

Metodología para la evaluación integral de la disponibilidad hídrica en regiones áridas y desérticas.

Comportamiento ante cargas estáticas de paneles de yeso en steel framing, sometidos a diferentes sollicitaciones como elementos no estructurales.

Máquina caracterizadora de materiales piezoeléctricos.

Caracterización hidroclimatológica y evaluación hidrológica de una cuenca natural y antrópica. Estimación de caudales medios y extremos.

Dispositivo para el ensayo de penetración estática de cono, utilizando sensores de presión hidráulica en el cono.

03 Julio - septiembre de 2021

ISSN 0121-5132
P.V.P. Colombia \$12.000,00



CONSEJO DIRECTIVO DE LA ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA

PRESIDENTE JAVIER BOTERO ÁLVAREZ

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

RECTOR HÉCTOR ALFONSO RODRÍGUEZ DÍAZ

SECRETARIA GENERAL CLAUDIA JEANNETH RÍOS REYES

REVISTA DE LA ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA

DIRECTOR JAIRO ALBERTO ROMERO ROJAS

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

DIRECCIÓN EDITORIAL CRISTINA SALAZAR PERDOMO

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

DIRECCIÓN COMERCIAL EDITORIAL ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA

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

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

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

5 / EDITORIAL

La tecnología

Jairo Alberto Romero Rojas

7-15

Metodología para la evaluación integral de la disponibilidad hídrica en regiones áridas y desérticas

Héctor Alfonso Rodríguez Díaz - Juan David Rodríguez Acevedo

El objetivo de esta investigación es desarrollar una metodología para la evaluación integral de la disponibilidad hídrica en regiones áridas y desérticas, a partir de la revisión del estado del arte de las metodologías y modelos existentes, su evaluación y el planteamiento de las características relevantes que se deben considerar en un modelo para este tipo de regiones, como el cambio en el almacenamiento subterráneo, la escala de tiempo, la variabilidad espacial, las características fisiográficas y el número de variables involucradas en la modelación.

17-31

Comportamiento ante cargas estáticas de paneles de yeso en *steel framing*, sometidos a diferentes solicitaciones como elementos no estructurales

Nancy Torres Castellanos - Yeison Siáchica Guerrero

Los paneles en steel framing (SF) se han utilizado desde mediados del siglo XIX; sin embargo, su concepción data de los principios del mismo siglo con el uso de madera para elaborar marcos o celosías (wood frame), remplazados posteriormente por acero al finalizar la Segunda Guerra Mundial, debido a que el empleo de la madera incrementó los incendios en las ciudades bombardeadas.

33-41

Máquina caracterizadora de materiales piezoeléctricos

Sebastián Donato Nova - Nicolás Fernández Moncada - Juan David Rincón - Santiago Jéjen Salinas - Daniel José González - Iván Camilo Durán Tovar

La sociedad, en su continua búsqueda de soluciones a las necesidades energéticas, ha explorado caminos que la han llevado a analizar incluso soluciones de microgeneración o nanogeneración, dando origen a técnicas conocidas como energy harvesting o cosechamiento de energía, que plantean la generación de energía eléctrica en forma renovable a partir de fuentes de origen natural o actividad humana, entre las cuales está el efecto piezoeléctrico.

43-57

Caracterización hidroclimatólogica y evaluación hidrológica de una cuenca natural y antrópica. Estimación de caudales medios y extremos

Alfonso Rodríguez Díaz - Ricardo Aguilar Piña - Andrés Otálora Carmona - Romeo Ramos

Se desarrolló una metodología para evaluar la disponibilidad de agua superficial en función de los requisitos establecidos por la compañía Drummond Ltd., que se encarga del desarrollo de la minería de superficie en el sur del departamento del Cesar (Colombia). La metodología incluye un balance hidrológico a largo plazo para estimar el caudal promedio en cualquier punto de una red de drenaje de una cuenca particular y establecer el caudal máximo para un periodo de retorno determinado, en puntos definidos previamente.

59-71

Dispositivo para el ensayo de penetración estática de cono, utilizando sensores de presión hidráulica en el cono

Wilson Andrés Vásquez Romero - Guillermo Pabón Gutiérrez

En este artículo se presentan el diseño, la fabricación y la puesta en marcha de un cono instrumentado usando sensores de presión hidráulica, el cual cuenta con un sistema de adquisición de datos y una máquina para hincarlo. El cono propuesto, que registra la fuerza en la punta y la fricción en el fuste, corresponde a una alternativa desarrollada en Colombia.

