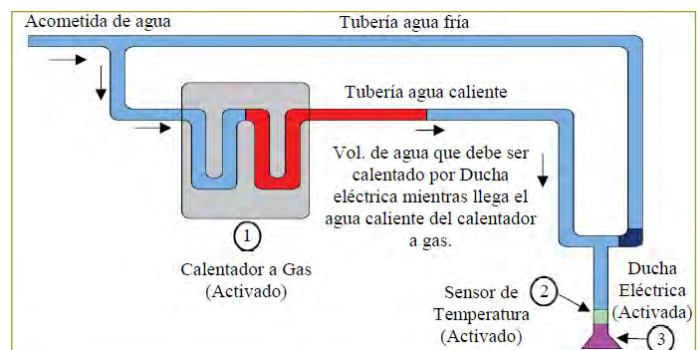


Figura 7. Esquema opción 3. Paso 1.

- Paso 2. Apagado automático de dispositivos
Una vez que el sensor determina que la temperatura del agua que llega antes de la ducha eléctrica, proveniente del calentador a gas, es la requerida por el usuario, emite una señal a la ducha eléctrica y la

apaga automáticamente, de tal modo que a partir de ese momento sólo operaría el calentador de gas para calentar el agua.

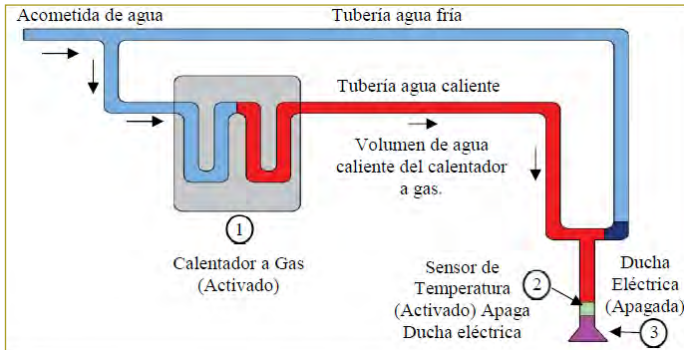


Figura 8. Esquema opción 3. Paso 2.

CONCLUSIONES

- Los habitantes de Bogotá pierden en el uso de la ducha alrededor de 542.725 m³ mensuales, equivalentes a 6,5 millones de m³/año.
- El costo económico por pérdidas de agua en la ducha es de \$2.477 millones por mes o \$ 29,7 mil millones anuales, para el año 2018.
- El volumen total de agua perdida es equivalente al 2,4 % del valor facturado por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá.
- El volumen promedio de pérdida de agua en la ducha con agua caliente por habitante por ducha es de 2,87 litros en el estrato 2; 2,3 litros en el estrato 3; 2,51

litros en el estrato 4; 3,1 litros en el estrato 5, y 4,3 litros en el estrato 6.

- El volumen promedio de agua perdida por habitante en la ciudad de Bogotá para el estrato 1 es nulo, debido a la falta de la infraestructura hidráulica necesaria para distribución y calentar agua mediante un dispositivo comercial.
- Los tiempos promedio de espera en la ducha para calentar el agua son 28,6 segundos en el estrato 2; 22 segundos en el estrato 3; 21,7 segundos en el estrato 4; 29,1 segundos en el estrato 5, y 36,5 segundos en el estrato 6.
- Los costos promedio de la pérdida por habitante por ducha son \$9 para el estrato 2; \$10 para el estrato 3; \$13 para el estrato 4; \$25 para el estrato 5 y \$36 para el estrato 6.

REFERENCIAS

1. Lizcano, G., & Uscátegui, W. (2018, diciembre). Evaluación de pérdidas de agua en la ducha por el uso de agua caliente y de posibles alternativas de control. Trabajo de grado para la maestría en Ingeniería Civil. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
2. Hidroloop (27 de enero de 2015). Twenergy. Una iniciativa de Endesa por la eficiencia y la sostenibilidad. Obtenido de <https://twenergy.com/mx/a/como-podemos-evitar-el-desperdicio-del-agua-al-comenzar-el-bano-1586>.
3. Arregui, F., & Soriano, J. (2014). Informe técnico del dispositivo Aquareturn. Valencia. Ciama (1992). Conferencia Internacional sobre el Agua y el Medio Ambiente. Dublín. Comisión Nacional del Agua (2017). Estadísticas del agua en México. México.

Análisis crítico de la metodología implementada por el Ideam y las empleadas en el ámbito internacional para definir el índice de escasez del agua superficial

Critical analysis of the methodology implemented by IDEAM and those used internationally to estimate the surface water scarcity index

JORGE ANDRÉS VEGA ORTIZ¹ - HÉCTOR MATAMOROS RODRÍGUEZ²

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

2. Profesor de la Maestría en Ingeniería Civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

jorge.vega@mail.escuelaing.edu.co - hector.matamoros@escuelaing.edu.co

Recibido: 20/01/2019 Aceptado: 06/02/2019

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

Resumen

En el presente artículo se habla sobre la metodología para calcular el índice de escasez, para lo cual se abordarán los siguientes aspectos: la descripción de algunas metodologías de cálculo usadas a escala internacional, exactamente en Estados Unidos, Israel, Países Bajos y Canadá; críticas de autores nacionales sobre la metodología, ventajas y desventajas del indicador de escasez, y finalmente, los ajustes propuestos para el cálculo del indicador.

Adicionalmente, se elabora una guía práctica para su cálculo teniendo en cuenta los resultados de los análisis efectuados, se sugieren actualizaciones a la vigente metodología con nuevos rangos para medir el indicador de escasez, y por último se presentan conclusiones y recomendaciones. Finalmente, se aplica todo lo anterior en un estudio de caso.

Este trabajo se presenta como una herramienta de fácil uso para estimar el indicador de escasez, muy útil en la toma de decisiones referentes al manejo adecuado del recurso hídrico del país.

Palabras claves: agua, hidrología, recursos hídricos, escasez.

Abstract

This document discusses the methodology for calculating the scarcity index, focusing on the following topics: description of calculation methodologies used at international levels, especially in countries such as the USA, Israel, The Netherlands, and Canada; some criticisms by national authors about the methodology; advantages and disadvantages of the scarcity index; and finally, the proposed readjustments for calculating the index.

Additionally, a practical guide for the calculation will be designed, taking into consideration the results obtained by the performed analyses. Some improvements are suggested for the current methodology, with new ranges to measure the scarcity index. The conclusions and recommendations will be presented and, finally, all the procedures will be applied in a representative case.

This document is presented as a tool to facilitate the estimation of the scarcity index, useful in decision-making for correct use of water resources in the country.

Keywords: water, hydrology, water resource, scarcity.

INTRODUCCIÓN

En este artículo se presenta un resumen del estudio realizado por los autores sobre las metodologías utilizadas para el cálculo del indicador de escasez de agua superficial, en dicho estudio se incluyen algunas experiencias del cálculo desarrolladas a escala nacional e internacional, su definición, relación de los métodos de cálculo existentes para su obtención, ventajas y desventajas que estos métodos presentan, así como los procedimientos que se deben tener en cuenta al momento de hacer los cálculos del indicador. Finalmente, se procede a elaborar una guía práctica de cálculo del indicador.

Como producto del trabajo realizado se elaboró un extenso documento en el que se presenta el marco conceptual que sirve como guía de consulta para la correcta comprensión de la información, en especial en el capítulo 1, en el cual se relacionan los términos que se implementan a lo largo del documento.

En el capítulo 2 se expone el marco teórico, al mismo tiempo que se relacionan algunas metodologías investigadas a escala nacional e internacional para calcular el indicador de escasez, destacando bondades y falencias que se puedan presentar al momento de usarlas. Se describe la metodología recomendada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam) para calcular el indicador, y se presentan a modo de resumen las virtudes y críticas hechas por autores al momento de implementar la metodología.

Este análisis sirve como soporte para designar el camino y sentar las bases sobre el uso de la metodología en el país, al igual que para permitir su aplicación en procesos de planificación de la demanda y de la oferta de las cuencas hidrográficas.

Por otra parte, en el capítulo 3 se formula una matriz DOFA que servirá como herramienta para la toma de decisiones, recomendando cual de las metodologías estudiadas se pueden utilizar para complementar la metodología propuesta por el Ideam, o por el contrario, definir si ésta no presenta falencias en su formulación.

En el capítulo 4 se aplica la metodología obtenida en un caso de estudio (cuenca del río Curo) y se discuten los cálculos encontrados.

Finalmente, en el capítulo 5 se presentan los resultados obtenidos al aplicar los resultados de la DOFA con lo arrojado en el estudio de caso: se generan conclusiones y recomendaciones.

RESULTADOS

En términos generales, la clasificación de la escasez se enfoca en los siguientes índices:

- Requerimientos de agua de seres humanos.
- Vulnerabilidad de recursos hídricos.
- Requerimientos ambientales de agua.

Para cada uno de éstos se analizan los métodos propuestos para el cálculo del indicador de escasez en los ámbitos nacional e internacional, y se saca una conclusión sobre su uso y las ventajas y desventajas que proporciona su metodología.

Dentro de la investigación se encontró que no hay un solo índice que sirva para calcular el indicador de escasez, ya que cada metodología se aplica de acuerdo con las características de su país. Por esto se encuentra variedad en la aplicación de las metodologías estudiadas. Por tal motivo, lo que se buscará con el presente trabajo es consolidar estas experiencias, buscar cuáles se pueden aplicar en el país y encontrar la manera de actualizar la metodología ya existente para calcular el índice de escasez.

Se elabora una matriz DOFA, de la cual se concluye que las metodologías que más se ajustan y que se podrían aplicar para un estudio de caso en Colombia son la metodología de índice relativo local de uso y reúso de agua y el índice de estrés hídrico. Además, la metodología índice de sostenibilidad de la cuenca también es aplicable en el país, pero requiere un volumen superior de información para alimentar el modelo.

Por lo anterior, estas tres metodologías se calificaron como las más estructuradas y que en su desarrollo involucran mayor número de variables, lo cual permite que el nivel de detalle de los datos usados mejore y, por consiguiente, su resultado.

Igualmente, estas tres metodologías se analizarán para la elaboración de la guía metodológica. Cabe aclarar que para la construcción de la guía se usará además lo analizado en el Estudio Nacional del Agua 2014.

Finalmente, consolidada la guía práctica, se usarán estas tres metodologías y se aplicará el estudio de caso (cuenca del río Curo). Estos resultados se compararán con la metodología que implemento la Resolución 865 de 2004, sugerida por el Ideam para calcular el índice de escasez. Lo anterior permitirá establecer diferencias

encontradas y concluir si la metodología vigente puede ser objeto de actualizaciones.

Lo anterior permitirá, entre otras cosas:

- Constituir una herramienta aplicable a las distintas cuencas del país para valorar el impacto de las medidas, planes o estrategias implementadas con el objeto de alcanzar seguridad hídrica.
- Constituir una herramienta que permita comparar el estado de la seguridad hídrica de diferentes cuencas en un momento determinado.
- Proponer alimentar la matriz con información o datos de carácter público actualmente disponibles.
- Ser de fácil comprensión, actualizables en el tiempo, fácil aplicación y confiables.

Producto de este análisis se relacionan los procedimientos que hay que tomar en cuenta para la estimación del indicador, lo que forma parte de la guía metodológica propuesta.

Todo proceso de cálculo debe tener como mínimo una primera etapa de recopilación y análisis de información, una segunda etapa enfocada en conocer la zona de estudio donde se va a desarrollar el trabajo,

delimitar claramente los puntos de interés, y el método o los métodos de cálculo seleccionados, para finalmente analizar los resultados y llegar a una conclusión sobre el nivel de presión de los recursos hídricos (tercera etapa).

En la tabla siguiente se presenta una descripción particular de las etapas mencionadas, enfocándola en la aplicación práctica y los objetivos planteados en el presente trabajo, por lo cual se incluyen además la etapa de síntesis metodológica y las recomendaciones sobre la selección del método de cálculo (tabla 1).

Posteriormente, se aplica la metodología propuesta para el cálculo de oferta y demanda, a la cuenca del río Curo. Los resultados obtenidos se comparan para las tres metodologías seleccionadas para calcular el indicador de escasez. Posteriormente, se comparan los resultados obtenidos al aplicar tres de las metodologías obtenidas en la recopilación (Índice relativo local de uso y reuso de agua WTA, índice de estrés hídrico WSI y el Índice de escasez del Ideam) y la propuesta en este estudio para calcular la oferta y la demanda de agua y a través de ellas el indicador de escasez hídrica en la cuenca del río Curo, obteniendo los siguientes resultados (tabla 2).

Tabla 1
Etapas y descripción de las actividades. Metodología

Etapas	Descripción de actividad
Recopilación y análisis de información	Esta etapa consiste en la recopilación y análisis de información secundaria a escala nacional e internacional referente a: -Métodos de cálculo para estimar la oferta superficial -Métodos de cálculo para estimar la demanda -Experiencias de cálculo -Marco conceptual -Marco normativo
Cálculo del indicador de escasez.	Para llevar a cabo la aplicación práctica, se procede en la siguiente forma: -Delimitación de la zona de estudio -Caracterización de la zona de estudio -Selección de los métodos de cálculo de oferta -Selección de los métodos de cálculo de demanda -Validación de la información de las bases de datos -Cálculo de índice de escasez de acuerdo con la zona de estudio y los métodos de cálculo seleccionados.
Análisis de resultados	Una vez que se obtienen los resultados del cálculo, se analizan éstos y se infiere cuál debe ser el índice de escasez calculado más confiable, teniendo en cuenta el contexto de la región de estudio, así como la información usada para estimar el volumen de agua producida y gastada.

Fuente: Elaboración propia, 2018.

Tabla 2
Resultados del cálculo de índice de escasez

Cuenca	Valoración	WTA	WSI	IUA
Área 1	15,83 %	Estresada	Ligeramente explotado	Demanda baja
Área 2	8,35 %	No estresada	Ligeramente explotado	Demanda muy baja
Área 3	31,18 %	Con escasez	Moderadamente explotado	Demanda apreciable
Área 4	6,93 %	No estresada	Ligeramente explotado	Demanda muy baja
Área 5	3,58 %	No estresada	Ligeramente explotado	Demanda muy baja
Área 6	16,37 %	Estresada	Ligeramente explotado	Demanda baja
Área 7	18,16 %	Estresada	Ligeramente explotado	Demanda baja
Área 7	3,13 %	No estresada	Ligeramente explotado	Demanda muy baja
Área 8	1,55 %	No estresada	Ligeramente explotado	Demanda muy baja
Área 8	0,92 %	No estresada	Ligeramente explotado	Demanda no significativa

Fuente: Elaboración propia, 2018.

Con respecto a los resultados, se genera una propuesta de mejora a la metodología que actualmente se emplea en el país para medir el índice de escasez, en relación con los rangos de evaluación.

En esta propuesta de ajuste de rangos se toma en cuenta lo citado en el texto *Critical Trends Global Change and Sustainable Development, 1997*. Así mismo, es fundamental considerar la clasificación citada por las Naciones Unidas, en la cual se expresa la relación entre aprovechamientos hídricos como un porcentaje de la disponibilidad de agua. En esta relación, cuando los aprovechamientos representan más de la mitad de la oferta disponible, se alcanza la condición más crítica. Por lo anterior se propone modificar la asignación de rangos que establece la metodología Ideam, pasando de evaluar cinco rangos a solamente cuatro; esto eliminaría el rango (<1%) (color azul), el cual califica la demanda como “no significativa”.

Igualmente, se recomienda ajustar las descripciones usadas para cada rango, con el fin de que el mensaje pueda generar mayor alerta.

Por último, se recomienda manejar la asignación de un color a cada rango establecido, ya que esto permitirá que visualmente se generen las alertas y se produzca una mejor y fácil comprensión del estado de la cuenca estudiada.

Producto de los análisis realizados, a continuación se relaciona el criterio de evaluación propuesto para medir el nivel de escasez (tabla 3).

Al aplicar los rangos propuestos, se concluye que en la cuenca del río Curo se calculó un índice de escasez de 10,53 %, lo que indica que la cuenca es calificada con una “Sin escasez”, tomando en cuenta una estimación por áreas de drenaje.

Tabla 3
Categorías e interpretación propuesta para definir el índice de escasez

Categoría	Rango	Color/Calificativo	Explicación
Alta	>51 %	Escasez absoluta	La presión de la demanda es muy alta con respecto a la oferta disponible
Medio alto	21 % – 50,99 %	Con escasez	La presión de la demanda es alta con respecto a la oferta disponible
Medio	11 % – 20,99 %	Con escasez baja	La presión de la demanda es baja con respecto a la oferta disponible
No significativo	0 % – 10,99 %	Sin escasez	La presión de la demanda no es significativa con respecto a la oferta disponible

Fuente: Elaboración propia, 2018.

Así mismo, resultado de la evaluación de la DOFA en el presente documento, se encontró que la metodología “Índice de sostenibilidad de la cuenca” es calificada como una herramienta apropiada para calcular el indicador de escasez. Cabe aclarar que ésta no es comparable con las anteriormente desarrolladas, ya que involucra en su evaluación criterios enfocados en la gestión y sostenibilidad de las fuentes; dentro de los criterios que evalúa se listan hidrología, ambiente, vida y política.

Tabla 4
Valores de indicadores e índice de sostenibilidad de la cuenca. Año seco y medio

Indicador	Valor
H	0,5
A	0,66
L	0,42
P	0,5
WSI	0,52

Fuente: Elaboración propia, 2018.

Una vez obtenido el valor final del WSI, se puede concluir que la cuenca del río Curo es calificada con una sostenibilidad intermedia, ya que su rango oscila entre 0,5 y 0,8.

Las mayores fortalezas se relacionaron con los indicadores ambientales, mientras que las mayores debilidades observadas se relacionaron con el indicador humano. Dentro de los rangos medios se calificaron el indicador de hidrología y política, la primera relativa a cantidad debido principalmente a la situación de no escasez hídrica y la segunda con la evolución en la capacidad institucional para el manejo de los recursos hídricos.

CONCLUSIONES

1. Como resultado de este análisis, se determina que la Resolución 865 de 2004 se encuentra desactualizada, y requiere actualizaciones para poder estimar la oferta y la demanda. Por lo anterior, se propone una guía práctica para su estimación y además se sugiere un ajuste en los rangos para calcular el indicador de escasez, generando una herramienta optimizada de alerta temprana, aplicable a futuros estudios de valoración de la seguridad hídrica del país.
2. A escala mundial son muchas las metodologías que buscan analizar la oferta y la demanda del recurso hídrico. Esto permitió analizar las propuestas y construir una matriz DOFA que busca fundamentalmente establecer cuál de estas metodologías puede ser más aplicable en el país, encontrando que las metodologías que más se ajustan y que se podrían aplicar para Colombia son la metodología de “Índice relativo local de uso y reúso de agua”, “Índice de sostenibilidad de la cuenca” y la de “Índice de estrés hídrico”, alcance que se relaciona durante el desarrollo del documento.
3. La metodología “Índice de sostenibilidad de la cuenca” es aplicable en cuencas que cuenten con un volumen de información que permita alimentar el modelo. Entre los más representativos están los datos de calidad de agua, datos institucionales, datos de conservación de la cuenca, etc. Esta metodología está más enfocada en medir la gestión que hacen las entidades estatales o privadas para el manejo de las fuentes hídricas, herramienta que sirve para evaluar su gestión.
4. Como resultado de la comparación de las metodologías investigadas, se encontró que algunas de las metodologías analizadas en la práctica no es posible implementarlas en el país, ya que la disponibilidad de información para alimentar bases de datos a la fecha en el país son limitadas.
5. La cuenca del río Curo, de acuerdo con los resultados de oferta y demanda, es calificada “Sin escasez”.
6. Se compararon los resultados obtenidos de la cuenca El Curo, con respecto a los calculados para las tres metodologías seleccionadas. Producto de esta comparación se encontraron diferencias significativas en los rangos que usa cada una de las metodologías para estimar la escasez, por lo que es necesario proponer un cambio en la evaluación de los rangos que actualmente sugiere el Ideam en su metodología de índice de escasez.
7. La oferta hídrica total se determinó a partir de la oferta neta disponible y el caudal ecológico permanente en las áreas de interés, teniendo en cuenta las actualizaciones del cálculo del caudal ambiental.
8. Para el cálculo de la demanda se implementó la metodología de módulos de consumo, metodología que actualiza la forma de cálculo que plantea la Resolución 865 de 2004. Además, se consideraron las

actualizaciones presentadas en el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS. Lo anterior para el cálculo del caudal ecológico y el cálculo de la dotación neta.

9. Para estimar la oferta se debe disponer de información hidrológica, ambiental, acceso a la información y tecnologías empleadas, así como de las metodologías empleadas para el cálculo de la demanda, donde se incluyen las actividades económicas del país, acceso a la información y tecnologías empleadas.

RECOMENDACIONES

1. Aplicar la propuesta presentada en futuros estudios de seguridad hídrica en el país.
2. Considerar que en el Estudio Nacional de Agua se incluye el cálculo de la demanda doméstica, en relación con lo presentado en la Resolución 0330 de 2017, para el cálculo de dotación neta, pérdidas en los sistemas de almacenamiento, tratamiento y distribución de agua.
3. Implementar estrategias para que la recolección de información en el país se optimice, de tal modo que se puedan alimentar modelos con datos reales.
4. Mejorar los aspectos de gestión de cuenca, calidad del agua, protección de áreas e inversión de la cuenca El Curo, que generan efectos importantes en las condiciones de escasez. Las medidas que hay que tomar para aumentar la evaluación de estos parámetros son importantes para poder garantizar la sostenibilidad de la cuenca.