73 / ALCANCE Y POLÍTICAS

Editorial

La tecnología

JAIRO ALBERTO ROMERO ROJAS

Profesor titular de la Escuela Colombiana de Ingeniería

jairo.romero@escuelaing.edu.co

La intensa promoción de los medios virtuales de comunicación y su impacto en todas las actividades de la vida hacen que se tome como una panacea, que si no se aplica y no se conoce, nos hace sentir inútiles o, simplemente, como unos desadaptados sociales.

La tecnología –como se entiende en cuanto a los medios virtuales de comunicación– debe ser una herramienta y no un objetivo, pues desempeña un papel importante en nuestro desarrollo como agente facilitador de información y componente de cambios futuros; sin embargo, no podemos enfocarnos en su aplicación impositiva si no tomamos en cuenta que se requiere mantener la política esencial de que debe ser productiva y, además, proporcionar bienestar social.

El escenario obligado, impuesto por el requerimiento de que algunas actividades solo pueden hacerse virtualmente, revela la realidad de una tecnología obstruccionista de la atención inmediata, de difícil acceso a la satisfacción de nuestros requerimientos personales y con ausencia total de responsabilidad en la respuesta, que no debe continuar.

La experiencia con los servicios digitales no ha sido obtener mayor atención ni mucho menos facilitar el servicio. Se argumenta que con ellos se consigue una mayor satisfacción personal, pero la realidad no ha sido esa.

Lo peor ha sido la exigencia de realizar todo trámite con una institución mediante su página web o su aplicación, sin reconocer que no existe la seguridad de poder hacerlo y que, en muchos casos, no se dispone de la herramienta necesaria para esto. Por otra parte, nos enfrentamos a la siempre inoportuna respuesta de que el sistema no está disponible, que su clave es incorrecta o que debe cambiarla.

La ingeniería ha ayudado a hacer la transformación tecnológica de los medios para tramitar nuestros requerimientos ante toda institución pública y privada, con la reconocida implantación de dichos servicios, pero se requiere mantener las opciones de diligenciamiento presencial humano para permitir una permanente satisfacción de nuestras necesidades diarias.

Metodología para la evaluación integral de la disponibilidad hídrica en regiones áridas y desérticas

Methodology for a wholesome assessment of water availability in arid and desert regions

HÉCTOR ALFONSO RODRÍGUEZ DÍAZ¹ - JUAN DAVID RODRÍGUEZ ACEVEDO²

1. Profesor titular de la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Bogotá, D.C., Colombia.
2. Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Bogotá, D.C., Colombia.

alfonso.rodriguez@escuelaing.edu.co - juan.rodriguez@escuelaing.edu.co

Recibido: 15/01/2021 Aceptado: 10/02/2021

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

Resumen

Estimar la disponibilidad del recurso hídrico en regiones áridas y desérticas resulta un tema desafiante —pero a la vez necesario— para avanzar tanto en la gestión como en la accesibilidad del recurso para su aprovechamiento, uso y consumo. Estas regiones tienen limitaciones en la oferta natural, haciendo relevante e imprescindible considerar el análisis y la cuantificación del almacenamiento subterráneo.

El objetivo de esta investigación es desarrollar una metodología para la evaluación integral de la disponibilidad hídrica en regiones áridas y desérticas, a partir de la revisión del estado del arte de las metodologías y modelos existentes, su evaluación y el planteamiento de las características relevantes que se deben considerar en un modelo para este tipo de regiones, como el cambio en el almacenamiento subterráneo, la escala de tiempo, la variabilidad espacial, las características fisiográficas y el número de variables involucradas en la modelación.

Como resultado de esto, se plantea un modelo de balance hidrológico discretizado por celdas en la zona no saturada, con las mínimas variables posibles a una escala de tiempo mensual, apoyado en el álgebra de mapas para la estimación de los parámetros.

Palabras claves: escasez hídrica, regiones áridas, hidrología, recarga de agua subterránea, balance hídrico, métodos de estimación.

Abstract

Water availability estimation in arid and desert regions is a challenging issue, but necessary to advance in the management and accessibility of the resource for its exploitation, use, and human consumption. These regions present limitations in the natural supply, making it relevant and necessary to consider the analysis and quantification of groundwater storage.

The objective of this research is to develop a methodology for the integral evaluation of water availability in arid and desert regions. For this, the review and evaluation of the state of art different methodologies and models is carried out and the relevant characteristics to consider in a model for this type of regions are selected: the change in groundwater storage, the time scale, the spatial variability, the physiographic characteristics, and the number of variables involved in the modeling. As a result, a hydrological balance model is proposed, discretized by cells in the unsaturated zone, with the minimum possible variables on a monthly time scale, supported by the algebra of maps for the estimation of the parameters.

Keywords: water scarcity, arid regions, hydrology, groundwater recharge, water balance, estimation methods.

INTRODUCCIÓN

Uno de los mayores desafíos que enfrenta la humanidad actualmente es tener la disponibilidad de agua limpia y potable para su aprovechamiento, uso y consumo. La Organización de las Naciones Unidas (ONU) considera la necesidad de agua limpia y accesible para todos como uno de los diecisiete objetivos de desarrollo sostenible (ODS) para el año 2030 (United Nations - UN, 2015), con el fin de permitir que los gobiernos de todo el mundo enfoquen sus recursos y esfuerzos de manera integral y articulada para reducir la brecha de la desigualdad existente en la disponibilidad de este recurso vital.

En Colombia, hay que trabajar para mejorar los niveles de desigualdad y de desarrollo de soluciones que atiendan a los más necesitados. Una clara prueba de esto es la cobertura o acceso al agua potable en los municipios de los departamentos del Guainía, Chocó, La Guajira, Amazonas y Guaviare, cuyo promedio es tan solo del 30 % (DANE, 2018). En el caso de la llamada Media-Alta Guajira, la región más árida del país, conformada por los municipios de Manaure y Uribia, el acceso al agua potable no supera el 4 % (DANE, 2018).

Varias fuentes concuerdan en que la escasez de agua en el mundo tiene dos causas principales: la creciente variabilidad climática y el incremento de la demanda (Martín-Carrasco, Garrote, Iglesias & Mediero, 2012). Lo cierto es que, a pesar de décadas de investigación y planeación, la naturaleza de esta crisis es bastante compleja y aún hoy es difícil de definir, caracterizar y atender, lo que dificulta el adecuado planteamiento de soluciones útiles a escala regional (Srinivasan, Lambin, Gorelick & Thompson, 2012). En general, el estado actual del problema convoca a buscar y desarrollar soluciones y herramientas integrales que permitan reducir la inestabilidad del recurso para ciertas poblaciones, procurando la protección de las fuentes hídricas y mejorando las condiciones de pobreza y desigualdad existentes.

El problema de escasez de agua, específicamente en las regiones áridas y desérticas, es un claro indicio de que en todo el mundo muchas regiones han sufrido sequías prolongadas, e incluso se afirma que el cambio climático puede afectar todavía más estos periodos secos, en los que se espera que estas condiciones aumenten alrededor de un 30 % para finales de siglo (Kundzewicz et al., 2007). Esta situación afecta el abastecimiento de agua para los sectores productivos y otros, como la agricultura, en materia de calidad y cantidad, influyendo

directamente en la seguridad y la soberanía alimentarias (Ospina et al., 2017). El régimen hidrológico de dichas zonas es extremo y muy variable, por lo que estas se enfrentan a los mayores desafíos para suministrar y gestionar los recursos de agua dulce (Yazdandoost, 2015).

Para una gestión sostenible, los planificadores deben saber cuánta agua disponible existe en el sistema hidrológico, ya que esto les permitiría garantizar el suministro a todas las necesidades (urbano, agrícola, industrial) con extracción renovable, en especial a raíz del incremento de la población y las demandas urbanas, industriales y agrícolas (Pla, Valdés-Abellán, Tenza-Abril & Benavente, 2016). La gestión del agua tiene como objetivo resolver los posibles problemas futuros relacionados con los recursos hídricos que, para el caso de las regiones en estudio, se podrían amortiguar por medio de modelos y predicciones de la disponibilidad del recurso subterráneo (Emamgholizadeh, Moslemi & Karami, 2014).