REFERENCIAS

- Alcamo, J., Florke, M., & Marker, M. (18 de junio de 2010). Future long-term changes in global water resources driven by socio economic and climatic changes. *Hydrological Sciences Journal*, 52, 247–275. Obtenido de <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1623/hysj.52.2.247>.
- Allen, R., Perrier, M., & Pereira, L. (1994). *An update for the definition of reference evapotranspiration*. ICID Bulletin.
- Aparicio, F. M. (1999). *Fundamentos de hidrología de superficie*. México: Limusa.
- Arrache, L. S. (2011). *Intercambio de derechos de uso de agua. Un modelo para la gestión sostenible del recurso hídrico*. Barcelona: Universidad de Catalunya.
- Asheesh, M. (2003). *Allocating the gaps of shared water resources (the scarcity index)*. Oulu: Institute of Technology, Kotkantie. Recuperado el 2018, de https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-540-69509-7_24.
- Assimacopoulos, D. (marzo de 2004). *Indicators and indices for decision making in water resources management*. Obtenido de Water Strategy Man Project: <http://environ.chemeng.ntua.gr/WSM/Newsletters/Issue4/Indicators.htm>.
- Bradley, A. A., & Zhao, H. (1997). Climatic Variations in Extreme Precipitation in the Midwest. *Submitted to Journal of Hydrologic Engineering*, 4. Obtenido de <http://www.icaen.uiowa.edu/~abradley/publications/rfa2.pdf>.
- Brown, A., & Matlock, M. (2011). A review of water scarcity indices and methodologies. *The Sustainability Consortium*, 1-21.
- Budyco, M. (1974). *Climate and Life*. San Diego: Clif.
- Chaves, H. M., & Alipaz, S. (2007). An Integrated Indicator Based on Basin Hydrology, Environment, Life, and Policy. *The Watershed Sustainability Index. Water Resources Management*, 883-895.
- Chow, V. (1994). *Hidrología aplicada* (J. Saldarriaga, Trad.). Bogotá: McGraw Hill.
- Consuegra, C. M. (2013). *Síntesis metodológica para la obtención de caudales ecológicos, resultados y posibles consecuencias*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (2016). *Estudio para la determinación de módulos de consumo del recurso hídrico de las 10 cuencas de segundo orden y las ochenta y cuatro cuencas de tercer orden*. Colombia: Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR).
- Damkjaer, S., & Taylor, R. (2017). The measurement of water scarcity: Defining a meaningful indicator. *University College London Institute for Sustainable Resources Londres, Reino Unido*, 513-53.
- Domínguez Calle, E., Costa Posada, C., Gonzalo Rivera, H., & Vanegas Sarmiento, R. (2005). El índice de escasez de agua: ¿un indicador de crisis o una alerta para orientar la gestión del recurso hídrico? *Revista de Ingeniería*, 105. Recuperado el 11 de mayo de 2018.
- Domínguez, E. C., Rivera, H., Vanegas, R. S., & Moreno, P. (2008). Relaciones demanda-oferta de agua y el índice de escasez de agua como herramienta de evaluación del recurso hídrico colombiano. *Acad. Colomb. Ciencia*, 32 (123), 195-211.
- FAO (2010). *Aquastat: Water Use*. Obtenido de http://www.fao.org/nr/water/aquastat/water_use/index6.stm.
- Gleick, P. (1995). Water and Conflict: Fresh Water Resources and International Security. *International Security* 18 (1), 79-112.
- Goedkoop, M., & Spriensma, R. (2001). A Damage Oriented Method for Life Cycle Impact Assessment: Methodology Report. *The Eco-Indicator* 99.
- Guavio, C. A. (2015). *Estudio técnico base para la reglamentación de las unidades hidrológicas del área de drenaje El Curo del municipio de Gama*. Gama (Cundinamarca): CorpoGuavio.
- Heaps, C., Kemp-Benedict, E., & Raskin, P. (1998). Conventional Worlds: Technical Description of Bending the Curve Scenarios. *Global Scenario Group, Stockholm Environmental Institute. Stockholm: PoleStar*.
- Hoekstra, A. (2003). Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade. Recuperado el 2018, de <http://waterfootprint.org/media/downloads/Report12.pdf>.
- Hoekstra, A., Chapagain, A., Aldaya, M., & Mekonnen, M. (2011). *The Water Footprint Assessment Manual*. London - Washington, DC: Earthscan. Recuperado en mayo de 2018.
- ICWE (1992). *International Conference on Water and the Environment*. Genova: The Dublin statement and record of the conference.
- Ideam (2004). *Metodología para el cálculo del índice de escasez de agua superficial*. Bogotá, D.C.: Ideam.
- Infante Romero, H., & Ortiz, L. (2008). Ajuste metodológico al índice de escasez de agua propuesto por el Ideam en el plan de

- ordenación y manejo de la cuenca del río Pamplonita, Norte de Santander, Colombia. *Revista Colombia Forestal*, 11, 165-173.
- Instituto de Hidrología (2008). *Estudio Nacional de Agua*. Colombia: Imprenta Nacional de Colombia.
- Instituto de Hidrología (2010). *Estudio Nacional de Agua*. Colombia: Imprenta Nacional de Colombia.
- Instituto de Hidrología (2015). *Estudio Nacional del Agua*. Colombia: Imprenta Nacional.
- Jaramillo Rojas, C., Molina, F., & Betancur, T. (2011). Índices de escasez y de calidad del agua para la priorización de cuerpos de agua en los planes de ordenación del recurso hídrico. Aplicación en la jurisdicción de Corantioquia. *Ingenierías Universidad de Medellín*, 10, 33-46.
- Kalbermatten, J., Julius, D., Gunnerson, C., & Mara, D. (1982). *Appropriate sanitation alternatives: a planning and design manual*. Banco Mundial.
- Lvovotc, M. L. (1970). World water balance (General Report). *Symposium on the world water balance*. Wallingford, International Association of Hydrological Sciences, 93 (II), 401-415.
- Martínez, L. F., & Ruiz, L. F. (1998). *Metodología para la estimación de datos faltantes en series temporales diarias*. Ideam.
- McNulty, Moore, J., & Cohen, C. (2010). Robbing Peter to Pay Paul: Tradeoffs Between Ecosystem Carbon Sequestration and Water Yield. *Proceeding of the Environmental Water Resources Institute Meeting*, 12.
- Meigh, J. R., McKenzie, A. A., & Sene, K. J. (1999). A Grid-Based Approach to Water Scarcity Estimates for Eastern and Southern Africa. *Water Resources Management*, 85-115.
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (2012). *Alternativas para evitar una sequía prolongada en la ganadería colombiana*. Colombia: Sanmartín Obregón & Cía. Ltda.
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (2004). *Resolución 865*. Colombia: Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio.
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2017). *Resolución 0330*. República de Colombia: Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio.
- Molle, F., Molliga, P., & Philippus, W. (2009). *www.water-alternatives.org*. Obtenido de Hydraulic Bureaucracies and the Hydraulic Mission: Flows of Water, Flows of Power: <http://www.water-alternatives.org/index.php/allabs/65-a2-3-3/file>.
- Ohlsson, L. (2000). Water Conflicts and Social Resource Scarcity. *Phys. Chem. Earth*, 25 (3), 213-220.
- Organización de los Estados Americanos (2004). *Metodología para el cálculo de índice de escasez de agua superficial*. Lina: Talleres de la Oficina Técnica de Administración del INEI.
- Parques Nacionales Naturales de Colombia (6 de agosto de 2018). *Parques Nacionales Naturales de Colombia*. Obtenido de Parques Nacionales Naturales de Colombia: <http://www.parquesnacionales.gov.co/tesauroambiental/C/CAUDAL>.
- Pfister, S., Annette, A., & Hellweg, S. (2009). Assessing the Environmental Impacts of Freshwater Consumption in LCA. *Environmental Science & Technology (American Chemical Society)*, 4098-4104.
- Policy Research Institute (2007). *Canada water sustainability index project report*. Canada: Government of Canada.
- Rijsberman, F. R. (2004). *Water Scarcity: Fact or Fiction? "New directions for a diverse planet"*. Brisbane: Proceeding of the 4th International Crop Science Congress. .
- Schmidt, G., & Benítez, C. S. (agosto de 2013). How to distinguish water scarcity and drought in EU water policy. *Global Water Forum*. Recuperado en mayo de 2018, de <http://www.globalwaterforum.org/2013/08/26/how-to-distinguish-water-scarcity-and-drought-in-eu-water-policy/>.
- Silva, A., Ponce de León, J., García, F., & Durán, A. (1988). *Aspectos metodológicos en la determinación de la capacidad de retener agua de los suelos del Uruguay*. Universidad de la República del Uruguay.
- Smakhtin, V., Revenga, C., & Doll, P. (2004). Taking into account Environmental Water Requirements in Global - Scale Water Resources Assessments. *Colombo: International Water Management Institute*.
- Smith, R., & Velez, M. (1997). *Hidrología de Antioquia*. Secretaría de Obras Públicas Departamentales.
- Sokolo, A. A., & Chapman, T. G. (s.f.). *Metodos de cálculo del balance hídrico*. Madrid, España: Instituto de Hidrología de España.
- Solley, W., Pierce, R., & Perlman, H. (1998). *Estimated Use of Water in 1995. U.S. Geological Survey Circular 1200*. Alexandria, Virginia. Obtenido de <http://water.usgs.gov/watuse/pdf/1995/pdf/summary.pdf>. Accessed in July 2007.
- Sullivan, C. (2002). Calculating a Water Poverty Index. *World Development (Elsevier Science Ltd)*, 30 (7), 1195-1210.
- Szollósi-Nagy, A., Najlis, P., & Bjorklund, G. (1998). *Evaluación de los recursos mundiales de agua dulce*.
- Torres Rojas, L. P. (30 de julio de 2015). *Universidad de los Andes*. Obtenido de Visor tesis: https://biblioteca.uniandes.edu.co/visor_de_tesis/web/?SessionID=L1Rlc2lXzIwMTUyMDEvNzE3NC5wZGY%3D&as_fid=AAAAAAUziZFmGeVT9LNSplufybks9yah_6kDdGRpMa3apNE-v4VuFS7sYO6IXQBqRsYXlheRICZoHYbyuajC5sxtGtbh5IHw1oEJV59kml2ScYSyQ%3D%3D&as_fid=j8pXWlCjX7NFBAv7GSP.
- Torres, A., & Peñaranda, G. (2006). *Regionalización de caudales mínimos por métodos estadísticos de la cuenca Magdalena-Cauca*. Bogotá: Universidad de La Salle.
- UN-Consejo Económico y Social (1997). *Evaluación general de los recursos de agua dulce del mundo*. New York: Informe del Secretario General.
- Unesco (1982). *Guía metodológica para la elaboración del balance hídrico de América del Sur*. Montevideo: Rostlac.
- Vicente Serrano, S. M. (1.º de enero de 2012). <http://aeclim.org>. Obtenido de <http://aeclim.org>: http://aeclim.org/wp-content/uploads/2016/02/0066_PU-SA-VIII-2012-SM_VICENTE.pdf.
- Vorosmarty, C. J., Douglas, E. M., Green, P. A., & Revenga, C. (2005). Geospatial Indicators of Emerging Water Stress: An Application to Africa. *Ambio* 34 (3), 230-236.
- White, C., Allendes, D., & Wyrwoll, P. (2014). Global Water Issues and Insights. En C. White, *Global Water Issues and Insights* (pp. 161-165). Australia: Anu Press.
- Yang, H., & Zehnder, J. B. (2002). Water Scarcity and Food Import: A Case Study for Southern Mediterranean. *World Development*, 30 (8), 1413-1430.
- Yang, H., Reichert, P., Abbaspour, K. C., & Zehnder, J. B. (2003). A water resources threshold and its implications for food security. *Environmental Science & Technology (American)*, 3048-3054.
- Zhang, L., Dawes, W., & Walter, G. (1999). *Predicting the effect of vegetation changes on catchment average water balance*.
- Zhou, G., Sun, G., Wang, X., Zhou, C., McNulty, S., Vose, J., & Amatya, D. (2008). *Estimating forest ecosystem evapotranspiration at multiple temporal scales with a dimension analysis approach*. Journal of the American Water Resources Association. Recuperado el 2018, de https://www.srs.fs.usda.gov/pubs/ja/ja_zhou006.pdf.
- Zuluaga Duque, L. (2011). *Simulador piloto de la oferta y la demanda hídrica en una microcuenca rural para la validación de metodologías y la evaluación de políticas de manejo sostenible del recurso agua*. Medellín: Universidad Nacional.

Evaluación de una alternativa de compostaje para el tratamiento de los residuos orgánicos biodegradables de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Assessment of a composting alternative for the treatment of biodegradable organic waste from Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

LAURA CRISTINA LESMES POSADA¹ - MARÍA PAULINA VILLEGAS DE BRIGARD²

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

2. Magíster (DEA) en Ciencias y Técnicas del Agua. Profesor de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

laura.lesmes@escuelaing.edu.co - maria.villegas@escuelaing.edu.co

Recibido: 20/01/2019 Aceptado: 08/02/2019

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

Resumen

En el presente artículo se establecen las condiciones óptimas de operación de un proceso de compostaje por medio de una comparación de los resultados obtenidos en una planta piloto. Los análisis se realizaron para dos modelos de mezcla de residuos orgánicos biodegradables provenientes de las actividades de corte de césped, poda de árboles y preparación de alimentos en la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

Se hicieron ocho montajes para cada uno de los dos modelos, y en ambas mezclas se utilizaron residuos de corte de césped, poda de árboles (hojas verdes, secas y hojarasca, dependiendo de la disponibilidad) y aserrín. En el primero se incluyeron adicionalmente residuos de frutas y verduras (alimentos crudos o sin procesar), mientras que en el segundo se incluyeron residuos de alimentos cocinados.

Al final del proyecto se determinó entre las dos opciones de mezcla la que producía el mejor resultado. El proceso de evaluación consistió en hacer seguimiento a los parámetros de humedad, pH y temperatura durante el proceso, y una verificación final del producto terminado por medio de análisis de caracterización y composición en laboratorio. Finalmente, se realizó la comparación del compost con la norma

NTC 5167, aplicable para productos orgánicos usados como abonos en Colombia.

En conclusión, la mezcla de residuos cocinados, poda de árboles y corte de césped produjo un mejor resultado para el proceso de compostaje, ya que se alcanzaron altas temperaturas, que se mantuvieron por un largo tiempo, y el producto terminado cumplió todos los requerimientos establecidos en la norma NTC 5167.

Palabras claves: compostaje, aprovechamiento de residuos, residuos orgánicos biodegradables.

Abstract

This article establishes the optimum operating conditions of a composting process through a comparison of the results obtained in a pilot plant. The analyses were carried out for two different models of biodegradable organic waste mixture from the activities of grass cutting, tree pruning, and food preparation at Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

Eight assemblies were made for each of the two models, in both mixtures grass cutting, tree pruning (green leaves, dry and litter depending

on availability), and sawdust were used. In the first, fruit, and vegetable residues (raw or unprocessed foods) were also included, while in the second, cooked food residues were included.

At the end of the project, the one that produced the best result was determined between the two mixing alternatives. The evaluation process consisted in monitoring the parameters of humidity, pH, and temperature during the process, and a final verification of the finished product making a characterization and composition analysis in the laboratory. Finally, the compost was compared with standard NTC 5167 applicable to organic products used as fertilizers in Colombia.

In conclusion, the mixture of cooked residues, tree trimming, and grass cutting produced a better result for the composting process, as they reached high temperatures maintaining them for a long time and the finished product meets all the requirements established in the standard NTC 5167.

Keywords: composting, waste management, biodegradable organic waste.

INTRODUCCIÓN

La situación actual a escala mundial en cuanto a los residuos sólidos biodegradables refleja la necesidad de aprovechar este tipo de residuos. La disposición inadecuada de éstos conduce a una generación excesiva de gases de efecto invernadero y ocupación de espacios que podrían llegar a utilizarse para otros fines. Estos desechos deben manejarse de manera sostenible para evitar el agotamiento de los recursos naturales, minimizar el riesgo para la salud humana, reducir las cargas ambientales y mantener un equilibrio general en el ecosistema (Khalid, Arshad, & Anjum, et al., 2011).

Un buen proceso de compostaje de los residuos sólidos orgánicos biodegradables permite una adecuada recuperación de los suelos, devolviéndoles sus características tanto químicas como biológicas, una reducción en los gases de efecto invernadero, una merma en el área requerida para la disposición, disminución de costos y de uso de abonos químicos o fertilizantes.

La Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, institución universitaria de educación superior, genera una gran cantidad de residuos de corte de césped y poda de árboles que hasta el momento no se han aprovechado. Genera también, aunque en una proporción muy inferior, residuos de alimentos. El propósito del proyecto fue determinar las mezclas de residuos más adecuadas y los requerimientos específicos para el compostaje a partir de un montaje piloto, al mismo tiempo que buscaba fomentar la implementación y el desarrollo de metodologías para su aprovechamiento.

RESULTADOS

Se implementó el piloto de compostaje en un espacio de 3 x 3 m con cubierta y cerramiento, utilizando canastas plásticas adecuadas como composteras. El piloto, compuesto por zonas de pesaje, mezcla, compostaje y maduración, servirá como espacio de aprendizaje y exploración para futuras investigaciones.

El cerramiento inicial se hizo con polisombra, pero en los primeros montajes se presentaron fuertes olores y moscas debido a una aireación insuficiente. Se decidió cambiar el cerramiento haciéndolo en malla y descartar los resultados anteriores en el análisis (figura 1).



Figura 1. Piloto de compostaje antes y después de adecuaciones del cerramiento.

Las condiciones deseadas para un buen desarrollo del proceso de compostaje, según la bibliografía consultada, se presentan más adelante (tabla 1).

Para la determinación de las mezclas y la operación del piloto se tomaron como condiciones las presentadas posteriormente (tabla 2).

Se establecieron dos modelos de mezcla para los residuos de corte de césped y poda de árboles: uno con residuos de frutas y verduras (alimentos crudos o sin procesar) y otro con residuos de alimentos cocinados. Se analizaron seis montajes para cada mezcla (los dos primeros se descartaron). Así mismo, se muestra el resumen de las proporciones y características obtenidas (tablas 3 y 4).

Para los montajes del modelo de frutas y verduras se obtuvieron relaciones C:N de 23:1 a 35:1, humedades de 54 al 65 % y temperaturas máximas de 45 °C, mientras que para el modelo de residuos de alimentos cocinados se obtuvieron relaciones C:N de 25:1 a 30:1, humedades de 55 a 65 % y temperaturas máximas de

Tabla 1
Condiciones óptimas de operación para el proceso de compostaje, según varias fuentes

Fuente	Condiciones óptimas para el proceso						
	Humedad (%)	pH	Temperatura (°C)	Oxígeno disuelto (%)	Relación C/N inicial	Tamaño de partícula	Densidad
Universidad de Cornell	40 - 60	5,5 - 8	>40, 50 en 3 días a 5 días 60 - 70	>10	30:1	Medio	
Acodal	40 - 60 %	5,5 - 8	Fase 1 40 °C Fase 2 60 - 65 °C Fase 3 <40 °C	>10	25 - 30:1	1 - 10 cm	
FAO. Manual del compostaje del agricultor	50 - 60 al inicio 45 - 55 fase 2 y 30 - 40 al final	Fase mesofílica 4 - 4,5- Fase termofílica 7 - 8,5 fase mesofílica 7 y maduración 7	Fase 1 45 °C Fase 2 llega a 60° Fase 3 40 a 45 °C	5 - 15	25 - 35:1 y final de 15:1	10 - 15 cm	150 - 250 kg/ m ³ inicial y 600 - 700 kg/ m ³ final
Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos, Bogotá	45 - 60 inicial. Al finalizar 30 - 35 %	5 - 5,5 mesofílica 8 - 9 termofílica 8,5 mesofílica 2 y 7 - 8 maduración	40° fase mesofílica de 40 a 70 en termofílica de 40 a 45 en mesofílica 2 y 18 a 22 en maduración	5 - 15	30:1 (inicial) 10 - 12 (final)	5 - 10 cm	
Composting food wastes, University of Plymouth	45 - 65	5,5 - 8	54 - 60	>10	20:1 - 35:1	2,5 - 5,0 cm	600 kg/m ³
On-Farm Composting, Virginia cooperative extension	50 - 60	6,5 - 8,0	43 - 60	>5	25:1 - 30:1	1/8 a 2 pulgadas	<40 lb/ft ³
Co-composting of green waste and food waste at low C/N ratio	45 - 75	5,0 - 9			13,9:1 - 19,6:1		
Effects of compositions on food waste composting	55	4,8-9					

Tabla 2
Condiciones ideales para el proceso de compostaje

Condiciones ideales para el proceso		
	Unidades	Valor
Humedad inicial	%	60
pH		6 - 8
Temperatura mínima alcanzada	°C	60
Oxígeno disuelto	%	>10
Relación C:N inicial		30:1
Tamaño de partícula	cm	5 - 10
Densidad final	kg/m ³	600

61 °C. Con respecto a los montajes 1 y 2, fue necesario realizar un volteo debido a una disminución notable de la temperatura, sin que se observara una adecuada descomposición de los residuos de alimentos.

Las mediciones de pH, temperatura y humedad a lo largo del proceso se realizaron en tres puntos de la

canasta: izquierda, centro y derecha. Más adelante se presenta la conducta típica observada para todos los montajes reflejada en el montaje 7, resultando más homogéneo el comportamiento en la mezcla de residuos cocinados que en la de residuos de frutas y verduras (crudos) (figura 2).

Con respecto a la humedad, se puede observar el comportamiento típico para todos los montajes (figura 3). Hay una tendencia a disminuir a lo largo del tiempo, haciéndose más evidente en la mezcla de residuos cocinados.

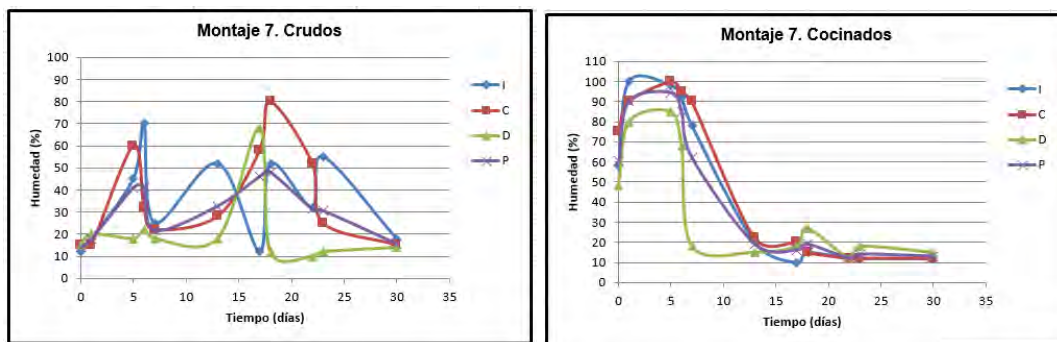
Así mismo, se aprecia el comportamiento del pH, similar en todos los montajes (figura 4). Al inicio del proceso hay una disminución en su valor. Aunque no baja hasta 4,5, como se indica en la bibliografía, se observa que sí disminuye, posiblemente debido a la acumulación de ácidos orgánicos. Al final del proceso se observa una estabilización del pH en 6,9, específicamente para la mezcla de residuos cocinados en todos los montajes.

Tabla 3
Resumen de proporciones y características obtenidas en el modelo de residuos de frutas y verduras

Componente		Montaje residuos de frutas y verduras					
		1	2	3	4	5	6
		12 sep.	10 sep.	12 oct.	18 oct.	24 oct.	3 nov.
Peso (kg)	Corte de césped	1,16	2,50	1,56	1,10	1,86	1,50
	Poda de árboles	-	-	1,98	-	-	2,38
	Hojasca	1,22	1,10	-	0,78	0,74	-
	Residuos de frutas y verduras	4,38	3,76	9,10	7,62	4,12	8,30
	Residuos de alimentos	-	-	-	-	-	-
	Aserrín	-	-	1,50	1,00	1,00	1,00
Parámetro	Carbono (kg)	1,33	1,77	2,52	1,98	1,82	2,46
	Nitrógeno (kg)	0,05	0,08	0,08	0,06	0,06	0,08
	Relación C/N	28,47	23,21	30,55	34,99	29,89	30,04
	% de humedad	63,84	56,74	65,13	63,45	54,21	63,92
	Temperatura máxima	27	30	39	43	32	45
	Tiempo para alcanzar T máx.	10	1	7	7	1	3

Tabla 4
Resumen de proporciones y características obtenidas en el modelo de residuos de alimentos cocinados

Componente		Montaje de residuos de frutas y verduras					
		1	2	3	4	5	6
		12 sep.	10 sep.	12 oct.	18 oct.	24 oct.	3 nov.
Peso (kg)	Corte de césped	1,7	3,1	2,7	0,7	2,2	1,6
	Poda de árboles	-	-	1,8	-	-	1,8
	Hojasca	2,7	1,6	-	0,9	0,8	-
	Residuos de frutas y verduras	-	-	-	-	-	-
	Residuos de alimentos	13,9	13,9	16,1	9,0	7,9	17,5
	Aserrín	2,1	1,5	3,0	1,5	1,8	3,0
Parámetro	Carbono (kg)	3,3	2,8	3,6	1,8	2,1	3,4
	Nitrógeno (kg)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	Relación C/N	29,76	25,26	25,18	30,09	28,98	22,72
	% de humedad	62,40	54,77	64,02	64,12	61,54	65,27
	Temperatura máxima	50	50	61	53	48	59
	Tiempo para alcanzar T máx.	6	6	7	4	5	3



I: Izquierda, C: Centro, D: Derecha y P: promedio.

Figura 2. Variación de la humedad en el área para el montaje 7.

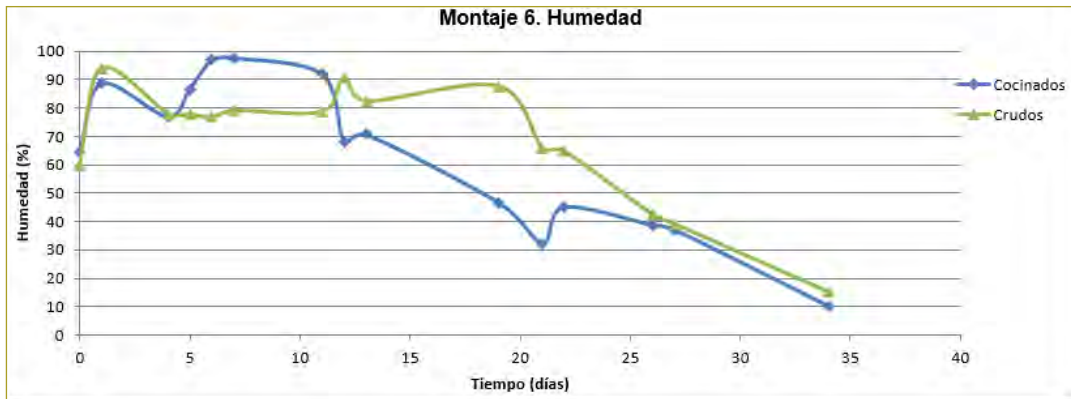


Figura 3. Variación de la humedad a lo largo del tiempo para el montaje 6.

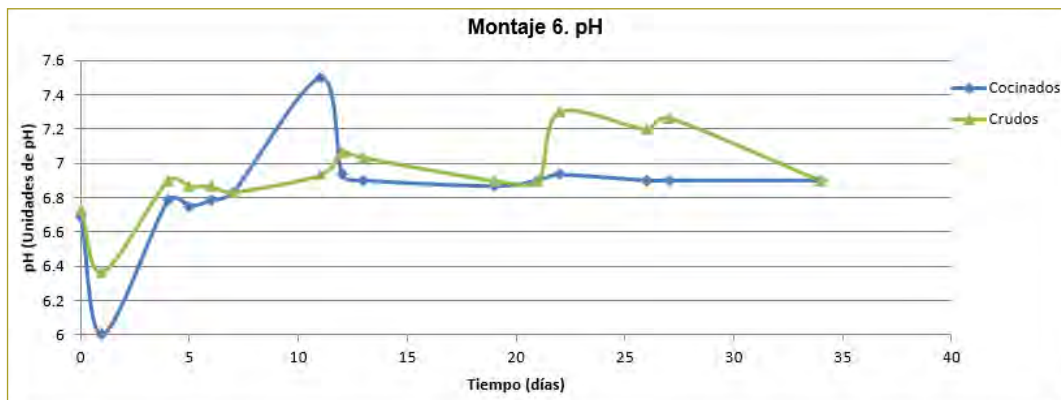


Figura 4. Variación del pH a lo largo del tiempo para el montaje 6.

Con respecto a la temperatura (figura 5), en la mezcla de residuos cocinados se observa el comportamiento típico de la curva de temperatura de un proceso de compostaje, en el que primero existe un aumento de temperatura hasta llegar a un valor máximo y después

disminuye, hasta finalmente llegar a una estabilización a temperatura ambiente. En general, las temperaturas alcanzadas son mayores en el módulo de residuos de alimentos cocinados.

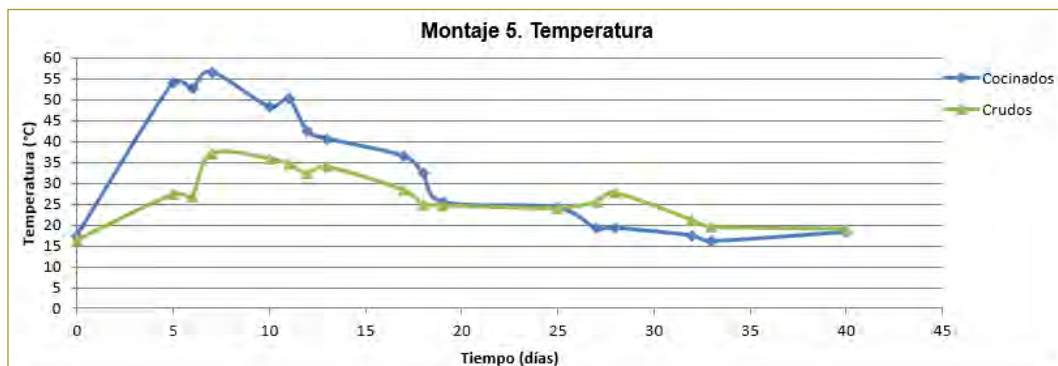


Figura 5. Variación de la temperatura a lo largo del tiempo para el montaje 5.

El producto obtenido con las dos mezclas ensayadas tuvo el aspecto, color y olor característicos del compost (figura 6). Se tomaron cuatro muestras, dos de cada módulo, y se enviaron al laboratorio para determinar sus características y compararlas con la norma NTC 5167, aplicable para productos orgánicos usados como abonos en Colombia. En la tabla siguiente se presentan los resultados obtenidos (tabla 5).

Como se observa en la tabla de resultados, las muestras del módulo de residuos de alimentos cocinados cumplieron con todos los parámetros físicos y químicos establecidos. Las muestras del módulo de residuos de alimentos de frutas y verduras no cumplieron con los



Figura 6. Aspecto final del compost obtenido. Izq.: residuos crudos. Der.: residuos cocinados.

Tabla 5
Caracterización y composición del producto final para ambos modelos

Parámetros	Unidades	Muestra				NTC 5167
		Cocinados		Crudos		
		1	2	3	4	
Humedad	%	23,8	28,7	65,7	67,5	Máx. 35 %
Cenizas	%	7,87	8,98	3,59	4,77	Máx. 60 %
Pérdidas por volatilización	%	68,3	62,3	30,7	27,7	
Carbono orgánico oxidable total	%	28,4	27,7	13,4	11,4	Mín. 15 %
pH (pasta de saturación)	Unidades pH	6,25	6,25	8,67	8,3	Entre 4 y 9
Densidad (base seca 20 °C)	g/cm ³	0,31	0,33	0,29	0,33	Máx. 0,6 g/cm ³
Conductividad eléctrica	dS/cm	12,2	5,49	6,04	12,1	
Retención de humedad	%	250	239	128	112	Mín. 100 %
Cap. intercambio catiónico	(me/100 g)	60,1	52,1	26,9	25,9	Mín. 30 meq/100 g
C/N		21	20	30	28	Caracterizar
N total (NOrg)	%	1,35	1,36	0,45	0,41	Declarar si es > 1 %
Nitrógeno orgánico (NOrg)	%	1,35	1,36	0,45	0,41	Declarar si es > 1 %
Fósforo total (P ₂ O ₅)	%	0,98	0,62	0,17	0,15	Declarar si es > 1 %
Potasio total (K ₂ O)	%	1,04	0,95	0,81	0,81	Declarar si es > 1 %
Calcio total (CaO)	%	0,47	0,52	0,53	0,36	
Magnesio total (MgO)	%	0,17	0,16	0,09	0,09	
Azufre total (S - SO ₄)	%	0,13	0,15	0,06	0,05	
Hierro total	%	0,06	0,13	0,03	0,05	
Manganeso total	mg/kg	51,7	61,6	34,8	34,5	
Cobre total	mg/kg	5,32	7,11	4,73	4,58	
Zinc total	mg/kg	29,2	33,2	14,8	14,6	
Boro total	mg/kg	13,3	12,5	7,17	6,53	
Sodio total	%	0,59	0,61	0,04	0,02	
Sílice total SiO ₂ (extraído con HF)	%	1,9	3,23	0,95	1,07	
Residuo insoluble en ácido	%	1,08	2	0,32	1,25	
		Cumple		No cumple		

parámetros de humedad, carbono orgánico oxidable total y capacidad de intercambio catiónico.

CONCLUSIONES

La Escuela Colombiana de Ingeniería genera anualmente, en promedio, 326 toneladas de residuos de corte de césped y poda de árboles y 32 toneladas de residuos de alimentos provenientes de los establecimientos de comida, lo cual corresponde a una relación de 10 a 1. Es importante darle un tratamiento adecuado a esta gran cantidad de residuos de jardín; sin embargo, teniendo en cuenta su bajo contenido de carbono, baja humedad y lenta degradación, es necesario hacer mezclas con otro tipo de residuos. En este estudio, la mezcla empleada para obtener un producto adecuado tiene una mayor cantidad de alimentos que de césped y hojas, por lo que se debe evaluar la posibilidad de usar otros agentes que contribuyan a un buen desarrollo del proceso.

Se comprobó que para un adecuado funcionamiento de un proceso de compostaje se debe mantener la humedad en un rango de 40 - 60 %, su relación C:N inicial debe estar entre 25:1 y 30:1, el tamaño de partícula debe ser pequeño (5 - 10 cm) y el uso de un agente de carga puede ser necesario para lograr los valores de humedad, relación C:N y porosidad adecuada para un buen desarrollo del proceso.

Una suficiente aireación es indispensable para el adecuado funcionamiento del proceso, ya que con esto se previenen problemas como zonas de anaerobiosis, producción de olores y llegada de animales como roedores o moscas.

Con respecto al producto final, ambos modelos degradaron completamente los residuos de alimentos, frutas y verduras hasta obtener el aspecto y el olor terroso característicos del compost, pero los residuos de hojas y corte de césped requieren un mayor tiempo de proceso; por lo tanto, es necesario realizar un tamizado para separar este tipo de residuo y volver a mezclarlo con material nuevo para seguir con su proceso.

La mezcla de residuos cocinados, poda de árboles, corte de césped y aserrín produjo un mejor resultado para el proceso de compostaje. Se alcanzaron altas temperaturas, que se mantuvieron por un largo tiempo, y adicionalmente el producto terminado cumple todos los requerimientos físicos y químicos establecidos en la norma NTC 5167 para abonos orgánicos.

El porcentaje en peso de mezcla de residuos de corte de césped, poda de árboles y hojarasca debe estar entre el 13 y el 24 %, los residuos de alimentos cocinados entre un 62 y 74 % y el de aserrín entre 7 y 15 %, para obtener un producto adecuado, tomando en cuenta que se debe mantener la humedad cercana al 60 %, relación C:N inicial alrededor de 30:1, oxígeno disuelto mayor que el 10 % y tamaño de partícula de 5 a 10 cm, aproximadamente.

RECOMENDACIONES

Es necesario continuar realizando investigaciones para lograr una buena mezcla que produzca un mejor compost final, aprovechando los residuos sólidos orgánicos biodegradables producidos en el campus de la Escuela, considerando que la mayor cantidad corresponde a corte de césped y poda de árboles.

Así mismo, se aconseja continuar investigando en el campo del compostaje para aprovechar los residuos orgánicos biodegradables de la Escuela Colombiana de Ingeniería, explorando nuevas posibilidades como las siguientes:

- Aplicación de melaza o inoculación de microorganismos.
- Análisis del proceso con énfasis en la microbiología.
- Nuevas mezclas para mejorar la degradación de pasto.
- Agentes de carga distintos del aserrín, como vasos de cartón.
- Compostaje de vasos, platos y cubiertos desechables que se encuentran en el mercado y se ofrecen como biodegradables.

REFERENCIAS

- Acodal. Sepúlveda, L., & Alvarado, J. (2013). *Manual de aprovechamiento de residuos orgánicos a través de sistemas de compostaje y lombricultura en el valle de Aburrá* (1.a ed.). Medellín: Acodal, seccional Noroccidente.
- Chang, J. I., & Hsu, T.-E. (2008). Effects of compositions on food waste composting. *Bioresource Technology*, 99(17), pp. 8068–8074.
- Cornell Waste Management Institute (1995). *The compost process. Municipal Yard Waste Composting Operator's Fact Sheet*. Recuperado de <http://cwmi.css.cornell.edu/composting.htm> el 12 de agosto de 2017.
- Khalid, A., Arshad, M., & Anjum et al. (2011). The anaerobic digestion of solid organic waste. *Waste Management*, 31(8), 1737–1744.

Kumar, M., Ou, Y-L. y L., & Lin, J-G. (2010). Co-composting of green waste and food waste at low C/N ratio. *Waste Management*, 30(4), pp. 602–609.

Lesmes, L. (2019, enero). Evaluación de una alternativa de compostaje para el tratamiento de los residuos orgánicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito (tesis de maestría). Maestría en Ingeniería Civil. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

NTC 5167. *Productos para la industria agrícola. Productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas de suelo* (2004). Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. Colombia.

Román, P., Martínez, M.M., & Pantoja, A. (2013). *Manual de compostaje del agricultor. Experiencias en América Latina*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la

Agricultura (FAO). Recuperado de <http://www.fao.org/3/a-i3388s.pdf> el 13 de abril de 2017.

Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos (2014). Guía técnica para el aprovechamiento de residuos orgánicos a través de métodos de compostaje y lombricultura. Recuperado de http://www.uaesp.gov.co/images/Guia-UAESP_SR.pdf el 15 de abril de 2018.

University of Plymouth (2005). Composting food wastes 1. Scientific aspects. Recuperado de <http://www.research.plymouth.ac.uk/pass/Research/Scientific%20aspects%20of%20food%20waste%20composting.pdf> el 10 de octubre de 2018.

Virginia Polytechnic Institute and State University (2009). On - Farm Composting. A guide to Principles, Planning & Operations. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/237698064_ON_FARM_COMPOSTING_A_GUIDE_TO_PRINCIPLES_PLANNING_AND_OPERATIONS el 15 de agosto de 2017.

Modelación de fuentes de emisión en Aermod, con información meteorológica de Bogotá

Modelling emission sources in Aermod with meteorological information from Bogotá

GUSTAVO ADOLFO BURBANO SEFAIR¹ - HENRY TORRES POSADA²

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

2. Magíster en Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional.

gustavo.burbano-s@mail.escuelaing.edu.co - henrytorrespo@yahoo.com

Recibido: 25/01/2019 Aceptado: 12/02/2019

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

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

Resumen

La ejecución de modelos de calidad de aire en Aermod requiere el uso de datos de horarios de temperatura, humedad relativa, nubosidad, precipitación, presión atmosférica, velocidad y dirección del viento de manera horaria. Sin embargo, las estaciones meteorológicas en Colombia, administradas por el Ideam¹ a escala nacional y otras entidades a escala local, no poseen suficientes datos, por lo cual hay que utilizar información proveniente de modelos de pronóstico de clima para obtener 8760 horas de datos anuales requeridos para cada variable climática necesaria para correr el modelo. Por lo anterior, se hizo una comparación de dos fuentes de datos: los obtenidos de una estación meteorológica colombiana, utilizando interpolación lineal para completar los datos necesarios, y los datos obtenidos del modelo WRF². Para cada fuente de datos se efectuó una modelación hipotética en la ciudad de Bogotá.

Palabras claves: Aermod, calidad de aire, meteorología, WRF.

Abstract

For the execution of air quality models in Aermod, it is necessary to use hourly data of temperature, relative humidity, cloud cover, precipitation, atmospheric pressure, wind speed and wind direction. However, weather stations in Colombia, which are managed by Ideam and other entities at local or regional level, have insufficient data; therefore, it is necessary to use climate models to obtain 8760 hours of data required for one year of each variable necessary to run the model. Hence, a comparison is made of the two data sources, one as a result of a Colombian meteorological station using linear interpolation to complete the necessary data and the other obtained from the WRF model, for each data source a hypothetical modeling was performed in Bogota.

Keywords: Aermod, air quality, meteorology, WRF.

1. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam).

2. Weather Reserch and Forecasting model.

INTRODUCCIÓN

Una de las áreas de interés de la ingeniería ambiental en los estudios de calidad de aire se basa en el conocimiento del transporte de los contaminantes emitidos a la atmósfera por diversas fuentes, ya sea de origen natural o antrópico. La normativa ambiental en este sentido es cada vez más estricta y exige la aplicación de modelos matemáticos para evaluar el impacto de las emisiones atmosféricas, establecer los mecanismos de prevención y control tanto de fuentes fijas como de fuentes móviles y dar cumplimiento a los estándares de emisión y descarga de los contaminantes.

Sin embargo, la información que requiere el sistema de modelación AERMOD es en materia de horas, lo que indica que son necesarios como mínimo 8760 datos de información para un año, de manera superficial, y para el perfil meteorológico se necesitan mínimo 365 datos (al menos el sondeo de una hora del día).

METODOLOGÍA

Se revisó la información recolectada en las estaciones hidrometeorológicas del IDEAM, identificando el tipo de estación y la frecuencia con la cual se toman los datos. Se consultaron guías existentes para la construcción de los archivos meteorológicos de entrada para el *software* AERMOD, con el fin de identificar los requisitos mínimos de información para correr el modelo, y establecer una metodología sencilla para la construcción de un archivo meteorológico, definiendo las variables meteorológicas mínimas requeridas a partir de datos de estaciones del IDEAM.

Con el ánimo de validar la información y alcanzar el objeto de este proyecto, se efectuó una modelación en la ciudad de Bogotá utilizando un caso hipotético con archivos meteorológicos construidos con la información de las estaciones del IDEAM y la Secretaría Distrital de Ambiente (SDA) más cercanas al aeropuerto El Dorado y la misma modelación, empleando información del modelo predictivo WRF para el año 2015. Todos los resultados obtenidos se compararon para determinar las principales diferencias presentes en la dispersión de los contaminantes en un área específica, tanto en las concentraciones obtenidas como en la distribución espacial de los conos de dispersión.

RESULTADOS

Construcción de los archivos meteorológicos de entrada para su uso en AERMOD

Con base en la información meteorológica requerida para un proyecto de modelación, se seleccionó la estación 21205790 Apto. El Dorado (aeropuerto El Dorado) para la obtención de información horaria administrada por el IDEAM y la estación meteorológica Las Ferias, perteneciente a la red de monitoreo de calidad de aire de la ciudad de Bogotá. Con base en la información de esas dos estaciones se efectuó el proceso de consecución de datos y modelación de un caso hipotético.

Se obtuvieron datos de precipitación, evaporación, nubosidad, temperatura, velocidad y dirección del viento y rosa de vientos para el año 2015. Sin embargo, se pudo observar que la información suministrada no corresponde a todas las horas del día, sino que se registran lecturas en horas específicas.

Es así como para la temperatura se hacen tres lecturas diarias, a las 7, 13 y 19 horas, razón por la cual se decidió efectuar la interpolación de los valores de temperatura entre las 7 y 13 h, entre las 13 y 19 h y entre las 19 y 7 h del día siguiente. La interpolación se propone teniendo en cuenta que entre las 7 y las 13 h la temperatura va aumentando hasta alcanzar su máximo en la hora 13, y entre las 13 y las 19, y las 19 y las 7 del día siguiente, va disminuyendo. Para las demás variables, humedad relativa, punto de rocío y humedad, que también se reportan a las mismas horas, se decidió efectuar el mismo procedimiento, para no llenar el archivo de datos faltantes o desconocidos. De esta manera, se obtienen los 8760 datos requeridos para cada variable.

La presión atmosférica se tomó en forma constante, pues se presume que no hay mayor variación con la altura sobre el nivel del mar (742,71 mb).

En cuanto a la dirección y velocidad del viento, como solo se pudo conseguir información diaria, se decidió obtener información de la estación meteorológica Las Ferias, perteneciente a la red de monitoreo de calidad de aire de la ciudad de Bogotá, la cual cuenta con información horaria de velocidad y dirección del viento. Así mismo, ésta se puede descargar a través de internet, por lo que la consecución de los datos es de gran facilidad. Cabe anotar que la información de vientos es tal vez la más importante a la hora de la ejecución de un proyecto de modelación, puesto que finalmente éstos determinan hacia dónde se dirigirán los contaminantes de una fuente

de emisión. Al parecer, el esquema de almacenamiento de datos del Ideam no contempla la evaluación de la calidad del aire para modelos de dispersión, por cuanto no se conservan registros horarios. A pesar de todo, el aeropuerto maneja este tipo de información, pero ésta no es accesible al público y es administrada por el área de meteorología aeronáutica de la Aerocivil.

Los datos de radiación solar se consiguieron a partir de la aplicación Pysolar³. En esta aplicación se establecen las coordenadas del sitio de modelación para obtener la radiación horaria del año deseado.

La información de perfil se obtuvo a partir de los reportes de la radiosonda del aeropuerto El Dorado, en formato FSL, a través de la web <https://ruc.noaa.gov/raobs/Welcome.cgi>.

Así mismo, se compararon datos superficiales y de perfil del año 2015, obtenidos con WRF para el aeropuerto El Dorado, listos para procesar directamente en Aermet.

Los datos construidos y obtenidos externamente se procesaron en Aermet, logrando los siguientes resultados:

Los datos de temperatura obtenidos de la estación del aeropuerto El Dorado e interpolados entre sus tres datos reportados diariamente varían entre 276,8 K y 296,9 K. Los datos conseguidos a partir de la información del modelo WRF presentan variaciones entre 280,9 K y 296,9K. La diferencia en el promedio de temperatura entre las dos series de datos es de 0,83K. Los datos presentan una correlación baja (figura 1).

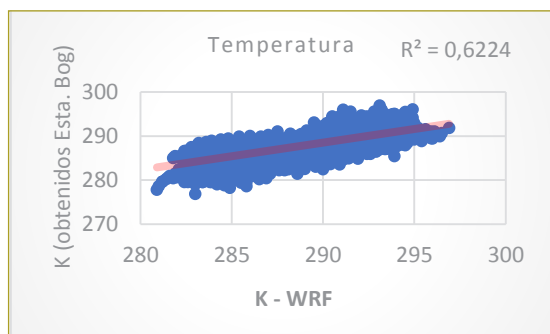


Figura 1. Comparación de valores de temperatura.

3. Pysolar es una aplicación compuesta por una colección de bibliotecas de Python para simular la irradiación de cualquier punto de la Tierra por el Sol.

La humedad relativa a nivel horario varía entre el 26 % y el 98 % para los datos interpolados de la estación del aeropuerto El Dorado, y entre 19 % y 100 % para los datos obtenidos con WRF. La humedad relativa promedio es más alta con los datos interpolados y se presenta una diferencia entre los promedios de las series de datos de 7,19 % (figura 2).

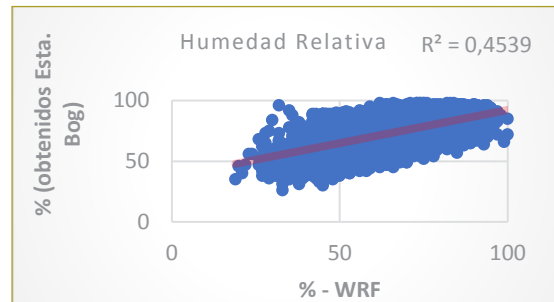


Figura 2. Comparación de valores de humedad relativa.

Los valores de nubosidad no tienen correlación. Para los datos obtenidos con WRF la nubosidad promedio es de 2/10, mientras que con los datos construidos es de 8/10. Esto pudo verse afectado por la interpolación efectuada, ya que dicho método puede incrementar la nubosidad significativamente (figura 3).

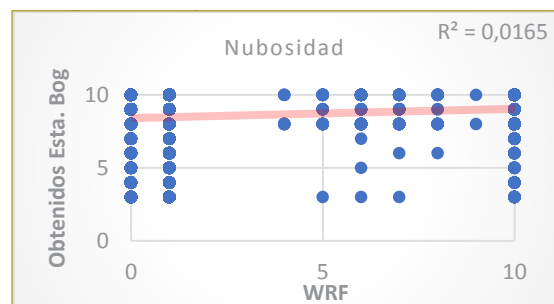


Figura 3. Comparación de valores de nubosidad.

El flujo de calor sensible para la estación El Dorado varía entre -64 y 164 W/m^2 , mientras que los datos obtenidos a partir de WRF varían entre -64 y 339 . Estos datos pudieron verse afectados por la nubosidad, razón por la cual los datos de la estación El Dorado presentan un flujo más bajo debido a la alta nubosidad que se obtuvo con Aermet. Sin embargo, los datos presentan una correlación moderada (figura 4).

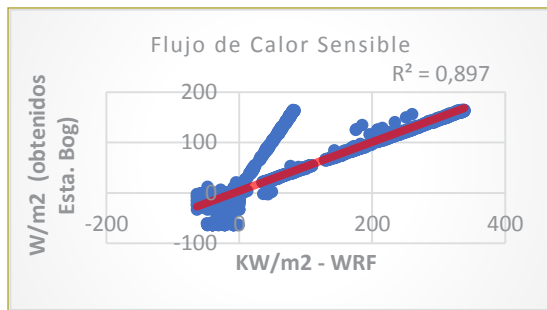


Figura 4. Comparación de valores de flujo de calor sensible.

En la rosa de vientos de la estación Las Ferias⁴ se puede observar que la dirección predominante del viento corresponde a la dirección E y a la dirección NE, con velocidades predominantes entre 2,1 y 3,6 m/s y entre 0,5 y 2,1 m/s (figura 5), mientras que en la rosa de vientos obtenida con WRF se puede observar que los vientos provienen del ESE, SE y NE, con velocidades entre 3,6 y 5,7 m/s y entre 2,1 y 3,6 m/s (figura 6).

Al comparar los datos con la rosa de vientos del aeropuerto El Dorado (figura 7), se pueden observar similitudes en la dirección y velocidad del viento respecto a las rosas de viento generadas con las dos fuentes de datos. Cabe anotar que las rosas de vientos generadas corresponden al año 2015, mientras que la rosa de vientos del aeropuerto se genera a partir de datos multianuales.