A lo largo de este artículo se presenta el desarrollo de una metodología para evaluar la disponibilidad del recurso hídrico en regiones áridas y desérticas, teniendo en cuenta las caracterizaciones físicas e hidroclimatológicas, el almacenamiento subterráneo y la disponibilidad de información. Se parte de una revisión del estado del arte sobre las metodologías que permiten cuantificar la disponibilidad del recurso en función de la recarga subterránea, seguida de su análisis y evaluación, considerando los aspectos conceptuales y las características relevantes de un método hidrológico para la región. Finalmente, se presenta la metodología propuesta, basada en un balance hidrológico discretizado por celdas sobre la zona saturada, que permite obtener mapas de la recarga potencial a escala regional y a una escala de tiempo mensual.

CARACTERIZACIÓN CLIMATOLÓGICA DE LAS REGIONES ÁRIDAS Y DESÉRTICAS

Las regiones áridas y desérticas son aquellas en las que predomina una limitación o un déficit en la oferta natural de agua para diversos procesos físico-bióticos y socioeconómicos. Estas zonas cubren cerca del 30 % de la superficie de los continentes, están relacionadas con valores ecosistémicos tan importantes como el bosque seco, sirven de albergue de biodiversidad única en la escala global y están habitadas por cerca del 20 %

de la población mundial (Pabón & Alarcón, 2016). En Colombia, las zonas áridas y desérticas ocupan cerca del 15 % del territorio nacional. Son regiones muy sensibles a las fases extremas de la variabilidad climática (Sivakumar, Das & Brunini, 2005), en particular las asociadas a déficits de precipitación y sequías, a las que se exponen las comunidades establecidas allí, por lo general, altamente vulnerables.

Yazdandoost (2015) indica que las zonas áridas y semiáridas se definen como áreas en las que los regímenes de precipitaciones son intrínsecamente erráticos y en las que, comúnmente, las precipitaciones están por debajo de la evapotranspiración potencial. En estas regiones, el clima se caracteriza por presentar estaciones lluviosas cortas y periodos secos largos con alta evapotranspiración, por lo que se considera que las aguas superficiales son una fuente poco fiable del recurso (Izady et al., 2013). Por lo general, al analizar las condiciones hidrológicas superficiales en una región árida o desértica se puede encontrar que la evaporación supera los valores de precipitación durante la mayor parte del año, lo que da lugar a un déficit de humedad con muy pequeños periodos de exceso, que facilitan la recarga, el almacenamiento y la utilización del recurso. Este hecho es crucial en regiones semiáridas, caracterizadas por sufrir un alto grado de sensibilidad al clima, como consecuencia de lluvias altamente variables y significativamente más bajas que la tasa de evaporación (Mirzavand & Ghazavi, 2015).

Desarrollar un análisis de disponibilidad del recurso en una región árida o desértica resulta bastante complejo, teniendo en cuenta la escasa información disponible y la complejidad en el desarrollo de un balance hidrológico integral. Según Ospina et al. (2017), en una región árida o desértica existen condiciones extremas en todas las variables del estado, lo cual influye directamente en las condiciones de aridez, el acceso al agua, así como otros parámetros y variables relacionados con el recurso hídrico y, ciertamente, incide en las actividades y sectores que dependen de él.

Ospina et al. (2017) aseguran que el déficit del líquido se presenta durante la mayor parte del año, excepto en algunos periodos en los cuales el exceso permite la recarga y el almacenamiento subterráneo. Esto concuerda con lo que afirman otros investigadores, quienes evidencian la necesidad y la relevancia de contemplar la fuente subterránea para evaluar en forma adecuada

e integral la disponibilidad del recurso en este tipo de regiones (Izady et al., 2013).

Se puede aseverar que en las regiones áridas y desérticas se depende más del agua subterránea para satisfacer la demanda, debido a su amplia distribución y calidad potable (Vashisht, 2015), razón por la cual la estimación de la recarga subterránea del recurso hídrico es fundamental para determinar su disponibilidad y evaluar la vulnerabilidad del sistema (Pla, Valdés-Abellán, Tenza-Abril & Benavente, 2016). En algunos casos, considerando la cobertura del suelo, el almacenamiento de agua subterránea puede ser limitado; además, la gestión del recurso se rige por su naturaleza espacial, la recarga y la extracción local distribuida, en la que los suelos locales actúan como importantes depósitos para los residentes que no cuentan con otro suministro viable de agua (Earon & Olofsson, 2020).