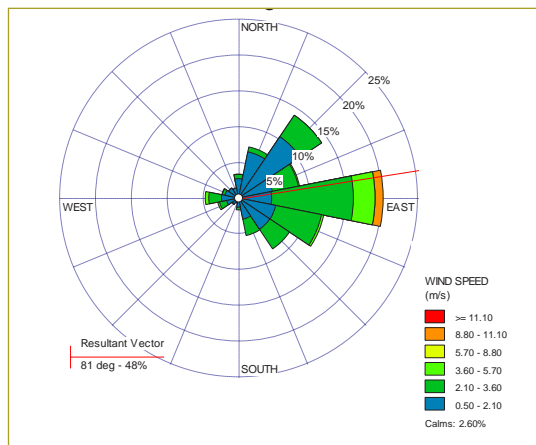


Figura 5. Rosa de vientos obtenida con estaciones Bogotá.

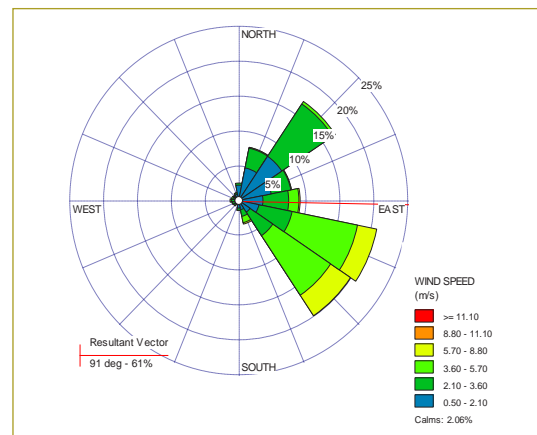


Figura 6. Rosa de vientos obtenida con WRF.

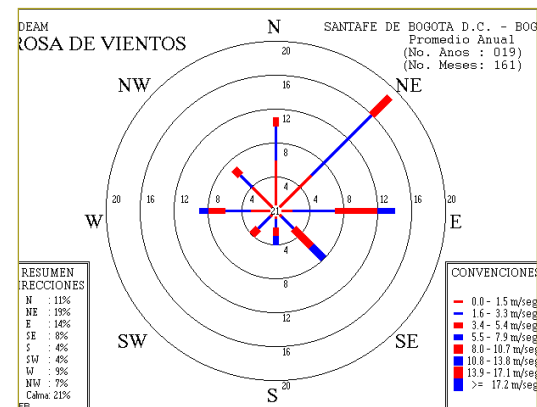


Figura 7. Rosa de vientos aeropuerto El Dorado. Fuente: Ideam, 2016.

Para la altura de la capa límite convectiva se puede observar una correlación baja. Con los datos de WRF se presenta una variación de la capa de 0 a 2433 m, y con la fuente de datos del aeropuerto El Dorado esta capa se calculó entre 0 y 2101 m (figura 8).

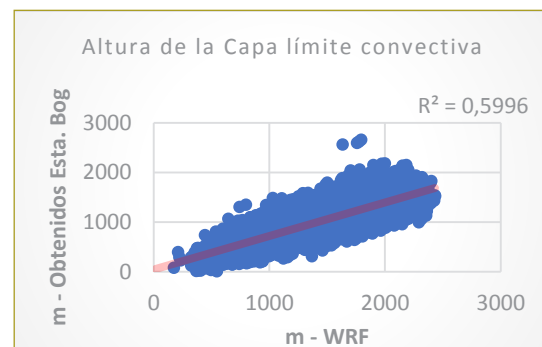


Figura 8. Comparación de valores de altura capa límite convectiva.

- La estación Las Ferias es administrada por la Secretaría de Ambiente de Bogotá. En esta estación se obtuvieron datos horarios de velocidad y dirección del viento, pero se encuentra a 7 km de distancia del aeropuerto.

Los resultados obtenidos para la altura de la capa límite mecánica presentan una correlación débil y una diferencia alta en el valor promedio de esta capa. En ambas fuentes de datos se puede observar que existe una variación entre 0 y 4000 m, sin embargo, el valor promedio de esta capa generada a partir de la fuente de datos de las estaciones de Bogotá se puede observar que está 412 m por debajo respecto a la obtenida con WRF (Figura 9).

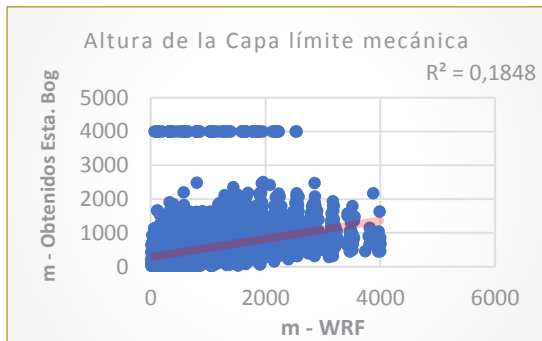


Figura 9. Comparación de valores de altura capa límite mecánica.

Caso hipotético de modelación en la ciudad de Bogotá

Para la modelación de PM10 se utilizaron tres tipos de fuentes de emisión. Una fuente fija puntual (chimenea), una fuente lineal de área (vía) y una fuente de área (acopio), en la que se simula la operación de un proyecto termoeléctrico.

Con el fin de determinar la mejor grilla de modelación, se efectuó un análisis de sensibilidad para identificar la variabilidad de las concentraciones de PM10 en un perfil establecido para diferentes espaciamientos de grilla, esto es, cada 100, 150, 200, 250, 300, 400 y 500 m de distancia.

La comparación se realizó a partir de un perfil de concentraciones PM10 24 horas (figura 10) y PM10 anual (figura 11), en sentido este-oeste, entre las coordenadas X1: 596.047,8 Y1: 521522,8 y X2: 588878,2 Y2: 521532,1. En este perfil se obtuvieron 73 puntos de concentración de PM10 en una longitud de 7169,6 m.

Entre la grilla de 100 y 250 m se observa una menor variabilidad de los resultados obtenidos, por lo que se escoge la grilla con espaciamiento de 250 m para efectuar la modelación con los datos meteorológicos de las dos fuentes en estudio. Con esta grilla se logran menores tiempos de modelación (alrededor de 45 min)

en comparación con la grilla de 100 m, donde los tiempos de modelación son de más de 4 horas.

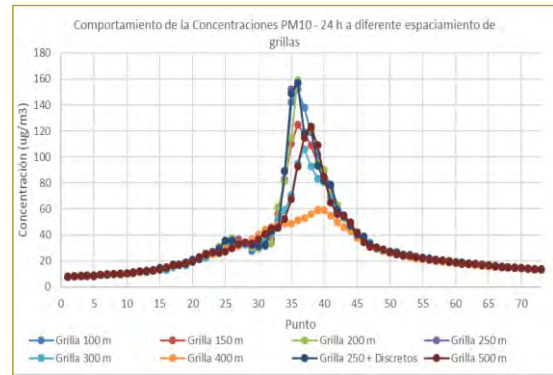


Figura 10. Comportamiento de las concentraciones de PM10 24 h a diferentes espaciamientos de grilla.

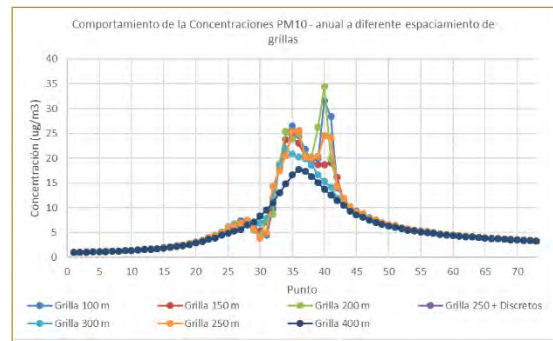


Figura 11. Comportamiento de las concentraciones de PM10 anual a diferentes espaciamientos de grilla.

Comparación de los resultados del modelo de dispersión de PM10, con información meteorológica construida y obtenida de WRF

Los resultados obtenidos se compararon en el mismo perfil de concentraciones.

Para PM10 24 horas se puede observar una gran diferencia en las concentraciones máximas, las cuales se localizan cerca de las fuentes de emisión. Con la información construida a partir de la metodología propuesta, en el perfil en evaluación se obtiene un valor máximo de 156 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que con la información proveniente de WRF se alcanza un valor máximo de 65,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; esto quiere decir que con la metodología propuesta las concentraciones máximas se incrementan 236 %. Las demás concentraciones son muy similares a medida que se alejan de la fuente de emisión (figura 12).

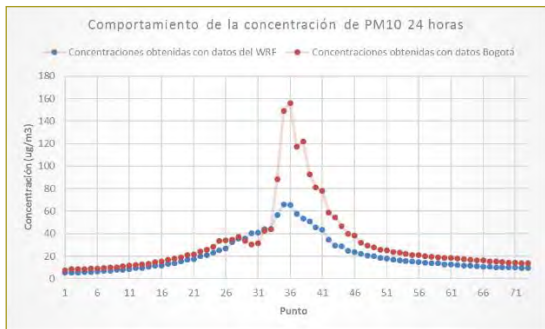


Figura 12. Comparación del comportamiento de las concentraciones de PM10 24 h entre las dos fuentes de estudio.

En los resultados anuales es posible observar que las concentraciones alcanzadas son muy similares para las dos fuentes de datos. En esta oportunidad, el valor máximo se obtiene con los datos de WRF, pero éstos se encuentran 11 % por encima del valor máximo conseguido con el método propuesto, mientras que en las concentraciones bajas del perfil se observa que los valores obtenidos a partir del método propuesto están por encima de los valores obtenidos con WRF.

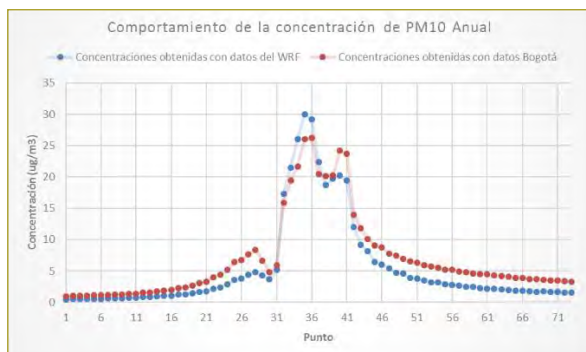


Figura 13. Comparación del comportamiento de las concentraciones de PM10 anual entre las dos fuentes de estudio.

En cuando a la distribución geográfica de las isoplethas, en los resultados obtenidos con datos de estaciones de Bogotá (figura 14) se observa una dispersión en todas las direcciones, con mayor amplitud en la isoplethas de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en la dirección W, seguida de la isoplethas de $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en las direcciones W y SW. Las isoplethas entre 20 y $167 \mu\text{g}/\text{m}^3$ se localizan muy cerca de las fuentes de emisión, con una menor cobertura.

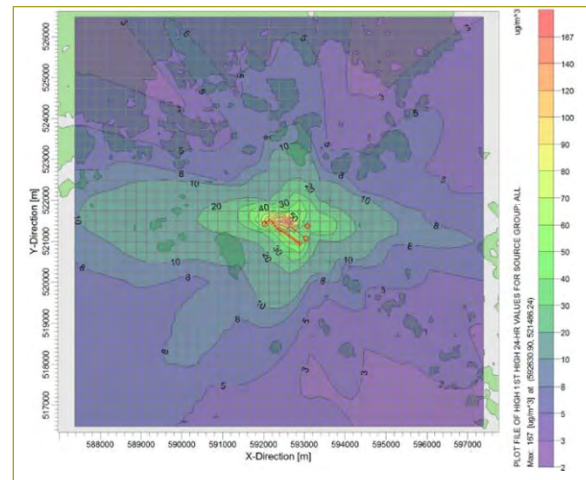


Figura 14. Pluma de dispersión – PM10 24 horas con datos de estaciones de Bogotá.

En los resultados de las concentraciones obtenidas con WRF (figura 15) se observa una mayor amplitud de la isoplethas de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en la dirección SSW y en menor proporción en la dirección W. También se puede observar que hay dispersión en todos los sentidos. En este caso, las concentraciones máximas llegan a $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

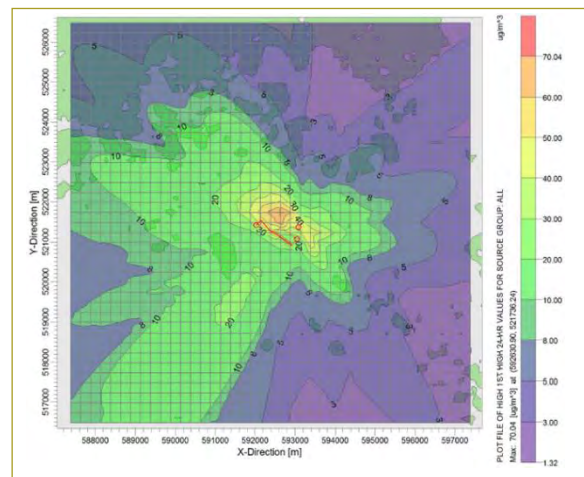


Figura 15. Pluma de dispersión – PM10 24 horas con datos de WRF.

Respecto a las concentraciones de PM10 anual se puede observar que existe una mayor uniformidad en los resultados obtenidos, tanto en la forma de las isoplethas como en los niveles de concentración conseguidos para las fuentes de datos meteorológicos.

El cono de dispersión generado con los datos de estaciones de Bogotá tiene una dirección predominante W (figura 16), mientras que la pluma de dispersión

generada con WRF tiene una dirección predominante WNW (figura 17). No obstante, en este caso las concentraciones máximas anuales son mayores con la fuente de datos de WRF.

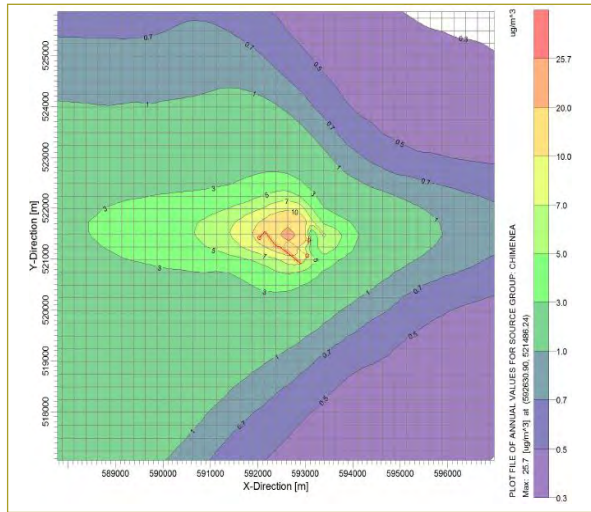


Figura 16. Pluma de dispersión – PM10 anual con datos de estaciones de Bogotá.

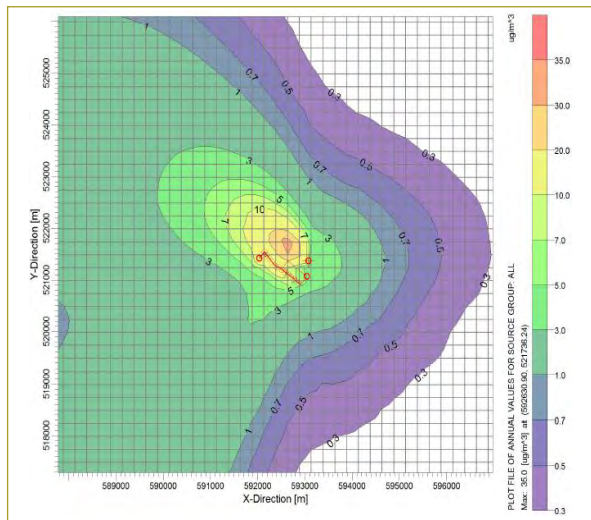


Figura 17. Pluma de dispersión – PM10 anual con datos de WRF.

La principal diferencia en los resultados del modelo para PM10 se produjo en los valores máximos obtenidos para la exposición de 24 horas y en la distribución espacial de las isoplethas. Las concentraciones máximas obtenidas con los datos de las estaciones de Bogotá superaron en más del doble a las concentraciones máximas obtenidas con los datos de WRF. Sin embargo, a medida que se alejaban de las fuentes de emisión las

concentraciones disminuían y guardaban cierta similitud en su comportamiento con variaciones entre las concentraciones de alrededor de un 30 %. Las diferencias se pueden atribuir a la nubosidad, puesto que fue la variable con menor correlación, y la variable que puede incidir en los efectos de la radiación solar y la altura de la capa límite. Lo anterior se debe a que la nubosidad fue mucho mayor en los datos construidos que en los obtenidos con WRF.

CONCLUSIONES

Se lograron construir los archivos meteorológicos a partir de la información horaria de temperatura, humedad relativa y nubosidad reportada por el Ideam, completando los datos faltantes mediante el método de interpolación lineal entre las 7 y las 13 horas, entre las 13 y 19 horas y entre las 19 y 7 horas del día siguiente. Sin embargo, la interpolación lineal no es una metodología que asegure la obtención de datos de acuerdo con el comportamiento de la atmósfera, por lo que sería necesario utilizar modelos estadísticos de predicción para cada variable meteorológica a partir de las series de datos del Ideam. Por esto no se puede hacer sustentación estadística de la información utilizada.

Gracias a la información meteorológica levantada y procesada se pudo correr el procesador Aermat y se obtuvieron datos con coeficientes de correlación bajos para temperatura, calor sensible, altura de la capa límite convectiva, humedad relativa y altura de la capa límite mecánica, y no hubo correlación en nubosidad. Sin embargo, no se puede establecer una correlación estadística entre las dos fuentes de datos por la diferencia entre las metodologías de evaluación.

La información meteorológica disponible es incipiente para modelación de dispersión de contaminantes en Colombia por cuanto las estaciones del Ideam no reportan datos de manera horaria, ya que no fueron diseñadas con fines de modelación o seguimiento de la calidad de aire. Por lo anterior, la información de los modelos de pronóstico de clima se sitúa como la mejor fuente de información disponible, cuando no es posible obtener los datos horarios que requiere Aermat.

Se observa una diferencia notable en los resultados de los conos de dispersión de PM10 atribuidos a la diferencia encontrada en la dirección predominante del viento entre las dos fuentes de información utilizadas,

la cual puede estar influenciada por las diferencias en la localización de las estaciones donde se obtuvo la información de velocidad y dirección del viento, ya que se encontraban a 7 km de diferencia.

Con el propósito de disminuir la incertidumbre frente al comportamiento de los conos de dispersión de los contaminantes por la dirección y velocidad del viento, se recomienda efectuar modelaciones con cinco años de información meteorológica horaria de cualquier fuente de datos. No obstante, para obtener confiabilidad en los modelos lo ideal sería utilizar series históricas de 20 años, solución que sería ineficiente por los tiempos de cómputo.

Las desviaciones más altas del modelo con las dos fuentes de datos meteorológicos se generan en las concentraciones máximas de PM10 que se obtienen en cada uno.

La definición del espaciamiento de la grilla de modelación es importante para conocer en cuál de ellas se obtiene la menor variabilidad en la concentración de los contaminantes, con el fin de no subestimar las concentraciones del modelo y conocer y optimizar los tiempos de cómputo que puede tomar cada corrida.

REFERENCIAS

- Ahrens, C. D. (2009). *Meteorology Today: An introduction to weather, climate, and the environment*. Belmont, USA: Brooks/Cole, Cengage Learning.
- Environment Protection Authority Victoria (octubre de 2013). *Construction of input meteorological data files for EPA Victoria's regulatory air pollution model (Aermod)*. Carlton, Australia.
- MAVDT (octubre de 2010). *Protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire. Manual de diseño de sistemas de vigilancia de la calidad del aire*. Bogotá, Colombia.
- Usepa (noviembre de 2004). *User's guide for the Aermod meteorological preprocessor (Aermet)*. Victoria, USA.

Comportamiento ante carga perpendicular al plano de muros de mampostería en concreto, reforzados con barras de FRP

Out-of-plane perpendicular load behavior of concrete masonry walls, reinforced with FRP bars

DANIEL OTÁLORA BARROS¹ - NANCY TORRES CASTELLANOS²

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

2. Doctora en Ciencia y Tecnología de Materiales de la Universidad Nacional de Colombia.

daniel.otalora@mail.escuelaing.edu.co - nancy.torres@escuelaing.edu.co

Recibido: 02/02/2019 Aceptado: 20/02/2019

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

Resumen

Se planteó un programa experimental para evaluar la capacidad ante cargas perpendiculares al plano de muros de mampostería reforzados internamente con barras de polímeros reforzados con Fiber Reinforced Polymer (FRP), con el fin de generar un protocolo de diseño preliminar para evaluar la capacidad teórica de dichos muros, tomando como base los requisitos especificados en el ACI 440.1R-15 y el TMS 402-16. Dentro del programa experimental, se construyeron y ensayaron catorce muros reforzados internamente con barras de FRP y dos muros reforzados con acero convencional. Se midieron deformaciones unitarias en las barras de refuerzo mediante deformímetros electrónicos e igualmente se registraron las deflexiones en la mitad de la altura de los especímenes mediante transformadores diferenciales lineales variables. Los muros reforzados con FRP, al ser sometidos a su máxima capacidad, presentaron un comportamiento de deflexiones elásticas y parcialmente recuperables hasta la falla; tienen la ventaja de que se pueden reparar debido a que su material de refuerzo carecía de una zona de plasticidad. El modo de falla presentado en los muros reforzados con FRP fue por aplastamiento en la mampostería, coincidiendo con la falla teórica esperada.

Palabras claves: mampostería, fibras reforzadas con polímeros (FRP), carga perpendicular al plano.

Abstract

A program was proposed to evaluate the capacity of loads perpendicular to the plane of masonry walls internally reinforced with FRP bars, to generate a preliminary design protocol to evaluate the theoretical capacity of these walls, based on the requirements specified in: ACI 440.1R-15 and TMS 402-16. Within the experimental program, 14 walls reinforced with FRP and two walls reinforced with conventional steel were constructed and tested. Unit deformations were measured on the reinforcing bars and walls by gauges and the deflections were recorded at half the height of the specimens by LVDT. FRP-reinforced walls, submitted to their maximum capacity presented a behavior of elastic deflections and partially recoverable until the fault. They have the advantage of being able to be repaired, because its reinforcing material does not show a zone of plasticity. The failure mode presented in the reinforced walls with FRP was by masonry crushing, coinciding with the expected theoretical failure.

Keywords: masonry, fiber reinforced polymer (FRP), out of plane load behavior.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, ni el título C ni el título D del Reglamento Colombiano de Construcciones Sismo Resistentes NSR-10 cubren los diseños de concreto ni de muros de mampostería utilizando como refuerzo interno los FRP; sin embargo, dadas las ventajas que presentan estos materiales en varios países se ha propagado su empleo para el reforzamiento de algunos tipos de estructuras.

El uso de los FRP ya está normalizado en países como Canadá con el CAN/CSA S806 y en Estados Unidos con el comité ACI 440, donde se han desarrollado guías para su uso, entre ellas la ACI 440.1R-15, la cual tuvo su primera edición en el año 2002, y posteriormente se realizaron actualizaciones en el 2008 y el 2015; esta guía cubre el diseño de elementos de concreto reforzados con barras de FRP y es parte fundamental en el desarrollo de la presente investigación.

En Colombia, es frecuente el uso de la mampostería estructural para satisfacer las necesidades de la población, principalmente en edificaciones habitacionales, en muros de cerramiento, en muros de sótanos y en muros de contención. En el ámbito internacional no se encuentra información sobre el diseño de muros de mampostería reforzados con barras de FRP para estructuras nuevas, y dados los beneficios que presenta en lo que se refiere a baja densidad del material, alta relación entre su esfuerzo resistente y peso, alta resistencia a la corrosión, baja conducción térmica, nulo magnetismo, transparencia a las ondas de radar, aislantes, poco mantenimiento requerido, gran durabilidad y alta resistencia al impacto, este material se puede utilizar idealmente en plantas de procesos químicos, plantas de tratamiento de aguas residuales, instalaciones petroquímicas, plantas nucleares, instalaciones con equipos de resonancia magnética y estructuras en general que estén expuestas a agentes corrosivos.

En razón de estas múltiples ventajas, se evidenció la pertinencia de estudiar el comportamiento de muros de mampostería reforzados internamente con barras de FRP; por lo tanto, en la Escuela Colombiana de Ingeniería se planteó un programa experimental macro, donde inicialmente se evaluó el comportamiento de mampostería en concreto reforzada con barras de FRP (vidrio GFRP y carbono CFRP) para estructuras nuevas, ante cargas perpendiculares al plano.

PROGRAMA EXPERIMENTAL

Para evaluar la capacidad de la mampostería ante estas solicitaciones, se realizó una aproximación con los requisitos de los códigos estadounidenses de diseño:

- TMS 402-16, para diseño y construcción de estructuras en mampostería, publicado por The Masonry Society y designado anteriormente como ACI 530.
- ACI 440.1R-15, para diseño y construcción de concreto reforzado con barras de FRP.

Los resultados obtenidos analíticamente se compararon con los resultados experimentales, para lo cual se ensayaron con diferentes cuantías de refuerzo, siete muros de mampostería en concreto reforzados con CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*) siete muros reforzados con GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymer*) y dos muros reforzados con barras de acero convencionales, cuya capacidad era igual a la presentada por el muro tipo 1, para un total de 16 muros. La longitud de los muros varió desde 1,0 m hasta 1,8 m, con cuantías del 0,13 al 0,45 %. Se utilizó un diámetro de 12,7 milímetros para las barras de GFRP y CFRP, y la denominación de las barras de acero fue la barra #4. Más adelante se presenta la disposición en planta de los muros, así como también las dimensiones y la ubicación de las barras de refuerzo (figura 1).

CÁLCULO DE CAPACIDAD RESISTENTE DE MUROS

Debido a la ausencia de un código de análisis y diseño para mampostería de concreto reforzada con FRP, para el cálculo analítico de la cuantía, la cuantía balanceada, el modo de falla esperado, la deformación unitaria en las barras, el momento resistente nominal, la carga de falla, el momento de agrietamiento y las deflexiones máximas en el muro, se siguieron las recomendaciones estipuladas en el ACI 440.1R-15, en tanto que las ecuaciones propuestas en el TMS 402-16 se siguieron para el cálculo de las propiedades de la mampostería.

Se realizó un programa de caracterización para conocer las propiedades de los materiales que conformaron los muros de mampostería reforzados con FRP se obtuvieron los siguientes resultados:

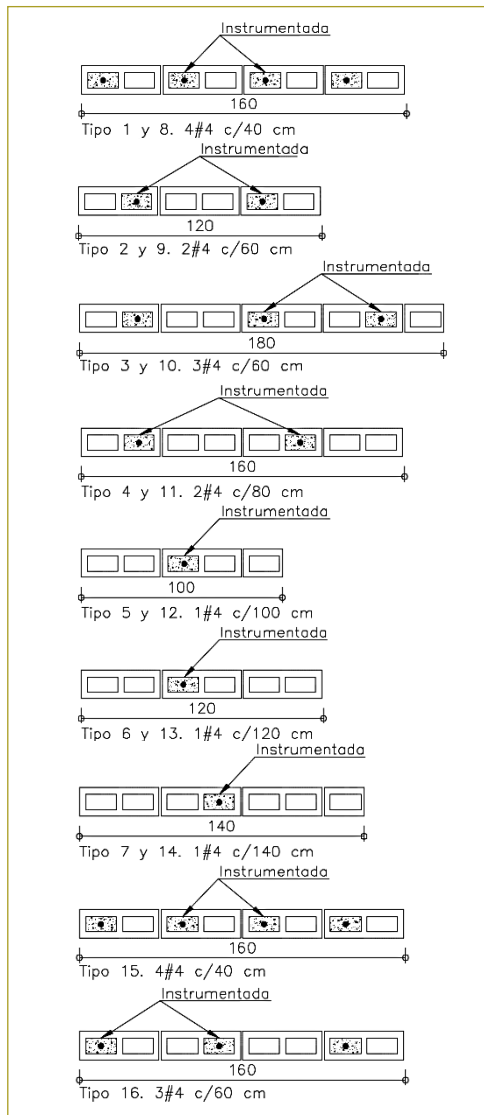


Figura 1. Configuración del refuerzo de los muros.

Fuente: Elaboración del autor.

• Mortero de pega	f'_c	23,0	MPa
• Mortero de relleno	f'_{cp}	29,6	MPa
• Mampostería en concreto	f'_m	10,0	MPa
• Barras GFRP	f_{fu}	916	MPa
• Barras CFRP	f_{fu}	2300	MPa

Para predecir el modo de falla, se procedió a revisar si la cuantía dispuesta en cada muro era mayor que la cuantía balanceada para determinar si la falla que se presentaba era por aplastamiento en la mampostería o por fluencia en las barras de refuerzo. Se calculó como se indica en la ecuación 1 y la ecuación 2.

$$\rho_b = (\alpha_1) \left(\frac{f'_m}{F_{fu}} \right) (\beta_1) \left(\frac{\epsilon_{mu}}{\epsilon_{mu} + \epsilon_{fu}} \right) \quad (1)$$

$$\rho = \frac{A_f}{(b)(d)} \quad (2)$$

Se calculó analíticamente la deformación unitaria en las barras de refuerzo mediante la ecuación 3.

$$\epsilon_f = \frac{(d-c)(\epsilon_{mu})}{c} \quad (3)$$

Se calcularon analíticamente las capacidades de los muros – momento nominal – sometidos a cargas perpendiculares al plano mediante la ecuación 4.

$$Mn = (\alpha_1)(f'_m)(b)(\beta_1)(c) \left\{ d - \left[(\beta_1) \left(\frac{c}{2} \right) \right] \right\} \quad (4)$$

Se calculó analíticamente la deflexión máxima del muro mediante la ecuación 5.

$$\delta = \left(\frac{(23)(M_{cr})(L^2)}{(216)(E_m)(I_g)} \right) + \left(\frac{(23)(M_n - M_{cr})(L^2)}{(216)(E_m)(I_{cr})} \right) \quad (5)$$

Donde: $\alpha_1 = 0,8$, $\beta_1 = 0,8$, f'_m la resistencia a la compresión de la mampostería, F_{fu} la resistencia a la rotura de las barras de FRP, ϵ_{mu} la deformación unitaria de la mampostería, ϵ_{fu} la deformación unitaria de las barras de FRP, A_f el área de refuerzo, b el ancho del muro, d la distancia del eje de la barra a la fibra extrema en compresión del muro, c la profundidad eje neutro del muro, M_{cr} el momento de agrietamiento del muro, L el alto del muro, E_m el módulo de elasticidad de la mampostería, I_g la inercia bruta del muro e I_{cr} la inercia agrietada del muro.

En la tabla siguiente se muestran los resultados de la cuantía, la cuantía balanceada, la deformación unitaria de las barras de refuerzo, la deflexión en el centro vertical del muro y el momento nominal resistente (tabla 1).

Después de los análisis, se puede predecir que el modo de falla es por aplastamiento en la mampostería.

Una vez evaluadas las capacidades teóricas de los muros, se preparó el protocolo de ensayo, el cual se aplicó en cuatro etapas para ensayar cada muro y llevarlo en la etapa final hasta la falla. La base del protocolo fue

la carga máxima estimada y se aplicó en las siguientes cinco etapas:

1. Cargar el muro al 20 % de su resistencia admisible.
2. Descargar el muro al 5 % de su resistencia admisible.
3. Cargar el muro al 40 % de su resistencia admisible.
4. Descargar el muro al 5 % de su resistencia admisible.
5. Cargar el muro al 80 % de su resistencia admisible.
6. Descargar el muro al 5 % de su resistencia admisible.
7. Cargar el muro hasta llegar a la falla.

Tabla 1
Capacidades teóricas de los muros

Muro	A_f (mm ²)	ρ	ρ_b	ε_f (%)	δ (mm)	M_n (kN m)
Tipo 1	507	0,0045	0,0010	0,66	34,3	12,3
Tipo 2	253	0,0030	0,0010	0,83	44,3	7,9
Tipo 3	380	0,0030	0,0010	0,83	41,6	11,8
Tipo 4	253	0,0023	0,0010	0,98	48,9	9,4
Tipo 5	127	0,0018	0,0010	1,11	56,9	5,3
Tipo 6	127	0,0015	0,0010	1,23	60,5	5,9
Tipo 7	127	0,0013	0,0010	1,33	63,7	6,5
Tipo 8	507	0,0045	0,0003	0,42	26,1	16,0
Tipo 9	253	0,0030	0,0003	0,53	33,0	10,5
Tipo 10	380	0,0030	0,0003	0,53	31,6	15,7
Tipo 11	253	0,0023	0,0003	0,63	36,9	12,6
Tipo 12	127	0,0018	0,0003	0,72	42,3	7,3
Tipo 13	127	0,0015	0,0003	0,79	45,5	8,1
Tipo 14	127	0,0013	0,0003	0,87	48,3	8,9

Fuente: Elaboración del autor.

Siguiendo el protocolo de carga, se hicieron los ensayos a cada uno de los muros.

Posteriormente, con el fin de generar un circuito cerrado de reacción para someter los muros a flexión perpendicular al plano en su posición vertical, se usó el pórtico del actuador dinámico de la Escuela para reaccionar contra éste, un gato hidráulico de 100 kN que empujó dos vigas, simulando las cargas en los tercios de los muros de ensayo, contra un marco de soporte de los muros, el cual consistió en una estructura ensamblada con perfiles metálicos que se sujetaban por medio de barras de 1^{1/2}" al pórtico del actuador dinámico (foto 1).

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

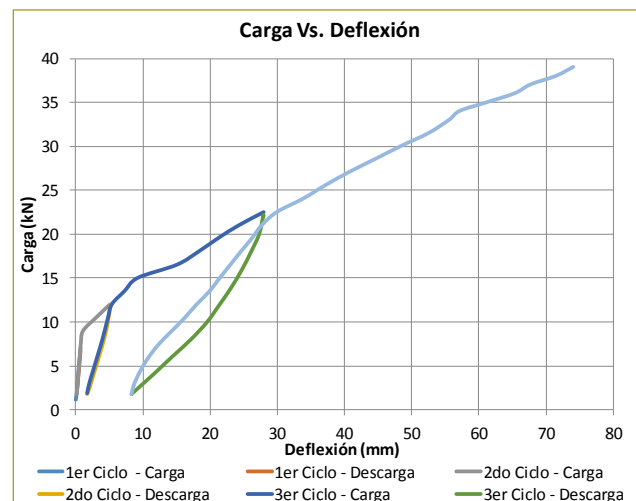
A modo de ejemplo, en la gráfica siguiente se presenta la curva de Carga vs. deflexión en el centro de la altura,



Foto 1. Vista general del montaje.

Fuente: Elaboración del autor.

obtenidos para el muro tipo 1, graficados para cada ciclo de carga y descarga. Como se puede observar, después de la descarga de cada uno de los ciclos el muro tendía a volver a su posición inicial, mostrando su comportamiento elástico. Así mismo, se evidencia que la curva tiene dos pendientes: la primera termina en el punto donde la mampostería se agrieta en la zona a compresión del muro y la segunda pendiente continúa lineal hasta la falla (gráfica 1).

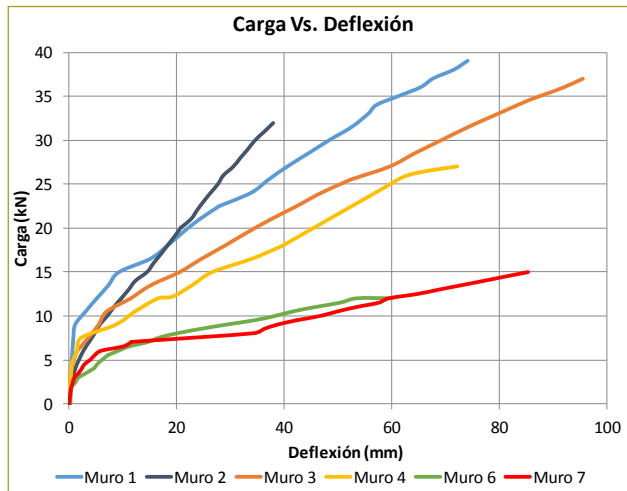


Gráfica 1. Carga vs. deflexión típica.

Fuente: Elaboración del autor.

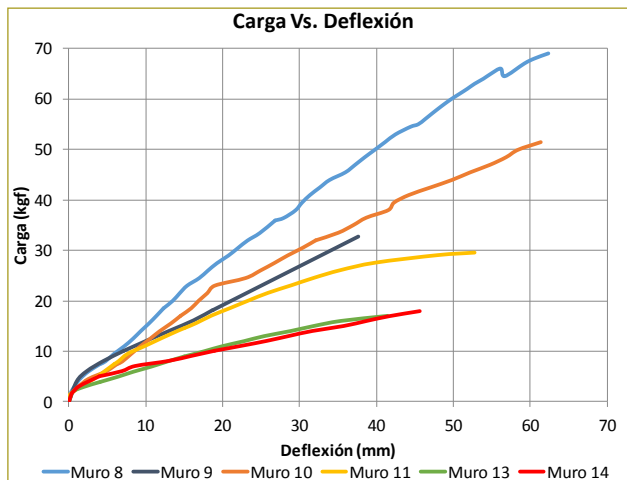
A continuación se muestran las envolventes de las curvas de carga vs. deflexión para cada uno de los muros, obtenidas de los ensayos de laboratorio. En las gráficas siguientes se muestran las curvas de los muros

reforzados con GFRP y CFRP, respectivamente. El comportamiento fue el esperado; después de presentarse los agrietamientos las pendientes de las curvas continúan constantes, debido a que las barras de refuerzo permanecen en su zona elástica hasta la falla; no se evidencia plastificación (gráficas 2 y 3).



Gráfica 2. Carga vs. deflexión en muros GFRP.

Fuente: Elaboración del autor.



Gráfica 3. Carga vs. deflexión en muros CFRP.

Fuente: Elaboración del autor.

A continuación se presenta el resumen de los resultados obtenidos de los ensayos para cada uno de los muros en estudio; las deformaciones experimentales en las barras de refuerzo se consiguieron de las lecturas de los deformímetros electrónicos (tabla 2).

Tabla 2
Resultados de los ensayos

Muro	A_f (mm ²)	ρ	ρ_b	ϵ_f (%)	δ (mm)	M_n (kN m)
Tipo 1	507	0,0045	0,0010	0,66	74,1	13,2
Tipo 2	253	0,0030	0,0010	0,83	37,9	10,8
Tipo 3	380	0,0030	0,0010	0,83	95,5	12,5
Tipo 4	253	0,0023	0,0010	0,98	72,2	9,1
Tipo 6	127	0,0015	0,0010	1,23	53,5	4,1
Tipo 7	127	0,0013	0,0010	1,33	97,2	5,1
Tipo 8	507	0,0045	0,0003	0,42	62,3	23,3
Tipo 9	253	0,0030	0,0003	0,53	37,7	11,1
Tipo 10	380	0,0030	0,0003	0,53	61,4	17,4
Tipo 11	253	0,0023	0,0003	0,63	52,8	10,0
Tipo 13	127	0,0015	0,0003	0,79	41,4	5,8
Tipo 14	127	0,0013	0,0003	0,87	41,1	6,1

Fuente: Elaboración del autor.

El modo típico de falla para los muros reforzados con FRP, tal como se esperaba, fue por aplastamiento en la mampostería (foto 1).



Foto 2. Aplastamiento en la mampostería.

Fuente: Elaboración del autor.

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En la tabla siguiente se comparan, por medio de una relación, los momentos máximos teóricos y los momentos máximos experimentales de los muros; los resultados ideales son aquellos en los cuales los momentos máximos experimentales son mayores que los momentos máximos teóricos.

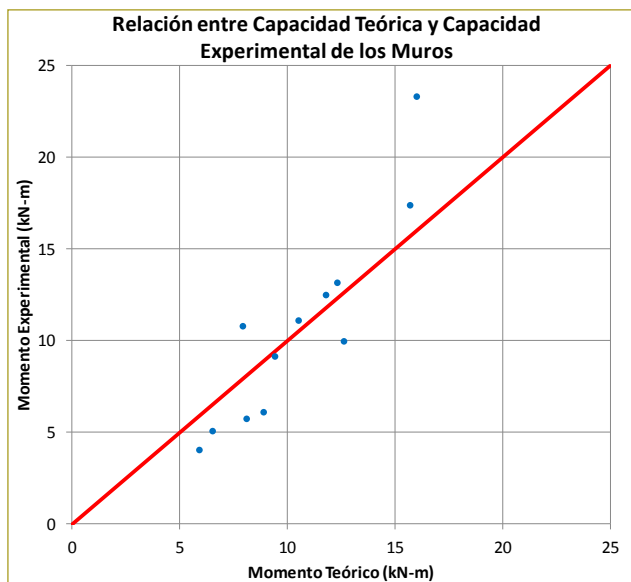
Tabla 3

Relación entre capacidad teórica y capacidad experimental

Muro	Longitud (cm)	Núm.	Tipo de refuerzo	M_{exp} (kN-m)	M_{teo} (kN-m)	M_{teo}/M_{exp}	P_{falla} (kN)
Tipo 1	160	4#4	G	13,2	12,3	0,93	39,0
Tipo 2	120	2#4	G	10,8	7,9	0,73	32,0
Tipo 3	180	3#4	G	12,5	11,8	0,94	37,0
Tipo 4	160	2#4	G	9,1	9,4	1,03	27,0
Tipo 6	120	1#4	G	4,1	5,9	1,45	12,0
Tipo 7	140	1#4	G	5,1	6,5	1,28	15,0
Tipo 8	160	4#4	C	23,3	16,0	0,69	69,0
Tipo 9	120	2#4	C	11,1	10,5	0,95	32,8
Tipo 10	180	3#4	C	17,4	15,7	0,9	51,5
Tipo 11	160	2#4	C	10,0	12,6	1,26	29,5
Tipo 13	120	1#4	C	5,8	8,1	1,41	17,0
Tipo 14	140	1#4	C	6,1	8,9	1,46	18,0

Fuente: Elaboración del autor.

Hubo seis muros en los cuales la relación entre momento, teórico y experimental fue mayor que 1.0; esos muros fueron los de menor cuantía de refuerzo y mayores separaciones entre barras. Tales resultados se hacen más evidentes gráficamente (gráfica 1), para cada uno de los muros en estudio; en las ordenadas se ubican los momentos experimentales y en las abscisas, los momentos teóricos.

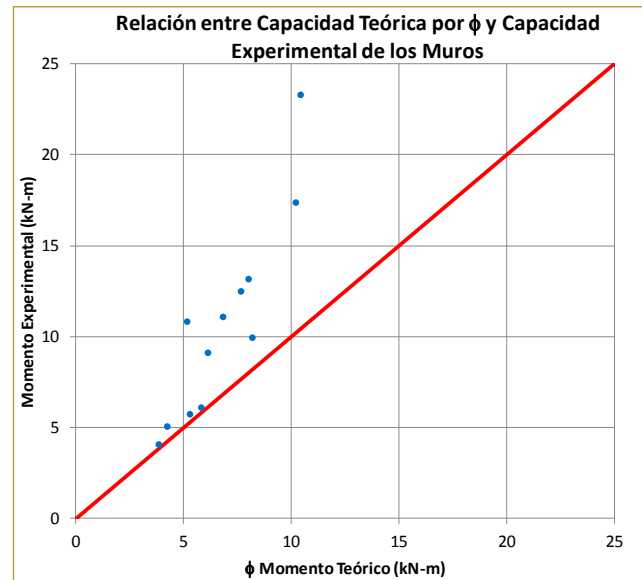


Gráfica 4. Relación entre capacidad teórica y capacidad experimental de los muros.

Fuente: Elaboración del autor.

Para cumplir con las relaciones entre momento teórico y momento experimental, es evidente que debe existir un límite mínimo de la cuantía de refuerzo y de separación de barras.

El modo de falla esperado en los resultados teóricos era el aplastamiento de la mampostería, que coincidió con el obtenido experimentalmente; por lo tanto, se aplicó el factor de reducción ϕ de 0,65 a la capacidad nominal a flexión, de acuerdo con lo estipulado en el ACI 440.1R-15. A continuación se muestran los resultados de los momentos máximos experimentales y los momentos máximos teóricos, afectando estos últimos por el factor ϕ (gráfica 5).



Gráfica 5. Relación entre capacidad teórica por ϕ y capacidad experimental de los muros.

Fuente: Elaboración del autor.

Una vez afectado el valor del momento máximo teórico por el factor ϕ calculado, todos los resultados se encuentran por encima de la línea roja, lo que significa que el momento máximo experimental es mayor que el momento máximo teórico.

A renglón seguido se comparan, por medio de una relación, las deformaciones unitarias teóricas y las deformaciones unitarias experimentales, registradas en las barras de refuerzo (tabla 4):

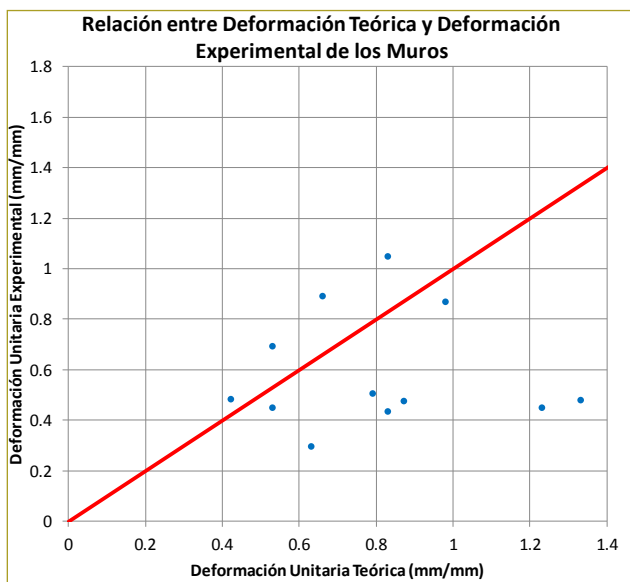
Tabla 4
Relación entre deformación teórica y deformación experimental

Muro	Longitud (cm)	Núm.	Tipo de refuerzo	$\varepsilon_{f_{exp}}^f$ (%)	$\varepsilon_{f_{teo}}^f$ (%)	$\frac{\varepsilon_{f_{teo}}^f}{\varepsilon_{f_{exp}}^f}$
Tipo 1	160	4#4	G	0,89	0,66	0,74
Tipo 2	120	2#4	G	0,44	0,83	1,9
Tipo 3	180	3#4	G	1,05	0,83	0,79
Tipo 4	160	2#4	G	0,87	0,98	1,13
Tipo 6	120	1#4	G	0,45	1,23	2,72
Tipo 7	140	1#4	G	0,48	1,33	2,77
Tipo 8	160	4#4	C	0,48	0,42	0,87
Tipo 9	120	2#4	C	0,45	0,53	1,18
Tipo 10	180	3#4	C	0,7	0,53	0,76
Tipo 11	160	2#4	C	0,3	0,63	2,12
Tipo 13	120	1#4	C	0,51	0,79	1,56
Tipo 14	140	1#4	C	0,48	0,87	1,83

Fuente: Elaboración del autor.

Con respecto a la comparación de deformaciones máximas (tabla 4), los muros en los cuales la relación entre deformación, teórica y experimental de las barras instrumentadas fue mayor que 1.0 coinciden con los muros de menores cuantías y separaciones entre barras.

A continuación se muestra la relación entre la deformación teórica y la deformación experimental de las barras instrumentadas en los diferentes muros (gráfica 6).



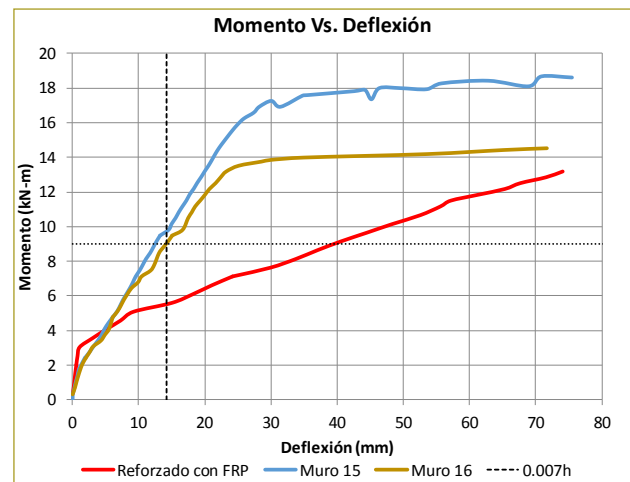
Gráfica 6. Relación entre deformación teórica y deformación experimental de los muros.

Fuente: Elaboración del autor.