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

La ecuación fundamental del balance hidrológico se basa en el principio de conservación de la masa. Su establecimiento se fundamenta en un procedimiento de la contabilidad del agua para un sistema hidrológico, mediante el uso de la ecuación de continuidad. Su forma más general corresponde a la diferencia de entradas “E” y salidas “S”, que equivale a la variación del almacenamiento “A”, como se muestra a continuación:

$$E - S = \Delta A \quad (1)$$

En el plano superficial, el balance general se construye a partir de la evapotranspiración, la lluvia, la infiltración y el escurrimiento. En el caso de las regiones en estudio, se requiere hacer el análisis a nivel subsuperficial, donde la recarga se vuelve el parámetro relevante que define la disponibilidad del recurso y donde aparece un conjunto de parámetros adicionales, de acuerdo con el método o las simplificaciones que se consideren en cada modelo. Una correcta evaluación de la recarga subterránea es fundamental para el cálculo de la disponibilidad de agua. Los métodos pueden estar definidos en la zona saturada o por encima de esta, conocida como zona de aireación o zona vadosa.

En la superficie se presentan los procesos de precipitación (PTP), evaporación (E), infiltración (I) y escorrentía (Q). A continuación, en la capa subsuperfi-

cial, conocida comúnmente como zona de aireación o vadosa, se contemplan la evapotranspiración (ET_o), la variación del almacenamiento (ΔS) y la recarga subterránea (R). Debajo de esta se encuentra la parte superior de la zona saturada, llamada nivel freático (NF). En el diagrama se puede ver cómo el suelo debajo del NF está saturado de agua. En esta última zona se producen la percolación (P) y el flujo lateral subterráneo (Q_o).

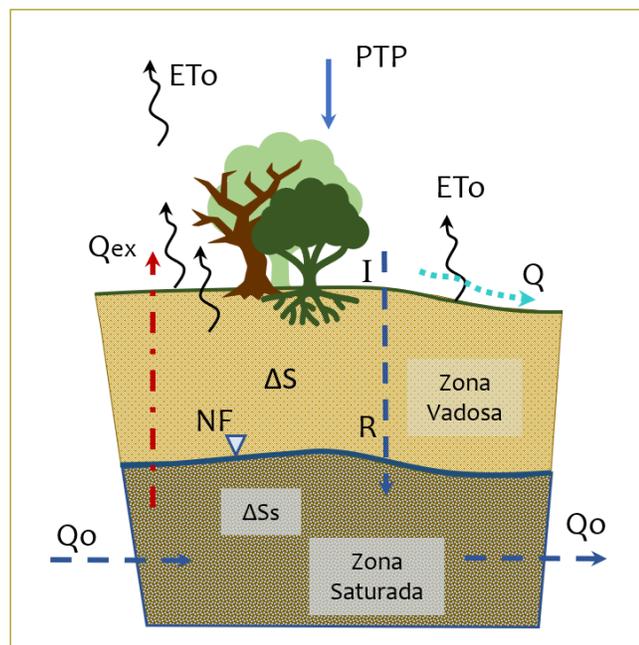


Figura 1. Esquema general de un proceso hidrológico con recarga subsuperficial.

En general, los acuíferos se recargan mediante la infiltración de la precipitación, pero existen muchos factores físicos, meteorológicos, topográficos y humanos que determinan la extensión y la velocidad a la que los acuíferos se llenan con agua.

Recarga subterránea

En términos generales, la recarga de las aguas subterráneas puede definirse como una adición de agua a la zona saturada, la cual puede producirse por motivos como los siguientes (Xu & Beekman, 2019):

- El flujo descendente de agua a través de la zona no saturada que llega a la capa freática.
- El flujo lateral o vertical entre acuíferos.

- La recarga inducida de las masas de agua superficiales cercanas, resultante de la extracción de agua subterránea.
- La recarga artificial.

El mecanismo de flujo a través de la zona no saturada puede ser de pistón o preferencial (macroporos). Con respecto a la periodicidad de la recarga, puede ser episódica (una vez cada varios años) o estacional, cuando ocurre en un periodo de días, meses o años, lo cual es muy común en las regiones tropicales.

Esta recarga puede estimarse de dos maneras: por encima de la zona saturada, como recarga potencial, o por debajo de esta, como recarga real (Souza et al., 2019). La determinación y la diferenciación de los eventos individuales de recarga de aguas subterráneas dentro de un sistema acuífero en zonas áridas no son directas ni fáciles. Esto es la consecuencia de la variabilidad espaciotemporal de los parámetros, como las precipitaciones, la topografía, la vegetación, y las características y el uso del suelo (Lerner et al., 1990). Cuanto mayor es la aridez del clima, menor y potencialmente más variable es el flujo de recarga (Xu & Beekman, 2019).