Adicionalmente, por su similitud en geometría y cuantías de refuerzo, se compararon los resultados de la gráfica de momentos vs. deflexión, del muro tipo 15 y el muro tipo 16 reforzado con acero, con el muro tipo 1 reforzados con GFRP. El diseño de los muros reforzados con acero es subreforzado, por lo que se esperaba que su falla se presentara por fluencia en el acero de refuerzo. Los modos de falla en ambos muros fue el esperado.

Se pudo observar que para un desplazamiento máximo permitido en la mampostería reforzada con acero de $0,007h = 14,2$ mm, se tiene un momento resistente de 9,0 kN-m. Para este mismo momento, el muro de mampostería de concreto reforzada con GFRP permitiría un desplazamiento máximo de $39,7$ mm = $0,020$ h.

Los valores expuestos anteriormente se resumen de la siguiente manera (gráfica 7):



Gráfica 7. Comparación de momento vs. deflexión de muro reforzado con FRP y muros reforzados con acero.

Fuente: Elaboración del autor.

Tal como se observa, los rangos de desplazamientos para los muros reforzados con FRP son mayores que los rangos para los muros reforzados con acero convencional, con la ventaja de que antes de la falla nunca se plastificarán las barras de refuerzo, y si hay fallas en las piezas de mampostería, éstas se podrán reparar.

Se podría decir que los desplazamientos admisibles para los muros de mampostería en concreto reforzados con FRP podrían ser mayores que los calculados de $0,014$ h, y llevarlos aproximadamente a $0,030$ h; sin embargo, los datos de esta investigación aún no son suficientes para sustentar tales aseveraciones y se dejarán como recomendación para futuras investigaciones (gráfica 6).

CONCLUSIONES

Los muros ensayados y presentados en esta investigación tuvieron un comportamiento monolítico entre sus componentes: mortero de pega, mortero de relleno, refuerzo y mampostería.

En todos los muros ensayados, debido a que la cuantía de refuerzo fue mayor que la cuantía balanceada, el modo predominante de falla fue por aplastamiento en la mampostería. No obstante, se deben realizar más investigaciones para poder especificar una cuantía de refuerzo mínima y una separación entre barras máxima para que este modo de falla prevalezca.

Debido a que las cargas de agrietamiento para los muros reforzados con CRFP fueron menores que las cargas de agrietamiento de los muros reforzados con GFRP, es aconsejable reforzar los muros con GFRP. Lo recomendable es no llevar los diseños a condiciones de falla, pues al presentarse fisuras por aplastamiento, se pierde adherencia entre la pieza de mampostería y el mortero de relleno que envuelve el refuerzo, por lo que el sistema puede perder la capacidad de trabajar monolíticamente.

Los muros de mampostería reforzados con FRP se pueden reparar si sufren daños en las piezas de mampostería por cargas que les generen efectos de flexión; debido a que las deflexiones no son permanentes porque su material de refuerzo no tiene una zona de plasticidad, su comportamiento es elástico hasta la falla.

Se tuvo una buena aproximación de las capacidades calculadas experimentalmente por medio de los ensayos en el laboratorio con las calculadas teóricamente, basadas en los códigos TMS 402-16 y ACI 440.1R-15.

Los muros reforzados con FRP, comparados con los muros de mampostería reforzados con acero, permiten mayores deflexiones ante cargas de servicio y presentan menores deflexiones residuales.

Agradecimientos

Queremos dar las gracias a la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito; al ingeniero Gustavo Tumialán, asesor de la investigación y miembro del comité ACI 440, y a las empresas Kreato, Hilti, Sika y Sireg por sus materiales.

REFERENCIAS

- Micelli, F., & Nanni, A. (2001). Propiedades mecánicas y de durabilidad de las barras de FRP. Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Missouri y Departamento de Innovación de Ingeniería de la Universidad de Lecce.
- Triwiyono, A. et al. (2015). Resistencia a la flexión y ductilidad de muros de mampostería en concreto reforzados con barras de acero. Yogyakarta, Indonesia: Departamento de Ingeniería Civil y Medioambiental, Universidad de Gadjah Mada.
- Hughes Brothers, Inc. (2002). Anclaje de barras de refuerzo de GFRP para ensayos a tracción. Seward, Nebraska.
- Galati, N., Tumialán, G., & Nanni, A. (2005). Reforzamiento con barras de FRP de mampostería no reforzada sometidos a cargas fuera del plano. Departamento de Ingeniería Civil, Arquitectura y Medio Ambiente de la Universidad de Missouri, junto a Simpson Gumpertz & Heger Inc.
- De la Cruz, C. (2004). Resistencia a la flexión y adherencia en vigas de hormigón armado con barras FRP. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Herrera, A., & Madrid, G. (2003). *Manual de construcción de mampostería de concreto*. Bogotá: Instituto Colombiano de Productores de Cemento.

Análisis y comparación de los resultados de la simulación de flujo de un modelo físico a escala con el modelo numérico utilizado por el software IBER 2D

Analysis and comparison of the results of flow simulation in a scale physical model with the numerical model used by software IBER 2D

DIEGO ANDRÉS GARCÍA MENDIVELSO¹ - HÉCTOR MATAMOROS RODRÍGUEZ²

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

2. Profesor de la Maestría en Ingeniería Civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

diego.garcia@mail.escuelaing.edu.co - hector.matamoros@escuelaing.edu.co

Recibido: 10/02/2019 Aceptado: 22/02/2019

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

Resumen

Ante la imposibilidad de tener registros minuciosos del comportamiento de flujo en una estructura real, ya sea porque físicamente es imposible acceder a los sitios de medición o porque la adquisición de instrumentos o mecanismos que hay que usar suponen un alto costo de inversión, se ha creado en el hombre la necesidad de recurrir a medidas alternativas cuyo beneficio sea similar. Así, la modelación matemática ha empezado a ser el soporte de ecuaciones hidráulicas complejas, las cuales incluyen variables específicas que se pueden analizar para describir un fenómeno en específico. Por lo tanto, en el presente escrito se va a exponer la manera en la que se combinan tanto la modelación matemática como los modelos a escala para recrear la bocatoma de la central hidroeléctrica La Naveta, con el fin de comparar los resultados expresados por un modelo físico a escala elaborado por el Centro de Estudios Hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería, con los resultados obtenidos mediante la modelación bidimensional usando el software IBER 2D.

Al final del ejercicio se evaluarán parámetros y características de flujo que a simple vista son imperceptibles, pero que se pueden analizar a partir de los resultados luego de resolver las ecuaciones bidimensionales de Saint-Venant en toda su dimensión.

Palabras claves: IBER 2D, flujo a superficie libre, modelación bidimensional, calibración de estructuras hidráulicas.

Abstract

Due to the impossibility of obtaining detailed data of flow behavior in a real structure, because it is either physically impossible to access the measuring sites, or because acquiring the necessary tools or mechanisms demands high costs, the need to use alternative measures with similar benefits was born. Hence, mathematical modelling has become the support for complex hydraulic equations, which include specific variables that can be analyzed to describe a particular phenomenon. Therefore, this paper shows the way in which both mathematical modelling as well as scale models are combined to recreate the intake of La Naveta hydro power plant. The purpose is to compare the results obtained from a physical scale model made by the Center for Hydraulic Studies at Escuela Colombiana de Ingeniería with the results of the bidimensional modelling from software IBER 2D.

Finally, flow parameters and characteristics will be assessed; such parameters may seem to be imperceptible at first, but they can be analyzed from the results after completely working out the Saint-Venant bidimensional equations.

Keywords: IBER 2D, free surface flow, bidimensional modelling, hydraulic structure calibration.

INTRODUCCIÓN

Producto de la incertidumbre surgida al estudiar los detalles de cada uno de los fenómenos hidráulicos que se observan en la central hidroeléctrica La Naveta, de las dificultades asociadas a la capacidad máxima de captación y de la necesidad de puesta en funcionamiento para el caudal máximo de diseño, se ha propuesto analizar hidráulicamente una de las tres opciones planteadas para lograr derivar por la bocatoma un caudal de $31 \text{ m}^3/\text{s}$, capaz de generar la máxima capacidad de energía para la cual se diseñó la central.

Por lo anterior, se va a utilizar el *software* de modelación bidimensional IBER 2D para reproducir la bocatoma de la central hidroeléctrica La Naveta y modelar los escenarios de flujo que se producen ante la ampliación de los muros del canal de aducción, con el fin de poder compararlos con los resultados conseguidos con el modelo físico que elaboró el Centro de Estudios Hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería, y establecer conclusiones y recomendaciones frente a su funcionamiento.

El propósito final, una vez que se encuentre calibrado el modelo hidráulico, es representar varios escenarios, los cuales permitan analizar resultados y tomar decisiones frente a situaciones específicas que físicamente no se pueden llevar a cabo.

RESULTADOS

Antes de empezar a mostrar los resultados de los modelos implementados es importante mencionar los siguientes aspectos:

- El *módulo hidrodinámico de IBER* resuelve las ecuaciones de Saint-Venant bidimensionales, incorporando los efectos de la turbulencia y rozamiento superficial por viento, dentro de las cuales todas las funciones y parámetros que aparecen en las ecuaciones hidrodinámicas (incluyendo el coeficiente de Manning y la velocidad del viento) pueden imponerse en forma variable tanto espacial como temporalmente.
- En lo que respecta a las *condiciones de contorno*, IBER es capaz de distinguir entre contornos cerrados (tipo pared) y contornos abiertos, por los cuales entra y sale agua del dominio de cálculo. En los contornos cerrados es posible imponer, bien sea una condición de deslizamiento libre o una condición de

fricción de pared, mientras que en los contornos abiertos se consideran diferentes opciones en función del régimen hidráulico en el contorno (Blade, 2010).

- Por su parte, en los *esquemas numéricos* las ecuaciones de aguas someras y las del módulo de turbulencia $k-\epsilon$ se resuelven mediante el método de volúmenes finitos para mallas bidimensionales no estructuradas, entendiéndose estas mixtas como las formadas por elementos triangulares y rectangulares.
- En cuanto a los modelos de turbulencia, específicamente la *viscosidad turbulenta*, IBER utiliza tres modelos promediados en profundidad: el modelo parabólico, un modelo de longitud de mezcla y el modelo $k-\epsilon$ de Rastogi y Rodi (Rastogi, 1978).

A partir de la introducción anterior, el paso más importante de las características físicas del modelo numérico es la creación de la malla, razón por la cual es clave entender que todas las mallas en IBER están conformadas por elementos (polígonos) planos (no curvos), que se obtienen de discretizar la geometría (la cual puede ser curva en el espacio), de tal manera que las ecuaciones hidráulicas se resuelvan en cada elemento de la malla. Así, en la mayoría de los casos cuanto más fina es la malla, más precisos son los cálculos, porque la malla se parece más a la geometría, pero tanto el tiempo de cálculo como el tamaño de los archivos se incrementan.

Durante el proceso de mallado del presente caso de estudio, antes de llegar la malla definitiva, fue necesario crear varias mallas preliminares, las cuales tuvieron que refinarse en pro de optimizar el tiempo de cálculo y garantizar la estabilidad del modelo. A continuación se muestra el proceso de refinamiento.

$$\Delta t_{CFL} = CFL \frac{\Delta x}{U + \sqrt{g \cdot h}}, \quad \text{con } CFL \leq 1,$$

$$\Delta t_{\text{cálculo}} = \min(\Delta t_{CFL}, \Delta t_{\text{máx}})$$

El detalle permite observar la cantidad de elementos que componen la malla no estructurada, los cuales evidentemente acrecientan el tiempo de cálculo. No obstante, el parámetro definitivo por el cual se descartó esta malla fue la inestabilidad del modelo, ya que no se satisfacía la condición de Courant, con el siguiente análisis:

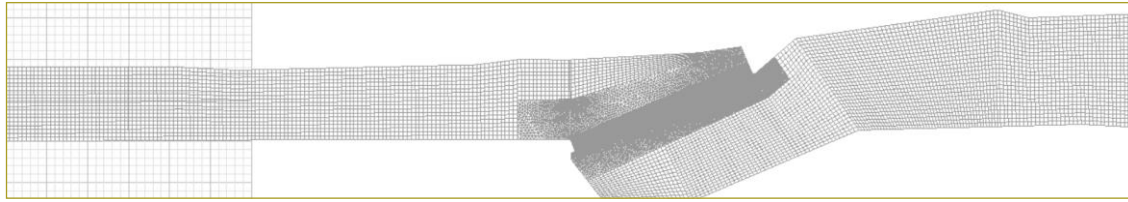


Ilustración 1. Creación de superficies en modelo IBER.

Fuente: Elaborado con IBER 2D.

De la expresión anterior hay parámetros que están dados por las condiciones de frontera, razón por la cual no se pueden modificar, tal como U (*velocidad del agua*), g (*gravedad*) y h (*calado*), pues tanto la velocidad del agua como el calado se irán calculando de acuerdo con el caudal establecido como condición de frontera. CFL es un parámetro que se establece en las opciones de cálculo, el cual claramente puede tomar varios valores que no pueden garantizar la estabilidad o inestabilidad del modelo. De todas las variables, podría jugar con Δt_{CFL} y Δx .

$\Delta t_{\text{cálculo}}$ siempre va a ser el resultado del mínimo valor entre el establecido en los parámetros de tiempo como “incremento de tiempo máximo” y el que resulta del cálculo de la condición CFL: Δt_{CFL} . Finalmente, Δx se pueden modificar para equilibrar el valor de CFL y garantizar la estabilidad del modelo.

Optimización de la malla

Una malla estructurada facilitará los cálculos internamente y permitirá que el tiempo total se reduzca. Por ese motivo, en las zonas donde la geometría lo permitió se optó por una malla estructurada, dejando una no estructurada solamente en aquellos sitios en los cuales la geometría presente forzaba este tipo de superficies. Sin embargo, uno de los problemas principales radicó

en la transición entre la malla estructurada y la no estructurada, ya que los elementos triangulares que estaban en la frontera poseían dimensiones muy pequeñas, lo cual ocasionaba inestabilidad en el modelo numérico, debido a que Δx es una de las variables que tienen mayor sensibilidad numérica para el cálculo del número de Courant.

Con base en las condiciones anteriores se fue perfeccionando la malla optimizando los tamaños de los elementos y, con ello, los tiempos de cálculo y la estabilidad del modelo, sin perder de vista la densidad en las zonas en las cuales se requería un mayor detalle. El resultado de los pasos anteriores y la complejidad de la rejilla se pueden ver más adelante (ilustraciones 2 y 3).

Sensibilidad de los parámetros numéricos

Antes de centrarse en el análisis de los resultados fue de vital importancia tener en cuenta que los parámetros numéricos más influyentes dentro del módulo hidrodinámico fueron Δx y Δt , debido a que son los únicos que se pueden modificar para poder garantizar la estabilidad del modelo según los requisitos dados por la condición CFL. Producto de que Δx y Δt tenían una repercusión diferente en el modelo numérico, fue necesario realizar un análisis de sensibilidad separado para cada uno, de tal

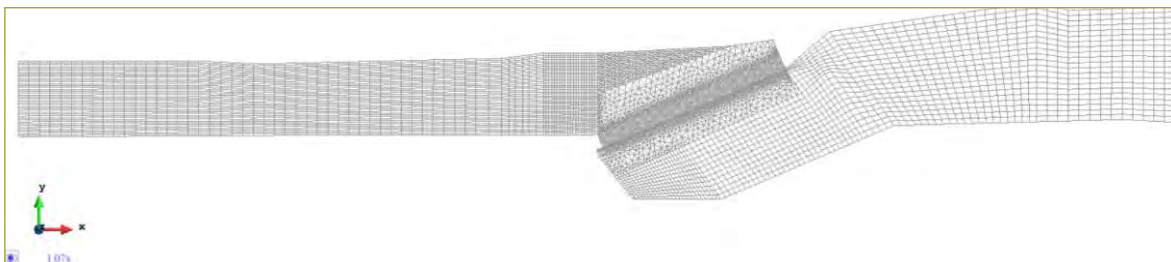


Ilustración 2. Malla optimizada del modelo.

Fuente: Elaborado con IBER 2D.

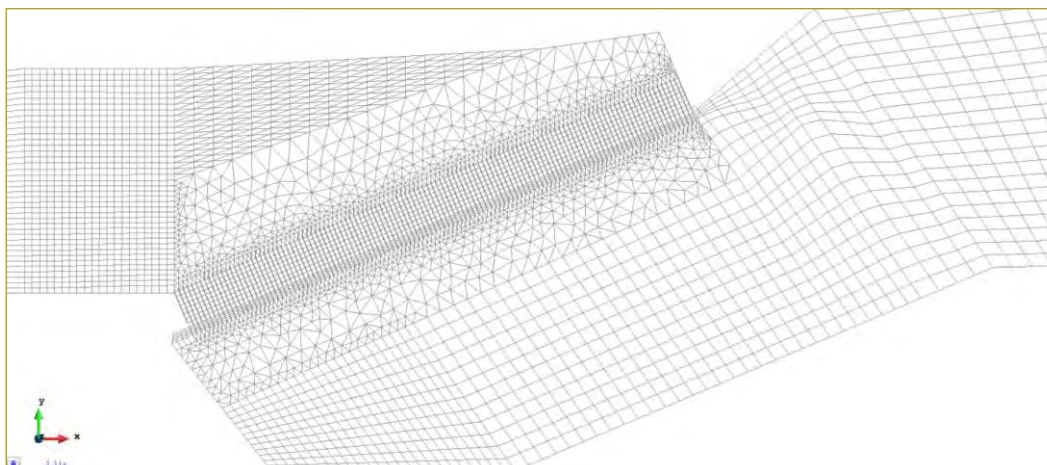


Ilustración 3. Detalle de la malla en la rejilla.

Fuente: Elaborado con IBER 2D.

modo que se pudiera categorizar cuál parámetro avalaría la convergencia del modelo para todos los caudales.

Para ello, se examinó la sensibilidad del modelo al intervalo de tiempo (Δt), mediante corridas con diferentes pasos de tiempo de 5, 10, 15 y 20 segundos. Con este análisis se buscó identificar un valor adecuado del tamaño del intervalo (Δt) para la discretización temporal de las simulaciones, el cual no comprometiera ni la estabilidad ni los resultados del modelo, pero que fuese lo suficientemente significativo para hacer simulaciones en un tiempo computacional aceptable. Del análisis realizado se encontró que para pasos de tiempo superiores a 20 segundos el modelo presentó inestabilidad, lo cual demostró que el paso del tiempo final debería tomar un valor menor, optando por utilizar 15 s, el cual proporcionó buenos resultados para los caudales inferiores pero mostró inestabilidad para los más grandes, lo cual se estimó como 10 s el valor definitivo que cumplía con todas las condiciones.

En lo que respecta a (Δx), el valor definitivo fue establecido una vez definidos los tamaños de cada uno de los elementos que componen el mallado, tanto en aquellas zonas que poseen una malla estructurada como en las que tienen definida una no estructurada.

Definición de los parámetros físicos

El siguiente parámetro físico que faltaba por definir fue el de rugosidad de Manning, y se escogió 0,009 como el valor seleccionado con base en la rugosidad del acrílico, puesto que fue el material que componía tanto el fondo

como las paredes del modelo físico. En lo que respecta a la rejilla, debido a que se modeló como un contorno sólido vertical a través del cual estaba restringido el paso de fluido, únicamente fue necesario asignar un valor de rugosidad a la pared del elemento sólido, valor que se determinó como el valor medio del siguiente rango de valores (0,0010 - 0,0013), ya que el material en el modelo físico era pintura. En este punto es importante destacar que en principio se tomó el valor promedio (0,00115) para evaluar el comportamiento del modelo, el cual fue satisfactorio; no obstante, se realizaron modelaciones con los valores límites del intervalo mencionado y se encontró que la influencia de este parámetro físico sobre las características de flujo era despreciable.

Finalmente, el último parámetro que se analizó fue la turbulencia, el cual influyó de manera considerable en las profundidades de lámina de agua calculadas, obteniendo mayor exactitud en la medida en que aumentaba la complejidad del modelo de turbulencia utilizado.

Calibración de los modelos numérico y físico

Para sustentar lo anterior y mostrar que los modelos de turbulencia analizados tienen repercusiones tanto en las profundidades de lámina de agua como en las velocidades obtenidas, se analizaron los calados en todos los puntos que tenían datos de medición en el modelo físico, permitiendo la comparación uno a uno con los valores de los modelos de turbulencia empleados.

Tabla 1
Comparación de errores en los modelos de turbulencia

Comparación de errores modelo sin turbulencia													
Lectura Q = 30,58 m ³ /s	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7	Y8	Y9	Y10	Y11	Y12	Y13
	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm
Modelo físico	18,60	18,40	18,50	18,90	20,90	21,10	21,10	21,20	20,70	21,20	21,20	21,20	20,10
Sin turbulencia	18,87	18,49	18,81	19,64	21,53	21,70	21,62	21,62	21,28	21,63	21,70	21,68	21,21
Diferencia (cm)	-0,27	-0,086	-0,307	-0,737	-0,628	-0,59	-0,515	-0,422	-0,581	-0,426	-0,496	-0,484	-1,108
Error (%)	-1,5	-0,5	-1,7	-3,9	-3,0	-2,8	-2,4	-2,0	-2,8	-2,0	-2,3	-2,3	-5,5

Comparación de errores modelo de turbulencia parabólico													
Lectura Q = 30,58 m ³ /s	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7	Y8	Y9	Y10	Y11	Y12	Y13
	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm
Modelo físico	18,60	18,40	18,50	18,90	20,90	21,10	21,10	21,20	20,70	21,20	21,20	21,20	20,10
Tur. parabólico	18,87	18,55	18,37	19,31	21,30	21,46	21,38	21,40	21,06	21,42	21,50	21,49	21,02
Diferencia (cm)	-0,267	-0,149	0,135	-0,408	-0,395	-0,363	-0,281	-0,198	-0,36	-0,218	-0,302	-0,292	-0,923
Error parabólico (%)	-1,4	-0,8	0,7	-2,2	-1,9	-1,7	-1,3	-0,9	-1,7	-1,0	-1,4	-1,4	-4,6

Comparación de errores modelo de turbulencia k-ε													
Lectura Q = 30,58 m ³ /s	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7	Y8	Y9	Y10	Y11	Y12	Y13
	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm
Modelo físico	18,60	18,40	18,50	18,90	20,90	21,10	21,10	21,20	20,70	21,20	21,20	21,20	20,10
Turb. k-ε	18,87	18,53	18,74	19,38	21,28	21,44	21,37	21,38	21,05	21,40	21,49	21,48	21,00
Diferencia (cm)	-0,266	-0,133	-0,241	-0,475	-0,376	-0,342	-0,266	-0,182	-0,346	-0,202	-0,287	-0,277	-0,902
Error modelo k-ε (%)	-1,4	-0,7	-1,3	-2,5	-1,8	-1,6	-1,3	-0,9	-1,7	-1,0	-1,4	-1,3	-4,5

Una mirada general permite concluir que existe similitud entre los resultados, razón por la cual es posible afirmar que las premisas planteadas como condiciones iniciales y de contorno, los parámetros asignados, el modelo numérico escogido y demás, están acordes con las condiciones físicas reales y reflejan en su mayoría los fenómenos que acompañan al flujo a lo largo de la estructura. Lo anterior se sustenta observando que el error porcentual más grande es 5.5 para el modelo sin turbulencia, el cual se reduce a 4,5 % mediante el uso de modelo k-ε, lo cual permite afirmar que incluso donde la turbulencia es considerable y se dificultan las lecturas de lámina de agua, los resultados mostrados por el *software* son bastante acordes con la realidad.

Sin embargo, el efecto real de la turbulencia se aprecia en los cortes transversales generados para los perfiles de velocidad, debido a que es allí donde se ve reflejada la influencia tanto de la rugosidad como de la turbulencia debida a los gradientes de velocidad, la disipación y el transporte convectivo por el flujo medio, tal como se observa en la siguiente imagen (ilustración 4):

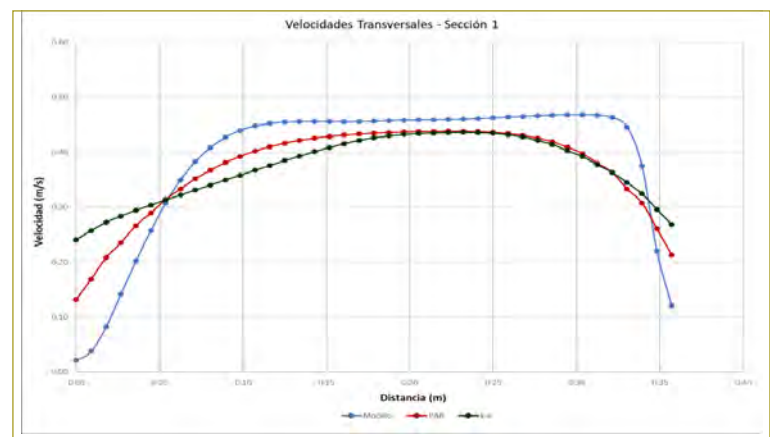


Ilustración 4. Velocidades transversales, sección 1.

Fuente: Elaboración propia.

De la gráfica anterior se puede observar que en el centro del canal las velocidades tienden a tener valores similares, mientras que en los contornos de las paredes el perfil tiende a mostrar velocidades inferiores, tal como lo muestran las gráficas de los modelos sin turbulencia y parabólico, a causa de que los dos coinciden en la conje-

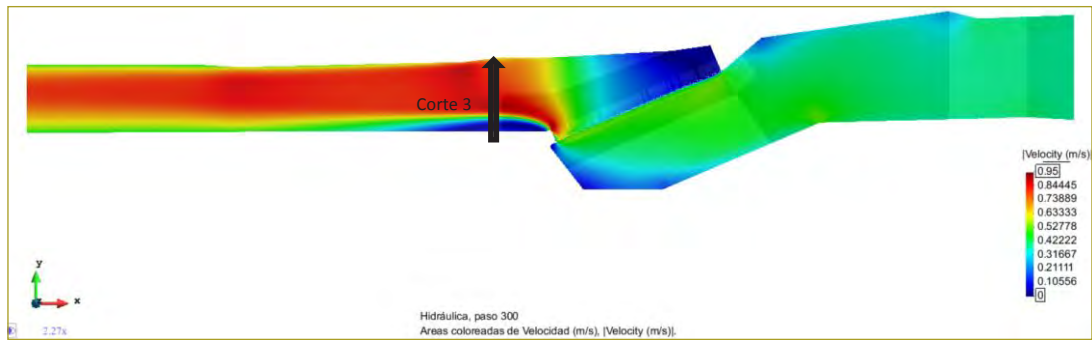


Ilustración 5. Resultados velocidad. Modelo de turbulencia $k-\epsilon$.

Fuente: Elaborado con IBER 2D.

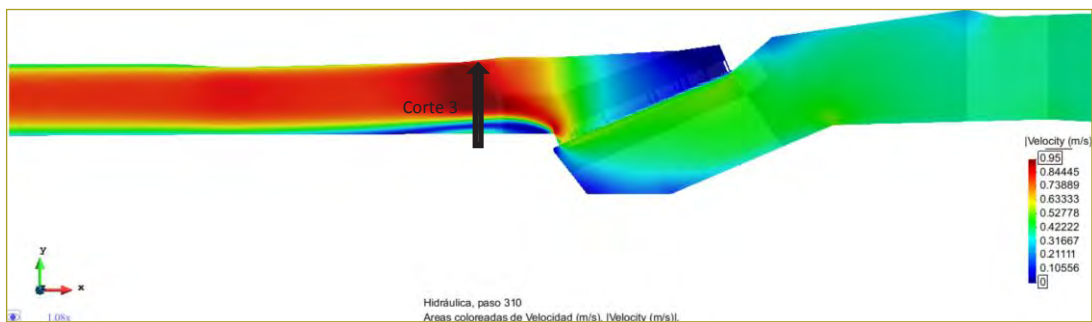


Ilustración 6. Resultados velocidad. Modelo de turbulencia parabólico.

Fuente: Elaborado con IBER 2D.

tura que justo en el contorno con la pared la velocidad tenderá a ser cero. Por su parte, el modelo de turbulencia $k-\epsilon$, al tener en cuenta los efectos viscosos, garantizará que las condiciones de flujo asuman la influencia tanto de las rugosidades laterales como de las velocidades a lo largo de la sección transversal, lo cual se traduce en un valor de velocidad mayor en el contorno lateral.

Para poder comparar gráficamente los modelos de turbulencia, se elaboraron los siguientes esquemas de áreas coloreadas (ilustraciones 5 y 6).

En cuanto a los campos de velocidades, se puede observar que los valores máximos al utilizar el modelo $k-\epsilon$ disminuyen debido a que la turbulencia tiende a homogeneizar el campo de velocidades. Por lo tanto, las zonas de recirculación también tienden a disminuir, lo cual se observa al comparar los diagramas a la altura del corte 3, aproximadamente, pues en el segundo modelo se ve una franja azul clara, la cual indica que las velocidades presentes allí son mayores que el azul oscuro reflejado en el primer diagrama.

CONCLUSIONES

Dentro de este capítulo vale la pena destacar que en los ensayos experimentales que realizó el Centro de Estudios Hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería se generaron trece perfiles de lámina de agua diferentes, en flujo turbulento a superficie libre, los cuales permitieron abarcar el dominio hidráulico de operación de la Central Hidroeléctrica La Naveta. En dichos perfiles se identificaron los efectos de la rejilla como un elemento clave en el cambio de las condiciones de flujo a lo largo de la estructura, la importancia de los fenómenos turbulentos y los cambios espaciales en el comportamiento de variables de flujo. Además, el modelo numérico construido utilizando el *software* IBER 2D permitió representar de forma muy aproximada el comportamiento del flujo en el modelo, teniendo como principal condición el uso de modelos de turbulencia más completos y disponibles en IBER 2D.

Por un lado, las modelaciones realizadas con el modelo más elemental que ofrece IBER proporcionan una buena aproximación a las mediciones experimentales de lámina de agua leídas a través de los flexómetros

adheridos a las paredes del canal; sin embargo, la inclusión de expresiones en el modelo numérico cuyo fin sea describir los modelos de turbulencia no sólo representa con mayor exactitud los fenómenos hidráulicos observados en el modelo sino que incluye variables y análisis adicionales, tales como la viscosidad turbulenta, a partir de los cuales es posible inferir los cambios que se producen en los perfiles transversales de velocidad en distintas secciones de flujo a lo largo de la estructura.

Dejando de lado el análisis con los flexómetros, se introdujeron los transductores de presión y su comparación con puntos homólogos en el modelo numérico, dando origen a la premisa de que el identificado como S12 se encontraba descalibrado mientras recopilaba lecturas en el modelo hidráulico, ya que los errores resultantes de cotejar los registros del transductor con los del modelo numérico en IBER arrojaron resultados cercanos al 32 %, los cuales son inconsistentes con la caracterización visual del trabajo de laboratorio.

Tanto las lecturas de los flexómetros como de los cinco transductores de presión ubicados en puntos estratégicos del modelo fueron de vital importancia para llevar a cabo con éxito la primera aproximación a la calibración del modelo numérico. Sin embargo, para disminuir los errores encontrados inicialmente fue necesario iterar usando distintos valores de características físicas, como la rugosidad, con el fin de encontrar un valor que redujera las diferencias.

En lo que respecta a la malla, la discretización llevada a cabo en el sector de la rejilla fue una réplica de las superficies que formaban parte de la geometría de esta misma zona, lo cual no sólo garantizó tener certeza de la distribución de los elementos y del tamaño de éstos, sino un mayor control en las longitudes mínimas requeridas para garantizar en todo momento la estabilidad del modelo, la cual dependía del cálculo de la condición de Courant. Esta afirmación adquiere sentido al analizar los resultados de las simulaciones realizadas, pues se observa que a lo largo del dominio computacional existe estabilidad numérica.

Por otro lado, el proceso de refinamiento de la malla mediante la combinación de superficies estructuradas en las secciones de geometría regular (asemejadas a cuadriláteros) y no estructuradas en las transiciones y cambios de dirección no sólo permitió que se tuviera un cubrimiento total de cada uno de los espacios computacionales, garantizando una clara representación

de los fenómenos de flujo que ocurrían en el interior de la estructura, sino que se optimizara el tiempo de cálculo, requiriendo aproximadamente 9,5 horas para la simulación de cada uno de los escenarios.

Además, hay que tomar en cuenta que el modelo RANS y el aumento en la complejidad de los modelos de turbulencia hasta llegar a $k-\epsilon$ obtuvieron una simulación numérica coherente y muy similar a las observadas en los ensayos experimentales, ya que la tendencia de los errores empezó a disminuir, logrando que el perfil de la lámina de agua simulada en IBER 2D se asemejara considerablemente a los perfiles obtenidos en el laboratorio. Así mismo, cabe destacar que aumentó el detalle de los fenómenos de turbulencia en el sector de la rejilla, mostrando tanto la aceleración del flujo hacia la arista de la margen izquierda como el represamiento en el sector de la margen derecha en el canal aguas abajo de la rejilla, simulando claramente los remolinos e identificando las zonas de recirculación y flujo muerto.

Partiendo de que el modelo de turbulencia $k-\epsilon$ es el único que requiere que se establezcan condiciones iniciales antes de dar inicio al proceso de cálculo, logró concluirse que la estimación tanto de la energía cinética turbulenta (k) como de la tasa de disipación de la energía cinética turbulenta (ϵ) fue de vital importancia para la convergencia del modelo numérico, ya que estos parámetros son parte de las ecuaciones de transporte que se resuelven para calcular la distribución espacial de la energía cinética turbulenta y su tasa de disipación. Así, las expresiones que representan los términos de difusión, producción por gradientes horizontales de velocidad, producción por fricción en el fondo y disipación partieron de raíces adecuadas, las cuales permitieron la convergencia del modelo y mostraron resultados satisfactorios a lo largo de la bocatoma.

Claramente, en el sector de la rejilla se potencian los efectos turbulentos del modelo, los cuales están asociados a todos los cambios de régimen de flujo que se produjeron en esa zona. Debido a que la trayectoria de la corriente principal estaba ubicada en la margen izquierda (aguas abajo de la rejilla), en ese sector se concentraría la mayor cantidad de energía cinética turbulenta, la cual justo en ese punto empezaría el proceso de disipación a medida que el flujo avanza por el canal de conducción, logrando que los perfiles de velocidad en las secciones transversales empiecen a estabilizarse. En

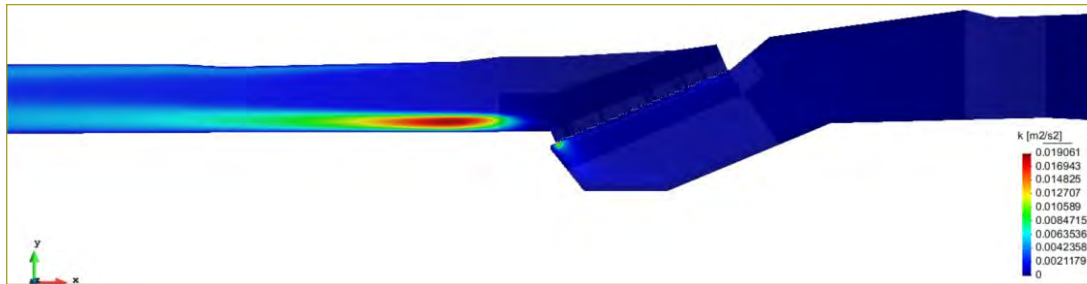


Ilustración 7. Viscosidad turbulenta. Modelo de turbulencia k-ε.

Fuente: Elaborado usando IBER 2D.

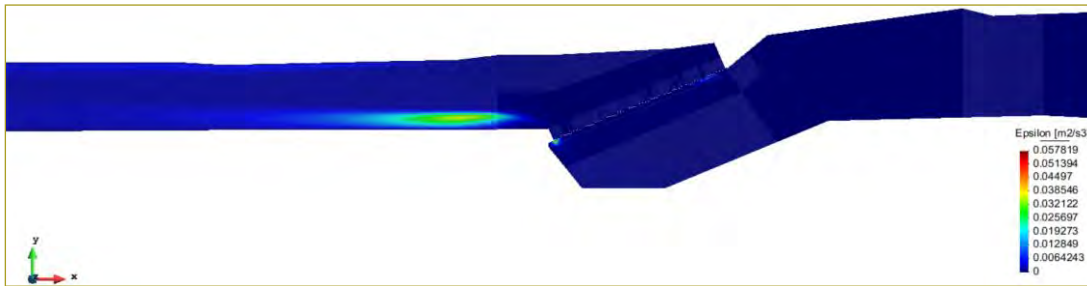


Ilustración 8. Viscosidad turbulenta. Modelo de turbulencia k-ε.

Fuente: Elaborado usando IBER 2D.

la siguiente ilustración se muestra la sectorización de los valores mayores una vez que el flujo atraviesa la rejilla, por lo que se puede observar este efecto (ilustración 9):

Tan pronto como el flujo atraviesa la rejilla se observan oscilaciones en la superficie de la lámina de agua, las cuales representan adecuadamente lo ocurrido en esta zona; esto se puede ver con claridad gracias a la discretización minuciosa generada en ese sector.

Los perfiles generados cambiando las secciones de control reflejan claramente que la rejilla es un elemento influyente en el flujo a lo largo del canal, pero que en ningún momento hace que el flujo cambie su condición

subcrítica. Además, es posible inferir que a medida que se reduce el valor de la profundidad de lámina de agua como sección de control aguas abajo, la energía potencial disponible al inicio del canal también disminuye, mostrando un ΔE asociado al paso del flujo por la rejilla.

Finalmente, pese a que modificar la sección de control aguas abajo modifica la energía disponible para transportar el flujo al ingreso del canal de aducción, el perfil de calados a lo largo de la estructura no demuestra variaciones considerables distintas de un traslado vertical con respecto al caudal de referencia.

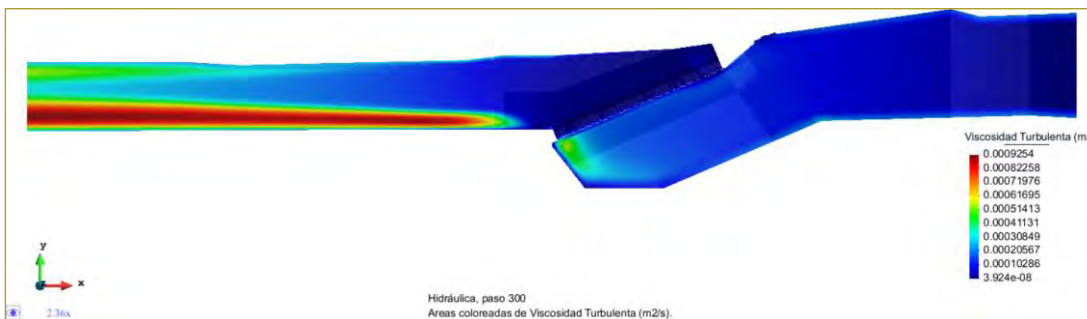


Ilustración 9. Viscosidad turbulenta. Modelo de turbulencia k-ε.

Fuente: Elaborado con IBER.

REFERENCIAS

- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., ... Coll, A. (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. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2012.07.004>.
- Bladé, E., & Gómez-Valentín, M. (2006). *Modelación del flujo en lámina libre sobre cauces naturales. Análisis integrado en una y dos dimensiones. Monograph Cimne N.º 97*. Barcelona, España. Cedex, Geama, Flumen y Cimne (2010). *IBER. Modelización bidimensional del flujo en lámina libre en aguas poco profundas. Manual básico de usuario*.
- Chow, V. T. (1959). *Open channel hydraulics*. Nueva York: McGraw-Hill.
- López, J., Alavez-Ramírez, J., & Hernández, J.L. (2009). *Solución numérica del modelo de Saint-Venant vía volúmenes finitos*, pp. 34–53.
- Sierra, F. (2015). Comparación entre metodologías de modelación hidrológica HEC HMS, hidráulica en 1D HEC-RAS y 2D modelo IBER, de planicies de inundación y zonas urbanas para el caso de Villapinzon, Cundinamarca. Recuperado a partir de <https://repositorio.escuelaing.edu.co/handle/001/193>.

Ecuaciones constitutivas de módulo resiliente de materiales tratados con asfalto espumado

Constitutive equations of resilient modulus for materials treated with foamed asphalt

SANDY JAZMÍN PARDO HERREÑO¹ - SANDRA XIMENA CAMPAGNOLI MARTÍNEZ²

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

2. Profesora titular de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

sandypardo@mail.escuelaing.edu.co - sandra.campagnoli@escuelaing.edu.co

Recibido: 15/02/2019 Aceptado: 03/03/2019

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

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

Resumen

En años recientes se han hecho esfuerzos considerables para entender las propiedades mecánicas y el comportamiento de los materiales estabilizados con asfalto espumado. Muchos estudios están orientados a la obtención del módulo resiliente (M_r), de tal forma que, independientemente del modelo de análisis, se puedan aplicar valores confiables de este parámetro a las capas de tales materiales en los métodos de diseño de estructuras de pavimento de naturaleza empírico - mecánica.

En este trabajo se presentan las ecuaciones constitutivas del M_r , obtenidas sobre mezclas con diferentes proporciones en peso de granular/RAP (100/0 %, 85/15 %, 70/30 % y 50/50 %) y espuma de asfalto (60/70 $^{1/10}$ mm) de las refinerías de Barrancabermeja y Apiay (Colombia), de dos procedencias distintas. Las mezclas se elaboraron siguiendo la metodología propuesta por la Academia del Asfalto de Sudáfrica, en la guía técnica *Bitumen Stabilized Materials* TG2, de 2009. Las probetas fabricadas se ensayaron para determinar el M_r , según la norma INV E-156-13. Con los resultados obtenidos se evaluaron los modelos del M_r en función de los esfuerzos principales (primer invariante de esfuerzos - θ), del esfuerzo desviador - σ_d o del esfuerzo cortante octaédrico - τ_{oct} . Se confirma para los materiales evaluados una dependencia significativa del estado de esfuerzos.

Palabras claves: asfalto espumado, estabilizaciones, módulo resiliente, reciclaje de pavimentos.

Abstract

In recent years, considerable efforts have been made to understand the mechanical properties and behavior of materials stabilized with foamed bitumen. Many studies are aimed at obtaining the Resilient Modulus - M_r , so that, independently of the analysis model, reliable values of this parameter can be applied to the layers of these materials in the design methods of pavement structures of an empirical nature - mechanistic. This article shows the constitutive equations of M_r , obtained on mixtures with different proportions by weight of granular / RAP (100/0 %, 85/15 %, 70/30 % and 50/50 %) and asphalt foam (60 / 70 $^{1/10}$ mm) from the refineries of Barrancabermeja and Apiay, Colombia, from two different origins. The mixtures were developed following the methodology proposed by the Asphalt Academy of South Africa, in the Technical Guide - Bitumen Stabilized Materials, TG2 of 2009. The manufactured test pieces were tested to determine the M_r , according to standard INV E-156-13. With the results obtained, the M_r models were evaluated according to the main stresses (first invariant stress - θ), the deviating stress - σ_d or the octahedral shear stress - τ_{oct} . A significant dependence of the stress state is confirmed for the evaluated materials.

Keywords: foamed asphalt, stabilizations, resilient modulus, pavement recycling.

INTRODUCCIÓN

La aplicación de nuevas tecnologías en pavimentos y la necesidad de lograr un desarrollo sostenible con materiales reciclados, como por ejemplo los provenientes del fresado de las capas asfálticas, hacen de los nuevos procesos constructivos una oportunidad tentadora para reducir los costos de inversión y aumentar la vida útil de las vías en Colombia.

Las técnicas de reciclaje en frío, en especial la de recuperación total de espesores, conocida como Full Depth Reclamation (involucra las capas asfálticas –RAP, Reclaimed Asphalt Pavement, por su sigla en inglés– y parte de la capa granular) se han venido utilizando en el país desde principios de los años noventa. A comienzos de 1992, se empezó a intensificar la técnica del reciclaje en frío en Colombia, utilizando emulsiones asfálticas como ligante. Por ende, se ha venido ganando experiencia y conocimiento sobre la importancia del reciclado de pavimentos (Carlos, 2009); sin embargo, con los avances de la tecnología también se ha hecho una apuesta por utilizar espuma de asfalto, la cual aún no es muy conocida en el país, a pesar de los grandes adelantos documentados a escala internacional.

En las concesiones, el reciclaje en frío se ha convertido en una técnica muy usada para la rehabilitación de pavimentos existentes y se prevé que se incremente en las denominadas de cuarta generación (4G). Entre los agentes estabilizadores usados, además del cemento y de las emulsiones asfálticas, los asfaltos espumados están ganando mayor aceptación.

Con la implementación y el creciente empleo de los materiales que contienen RAP, tratados con asfalto espumado en Colombia, se hace necesario realizar un permanente control de las variables de diseño para lograr un buen comportamiento de este material, lo que justifica el estudio del módulo resiliente.

Por otro lado, el Centro de Estudios Geotécnicos, en los laboratorios de Suelos y Pavimentos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, ha sido pionero en la implementación y estudio de esta tecnología en Colombia, en especial en la caracterización de las espumas de asfalto y en el diseño de las estabilizaciones que se logran con los materiales reciclados.

MÓDULO RESILIENTE DE MATERIALES ESTABILIZADOS CON ESPUMA DE ASFALTO.

Jenkins y Collins (Guía Técnica *Bitumen Stabilized Materials*, TG2, 2009) describen las mezclas con asfalto espumado y las destacan por su capacidad de aumentar la flexibilidad y la resistencia de los materiales granulares, en razón de que la espuma de asfalto envuelve las partículas más finas que los conforman y generan puentes de contacto entre sus partículas [2].

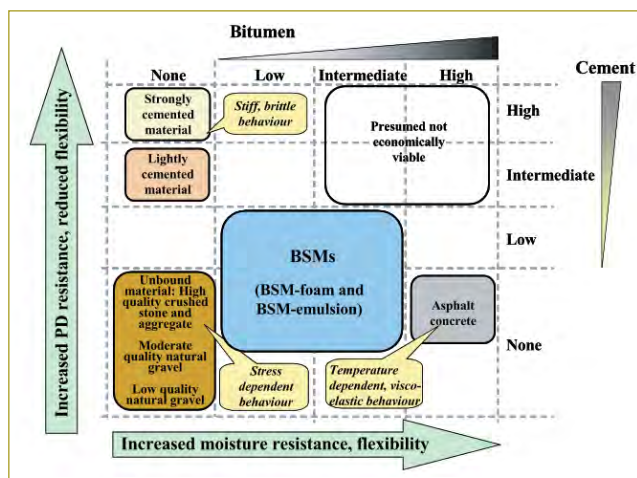


Figura 1. Comportamiento conceptual de los materiales para pavimentos (Asphalt Academy, 2009).

Para el diseño y la evaluación del desempeño de las mezclas tratadas con asfalto espumado normalmente se evalúan dos propiedades principales: la resistencia a la tracción y la flexibilidad de la BSM, en forma indirecta con el ensayo de tracción indirecta (ITS). Aunque esta prueba no produce resultados altamente repetibles, es el método más económico para investigar la eficacia del betún. Además, se dispone de antecedentes de datos históricos [3].

No obstante, con el fin de evaluar el comportamiento de las mezclas tratadas con espuma de asfalto (BMS) de manera más detallada y modelar el comportamiento de la rigidez se debe realizar el ensayo de módulo resiliente, el cual sirve para determinar la reacción de un material cuando la carga es retirada, ya que recupera parte de la deformación inducida; la capacidad de recuperación de dicho material es lo que comúnmente se denomina la resiliencia de los materiales. La relación entre el esfuerzo desviador y la correspondiente deformación unitaria recuperada se denomina módulo resiliente.

El módulo resiliente (MR) de un material estabilizado con asfalto se puede medir en laboratorio si se somete un espécimen a un ensayo de carga repetitiva [4].

Otra forma de medir el módulo resiliente en el laboratorio para materiales granulares es con el ensayo descrito en la norma INV E-156-2013, el cual se realiza sobre probetas de 100 mm de diámetro por 200 mm de altura; se aplica un esfuerzo axial cíclico, repetido, de magnitud, duración y frecuencias fijas, a un espécimen cilíndrico de ensayo, debidamente preparado y acondicionado. Durante las aplicaciones del esfuerzo dinámico desviador, el espécimen está sometido a un esfuerzo estático en su contorno, proporcionado por medio de una cámara de presión triaxial. Se mide la deformación axial total resiliente (recuperable) de respuesta del espécimen y se calcula el módulo resiliente relacionando el esfuerzo axial desviador con la deformación unitaria axial resultante.

En un estudio sobre la respuesta resiliente de los BSM con asfalto espumado, desarrollado por Dal Ben con la dirección de Jenkins, se evaluó el comportamiento del módulo resiliente para tres tipos de agregados (100 %RAP, 50/50 RAP y material granular y 100 % material granular), y se hicieron ensayos triaxiales cíclicos, variando las condiciones de temperatura y de presión de confinamiento.

Los valores de Mr iniciales, que varían entre 200 y 600 MPa para el 100 % de RAP, entre 400 y 700 MPa para la combinación de 50/50 y entre 700 y 1000 MPa para el 100 % de material granular, muestran un mejor comportamiento de este tipo de material (DalBen, 2014). Otros investigadores han reportado valores similares e incluso inferiores (100 a 400 MPa) al Mr inicial que desarrollan los BSM con FA [6].

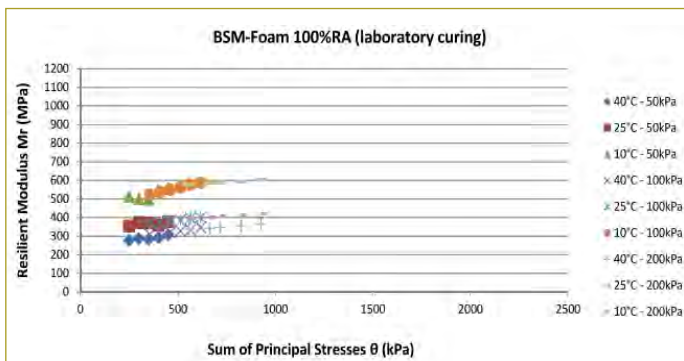


Figura 2. Variación del Mr en mezcla con 100 % de RAP (DalBen, 2014).

Otro resultado importante de las investigaciones del módulo resiliente es que éste aumenta con el tiempo, en estudios de laboratorio y en evaluaciones en tramos experimentales realizadas a largo plazo [7].

ECUACIONES CONSTITUTIVAS DEL MR

Existen diferentes modelos aplicados para caracterizar el comportamiento de la rigidez de los materiales granulares no ligados; sin embargo, en el presente estudio se pretende verificar la aplicabilidad de dichas modelaciones en materiales semiligados. En la bibliografía existente se explican principalmente tres modelos desarrollados por Uzan en sus investigaciones; dichos modelos han sufrido modificaciones con el propósito de involucrar el mayor número de variables que influyen en el comportamiento de la rigidez de los materiales granulares, con el fin de obtener ecuaciones constitutivas que representen de manera más acertada el comportamiento del módulo resiliente.

Modelo K-θ

Es una descripción práctica no lineal del módulo elástico del material granular. En este modelo el módulo elástico se expresa en función de la suma de las tensiones, representada por la siguiente ecuación:

$$M_r = K_1 \theta^{k_2} \tag{1}$$

Donde:

θ = suma de los esfuerzos principales ($\sigma_1 + 3\sigma_3$).

k1 y k2 = parámetros de regresión.

En este modelo siempre se parte de un esfuerzo desviador igual a cero. Las constantes del material k1 y k2 dependen de la densidad y del contenido de humedad del material de ensayo (Pérez et al., 2002). El modelo k-θ tiene el inconveniente de no considerar el efecto del esfuerzo desviador sobre las propiedades resilientes y, además, de asumir una relación de Poisson (ν_r) [9].

Modelo de Uzan

Uzan propuso un modelo en el que se tiene en cuenta la resistencia al corte y dilatación de manera más adecuada que en el primer modelo.

$$M_r = K_1 \theta^{k_2} \sigma d^{k_3} \quad (2)$$

Donde:

σd = esfuerzo desviador ($\sigma_1 - \sigma_3$).

θ = suma de los esfuerzos principales ($\sigma_1 + 3\sigma_3$).

k_1, k_2 y k_3 = parámetros de regresión.

En este modelo, Uzan especificó que el módulo resiliente de una capa granular no es solamente una función del esfuerzo volumétrico (θ), sino también de la magnitud de la deformación cortante inducida principalmente por el esfuerzo cortante o por el esfuerzo desviador [10].

Modelo τ octaédrico

Un planteamiento llevado a cabo, más tarde, por Uzan para el análisis en tres dimensiones (3-D) consiste en sustituir el esfuerzo desviador efectivo por la tensión efectiva tangencial octaédrica [4].

$$M_r = K_1 P_0 \left(\frac{\theta}{P_0} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{OCT}}{P_0} + 1 \right)^{k_2} \quad (3)$$

En este caso, empleó un esfuerzo de referencia p_0 de 100 kPa, igual a la presión atmosférica. En el modelo de Uzan se mantiene constante la relación de Poisson y el esfuerzo desviador inicial de partida sigue siendo igual a cero. Al aplicar el modelo en 3D de Uzan a los mismos resultados experimentales de los modelos, se obtuvo un buen ajuste del modelo, con un coeficiente de determinación de 0,98 (Pérez et al., 2002) [11].

MATERIALES

Agregados vírgenes

El material granular proviene de la cordillera Oriental (departamento de Cundinamarca), de la formación Guadalupe, que son rocas areniscas duras de la era terciaria, las cuales son sometidas a procesos de trituración terciarios, con el fin de obtener los tamaños de partículas adecuados para cumplir con las especificaciones de la norma Inviás 2013; el material cumple con lo especificado en el TG2 (figura 3).

RAP

El RAP utilizado para la preparación de las mezclas proviene del reprocesamiento de capas asfálticas de pavimentos de la ciudad de Bogotá.

Mezclas de agregados y RAP

Para el estudio se hicieron cuatro combinaciones de agregados en las siguientes proporciones: material granular/RAP (100 - 0 %, 85-15 %, 70-30 % y 50-50 %).

Una vez realizadas las combinaciones de los agregados se procede a determinar la granulometría combinada y a comparar con la franja granulométrica propuesta por la metodología de la Academia del Asfalto de Sudáfrica en el manual TG2; como se puede observar, todas las combinaciones de granular/RAP cumplen con la recomendación granulométrica (figura 3).

A continuación se presenta un resumen de los parámetros de caracterización, para cada una de las mezclas (tabla 1).

Tabla 1
Parámetros de caracterización de las mezclas

Tipo de mezcla	Pasa tamiz N.º 4 (%)	Pasa tamiz N.º 200 (%)	Índice de plasticidad	Humedad óptima (%)	Densidad seca (kN/m³)
100/0	43	11,8	NP	8,4	20,5
85/15	38	7,8	NP	7,6	20,5
70/30	48	9,0	NP	8,2	22,45
50/50	46	7,5	NP	7,2	22,25

Fuente: Elaboración propia.

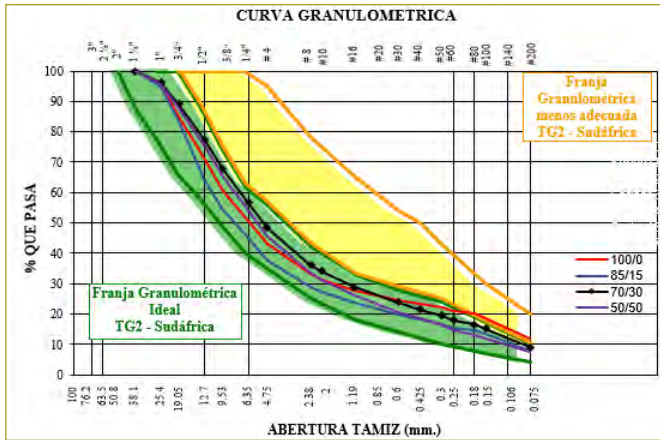


Figura 3. Curva granulométrica y mezclas de agregado/RAP.
Fuente: Elaboración propia.

Asfalto

Los asfaltos utilizados son clasificados por grado de penetración como 60/70 (1/10 mm) de las refinerías de Barrancabermeja y Apiay (Colombia), los cuales para la investigación se denominaron B1, B2 y A1; además, cumplen con las especificaciones propuestas por el Instituto Nacional de Vías (Invías) en su versión del año 2013.

Caracterización de la espuma de asfalto

Para la caracterización de la espuma de asfalto se realizaron variaciones de las temperaturas del asfalto entre 140 y 170 °C y en las concentraciones de agua desde 2,0 %, con incrementos de 0,5 % hasta alcanzar el 4,0 %. Los resultados de relación de expansión variaron entre 12,0 y 34,0, mientras que los resultados de vida media mostraron valores entre 12,9 y 15,5 s, cumpliendo de esta manera con los requisitos especificados por la Academia del Asfalto en el manual del TG2.

En la tabla siguiente se hace un resumen de los resultados obtenidos de las características del asfalto por utilizar en el presente estudio, en el que se seleccionó una temperatura óptima de 160 °C y 2,5 % de concentración de agua, teniendo en cuenta que con estas condiciones la espuma de asfalto presentaba un buen comportamiento de manejabilidad y trabajabilidad; además, cumple con los parámetros de aceptación propuestos por la metodología TG-2 (tabla 2).

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Fabricación de las probetas para ensayo de módulo resiliente

Las probetas de Mr se fabricaron con el llenante y contenido de asfalto óptimo encontrado, siguiendo las recomendaciones expuestas por la Academia del Asfalto de Sudáfrica en el manual del TG2. Más adelante se muestra un resumen de los tipos de llenante y contenido óptimo de asfalto que mostraron un mejor comportamiento de los tres parámetros evaluados (ITS seco, ITS húmedo y TSR o resistencia conservada) para cada una de las combinaciones propuestas (tabla 3).

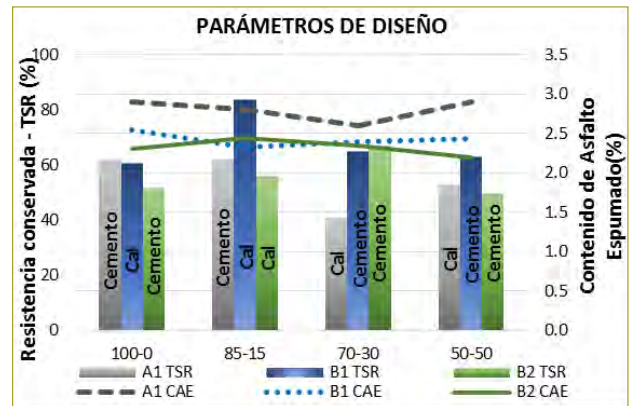


Figura 4. Parámetros de diseño de mezcla para los diferentes tipos de asfalto.

Tabla 2
Resumen de las características de la espuma óptima para asfaltos 60/70 (1/10 mm)

Tipo de asfalto	Temperatura (°C)	Concentración de agua FWC	Razón de expansión (ER)	Vida media (HL) s.
B1	160	2.5	12.0	15.5
B2	160	2.5	18.0	13.1
A1	160	2.5	34.0	12.9

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3
Resumen de resultados de mezclas con tres tipos de asfalto

Tipo de asfalto	100-0			85-15			70-30			50-50		
	LL	CAE	TSR	LL	CAE	TSR	LL	CAE	TSR	LL	CAE	TSR
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
A1	Ce	2.90	62	Ce	2.81	62	C	2.60	41	C	2.90	44
B1	C	2.55	61	C	2.30	84	Ce	2.40	65	Ce	2.40	63
B2	Ce	2.30	52	C	2.45	56	Ce	2.35	67	Ce	2.20	50

Fuente: Elaboración propia

Nota: (LL: llenante, CAE: contenido de asfalto escogido, TSR: Resistencia conservada).

Con el llenante y el contenido óptimo de asfalto se fabricaron las probetas para determinar el Mr, las cuales se hicieron con los lineamientos de la norma 156 del 2013 del Instituto Nacional de Vías (Invías), para especímenes de 100 mm de diámetro y 200 mm de altura. Teniendo en cuenta el tamaño máximo nominal de las partículas del agregado, la compactación se hizo con un equipo vibratorio en cinco capas y un molde partido.

Curado

El curado de las briquetas se realizó en horno a 40 °C durante 72 horas sin sellar, como recomienda la Academia del Asfalto para nivel 1 de diseño en el manual del TG2 (Asphalt Academy, 2009). El proceso de curado acelerado simula el curado en campo y se considera apropiado para simular la ganancia de resistencia.

Ensayos de módulo resiliente

Se realizaron pruebas de módulo resiliente para cada una de las mezclas de evaluación (cuatro mezclas), basado en la norma Invías 156/2013, sin control de temperatura. Las presiones de confinamiento usadas fueron las establecidas para materiales de base y subbase en la norma Invías 156/2013, tabla 156-2.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la tabla siguiente se resumen los valores de módulo resiliente obtenidos a partir del ensayo dinámico y los valores de k1, k2, k3 y R² para los tres modelos evaluados (tabla 4).

Modelo K-θ

Para el modelo K-θ aplicado en las diferentes mezclas se obtienen valores de K1 que oscilan entre 0,09 y 185,66, donde el valor más alto es el obtenido con el asfalto B1 y el más bajo es el obtenido con el asfalto B2 y valores de K2 que varían entre 0,06 y 0,61; los valores más altos son los de las mezclas 50/50 fabricadas con los distintos tipos de asfalto, lo que evidencia que estas mezclas tienen mayor dependencia del estado de esfuerzos (figura 5).

Es importante mencionar que de acuerdo con diversas investigaciones, estos valores de K2 se obtienen en mezclas para las cuales la correlación entre el módulo resiliente y el invariante de esfuerzos es baja (Jenkins & Mulusa, 2008), por lo que el modelo K-θ no es el modelo que representa en forma adecuada el comportamiento de las mezclas hechas en el presente trabajo de investigación.

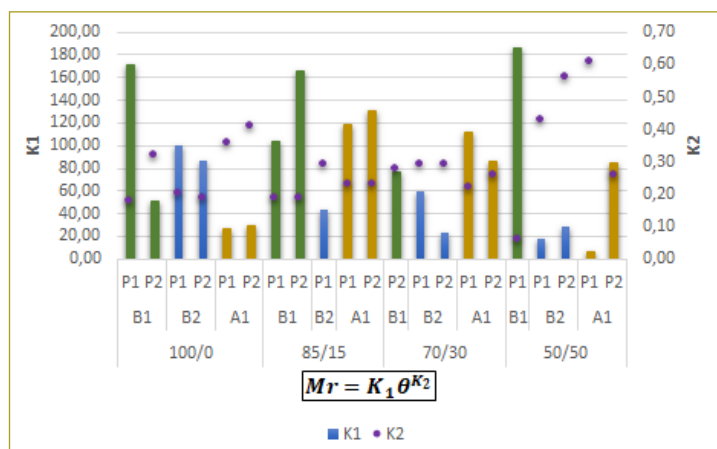


Figura 5. Valores de K1 y K2 para los diferentes tipos de mezclas. Modelo K-θ.

Tabla 4
Resumen de resultados de módulo y valores de K para los diferentes modelos

Descripción			Módulo		K-θ			Uzan				T octaédrico			
MEZ.	ASF	CAE	Mín.	Máx.	k1	k2	R ²	k1	k2	k3	R ²	k1	k2	k3	R ²
100/0	B1	2,4	177	634	51,43	0,32	0,71	103,2	0,00	0,28	0,88	3,18	0,00	0,61	0,89
100/0	B2	2,3	197	421	101,55	0,20	0,55	26,66	0,00	0,46	0,88	1,19	0,00	0,95	0,83
100/0	A1	2,9	108	527	26,77	0,36	0,50	89,47	0,00	0,27	0,72	2,08	0,00	0,62	0,67
85/15	B1	2,3	212	672	108,6	0,24	0,26	83,45	0,00	0,29	0,75	2,17	0,00	0,66	0,73
85/15	B2	2,5	123	377	43,41	0,25	0,65	60,37	0,06	0,18	0,71	1,74	0,19	0,18	0,66
85/15	A1	2,8	249	737	137,65	0,23	0,32	103,96	0,00	0,32	0,74	2,89	0,00	0,68	0,68
70/30	B1	2,4	145	590	37,36	0,38	0,58	39,32	0,00	0,46	0,89	1,15	0,00	0,95	0,83
70/30	B2	2,4	170	471	30,4	0,25	0,49	33,85	0,02	0,25	0,66	0,87	0,12	0,34	0,66
70/30	A1	2,6	230	559	118	0,22	0,53	117,5	0,00	0,27	0,86	2,77	0,00	0,59	0,85
50/50	B1	2,4	190	420	294,5	0,01	0,05	160,2	0,00	0,47	0,98	2,61	0,00	0,37	0,21
50/50	B2	2,2	90	340	18,41	0,42	0,77	23,02	0,00	0,47	0,98	1,12	0,07	0,82	0,95
50/50	A1	3,0	100	520	14,5	0,49	0,54	12,61	0,00	0,64	0,88	1,07	0,00	1,28	0,79

Fuente: Elaboración propia.

Modelo de Uzan

Con este modelo se obtienen valores de K1 que varían entre 12,69 y 160,19, y al igual que en el modelo K-θ los valores más altos se encontraron en las briquetas fabricadas con asfalto B1 y los más bajos con asfalto B2. Así mismo, se observa que los resultados de K2 varían entre 0,00 y 0,09 lo que corrobora la baja dependencia de los materiales tratados con asfalto espumado del estado de esfuerzos; por otro lado, los resultados de K3 muestran valores entre 0,16 y 0,64, lo que representa una

mayor dependencia de las mezclas al esfuerzo desviador que al invariante de esfuerzos θ, registrando resultados opuestos a los propuestos por autores como Santagata, Jenkins y Campagnoli.

La inclusión del esfuerzo desviador en la modelación del comportamiento de las mezclas genera que los valores de R² aumenten de 0,47 en promedio a 0,77.

Por otra parte, se observa que con el incremento del contenido de RAP el comportamiento de las mezclas es distinto para cada uno de los tipos de asfalto: para el tipo B1 se genera una mayor correlación entre el Mr y el σd, para el tipo B2 la correlación entre Mr y θ es variable, con picos en la mezcla 85/15 y la 50/50, mientras que para el tipo A1 la mezcla conserva una relación Mr-θ constante, lo que representa valores de K2 similares (figura 6).

Modelo τ octaédrico

El modelo τ octaédrico arroja valores de K1 que varían entre 0,85 y 3,37, pero los valores más altos son los obtenidos en las briquetas fabricadas con asfalto B1 y los más bajos con asfalto B2. En este modelo se observa que los resultados de K2 varían entre 0,00 y 0,19 lo que corrobora la baja dependencia de los materiales tratados

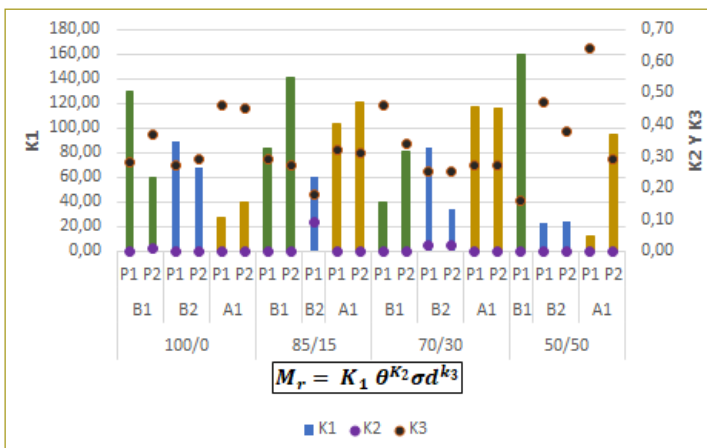


Figura 6. Valores de K1, K2 y K3 para los diferentes tipos de mezclas, modelo universal.

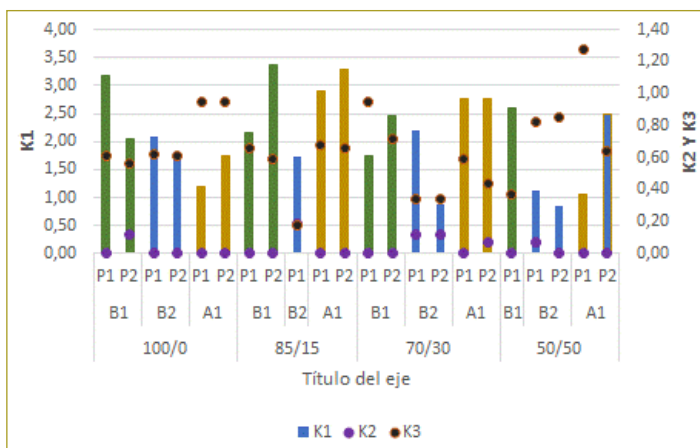


Figura 7. Valores de K1, K2 y K3 para los diferentes tipos de mezclas, modelo τ octaédrico.

con asfalto espumado del estado de esfuerzos; por otro lado, los resultados de K3 muestran valores entre 0,18 y 1,28, lo que representa una mayor dependencia de las mezclas al esfuerzo desviador que al invariante de esfuerzos θ ; esto da resultados opuestos a los propuestos por autores como Santagata, Jenkins y Campagnoli.

Igualmente, se observa que con el incremento del contenido de RAP la dependencia de la mezcla con el esfuerzo desviador aumenta, por lo que los valores de K3 son más altos para las mezclas 50/50 (figura 7).

CONCLUSIONES

- Los valores de módulo resiliente para todas las mezclas realizadas mostraron resultados acordes con lo encontrado en la bibliografía existente, que varían entre 150 MPa y 737 MPa.
- En el presente estudio no se encontró una tendencia definida entre el comportamiento del módulo resiliente y el incremento del RAP. Posiblemente se debe a que se tienen variables adicionales, como la gradación, el contenido de asfalto y el tipo de llenante utilizado para la fabricación de las probetas.
- Se observa en general que, contrario a lo indicado en la bibliografía técnica relacionada, los resultados de Mr son mucho más dependientes del esfuerzo

desviador - σ_d , que del invariante de esfuerzos θ ; es decir, los modelos que mejor representan la rigidez del material corresponden al modelo Uzan y el τ octaédrico o universal. No obstante, Ebels (2008) también encuentra en su trabajo que no existe una correlación directa entre el invariante de esfuerzos y el módulo resiliente para los materiales analizados en su proyecto.

- Los valores de k2 para los modelos Uzan y τ octaédrico muestran una tendencia a 0 en la mayoría de las mezclas evaluadas, lo que convierte en 1 el término evaluado, en este caso el invariante de esfuerzos θ , lo que confirma la menor dependencia de las mezclas del estado de esfuerzos.

REFERENCIAS

[1] Carlos, J. (2009). Estudio de las ventajas del "reciclado in situ" en caliente de pavimentos flexibles. Bogotá: Universidad de La Salle.

[2] Jenkins, K. J., & Mulusa, W. K. (2009). Updating Bituminous Stabilized Materials Guidelines: Mix Design Report, Phase II Task 2 - Development of a Simple Triaxial Test, 1–58.

[3] Asphalt Academy (2009). TG2-A guideline for the Design and construction of Bitumen Stabilised Materials (2nd ed.). Pretoria: Asphalt Academy.

[4] Wirtgen GmbH (2012). Wirtgen Cold Recycling Technology (1st ed.) (Wirtgen GmbH, Ed.). Windhagen, Alemania.

[5] DalBen, M. (2014). Resilient response and performance of bitumen stabilized materials with foam incorporating reclaimed asphalt. Thesis Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy (Engineering) at Stellenbosch University (January).

[6] Ebels, L. (2008). Characterisation of material properties and behaviour of cold bituminous mixtures (March).

[7] González, A. (2009). An experimental study of the deformational and performance characteristics of foamed bitumen stabilised pavements.

[8] Fu, P., Jones, D., Harvey, J. T., Bukhari, S. A., & Ave, O. S. (2009). Laboratory Test Methods for Foamed Asphalt Mix Resilient Modulus, 10(1), 187–212. doi:10.3166/RMPD.10.187-212.

[9] Hicks, R. G., & Monismith, C. L. (1971). Factors Influencing the Resilient Properties of Granular Materials. Transportation Research Record 345, Transportation Research Board. Washington, D.C.: National Research Council, pp. 15-31.

[10] Uzan, J. (1985). Characterization of Granular Material. Transportation Research Record 1022, TRB. Washington, D.C.: National Research Council, pp. 52-59.

[11] Jingang, W., Jenkins, K. J., Molenaar, A. A., & Shaopeng, W. (2011). Evaluation of Resilient Modulus Models for A High Quality Crushed Stone (p. 12).