Evaluación de métodos hidrológicos

Actualmente, existen varios modelos o métodos para evaluar la disponibilidad de los recursos hídricos, en los que se incluyen los métodos empíricos –basados en la física mecánica–, los métodos con entorno de sistemas de distribución espacial y los métodos con modelos de inteligencia artificial (Izady et al., 2013; Earon & Olofsson, 2020). Para el caso de las regiones áridas y desérticas es clave considerar el delicado equilibrio hidrológico, en el que toda la naturaleza del ciclo y, por lo tanto, los parámetros de un modelo pueden verse alterados por secuencias prolongadas de clima húmedo o seco. A su vez, en estas regiones las precipitaciones tienden a ser más variables, tanto en el espacio como en el tiempo, que las zonas más húmedas (Virões & Cirilo, 2019).

De acuerdo con Huang et al. (2016), la mayoría de los modelos hidrológicos descritos en la bibliografía existente pueden representar la hidrología en regiones húmedas, pero esto no sucede cuando se trata de cuencas hidrográficas en territorios áridos. Al-Qurashi et al. (2008) atribuyen esta dificultad a la escasez generalizada de datos sobre precipitación, caudal, propiedades del

suelo y condiciones iniciales de humedad, así como a la influencia de la variabilidad de la vegetación estacional e interanual, a la complejidad de la morfología del curso de agua, a la dificultad de cuantificar las pérdidas por desbordamiento y a la inexactitud al estimar la evaporación potencial.

En el proceso de investigación, se revisaron y analizaron varios modelos o métodos hidrológicos para cuantificar la disponibilidad del recurso. En general, se pueden aplicar en dos zonas, con el objeto de cuantificar la disponibilidad del recurso: por encima de la zona saturada y en la zona saturada. Los primeros consisten en métodos de balance hídrico, que utilizan datos del clima y del suelo para estimar la cantidad de agua que pasa por la zona no saturada y se convierte en recarga potencial al llegar a la zona saturada, mientras que los modelos en la zona saturada trabajan regularmente con información de niveles freáticos o con métodos de seguimiento o trazadores.

Así mismo, dentro de cada zona (saturada y no saturada) los métodos se pueden clasificar en enfoques de balance hídrico, modelos físicos, modelos hidrogeológicos, métodos de trazadores químicos, modelos numéricos, separación del flujo base e, incluso, mediciones directas, utilizando la humedad del suelo mediante sensores y lisímetros (Souza et al., 2019; De Vries & Simmers, 2002; Udawatta et al., 2011).

Al aplicar el método deductivo teórico, el cual se apoya en datos generalmente aceptados para llegar a una conclusión particular, podemos partir de los conceptos teóricos planteados por otros autores en los métodos y modelos hidrológicos revisados para seleccionar los lineamientos o las características relevantes en un método hidrológico que permita cuantificar el recurso en las regiones en estudio. Son varias las cualidades requeridas en un modelo hidrológico integral, mencionadas por diversos autores e irrecusablemente aplicables para las regiones en estudio. Con base en lo anterior, se presentan siete parámetros seleccionados y considerados necesarios dentro de un modelo hidrológico para las regiones áridas y desérticas, con el fin de cuantificar la disponibilidad hídrica en las regiones áridas y desérticas:

- Recarga de agua subterránea.
- Escala del tiempo.
- Espacialidad de parámetros hidrológicos.
- Características fisiográficas de la región.

- Variabilidad y no linealidad de las pérdidas.
- Exceso de infiltración o saturación del suelo.
- Uso de pocos parámetros por la disponibilidad de información.

Con base en los lineamientos previamente definidos, se hace una valoración cualitativa de los métodos y modelos hidrológicos evaluados. La valoración consiste en analizar las características establecidas para cada método, obteniendo una calificación entre 0 y 1, donde 1 es un modelo ampliamente aceptado para el propósito y la región de estudio. El valor asignado a cada lineamiento se describe a continuación.

- **Escala de tiempo (ET).** Asigna un valor de **1** si el modelo trabaja a escala mensual o anual, como escala de tiempo apropiada para un modelo integral en la región de estudio. En caso contrario, se asigna un valor de **0**.
- **Variabilidad espacial (VE).** Valora si el método o modelo considera la variabilidad espacial de los parámetros hidroclimatológicos y del suelo. Los valores asignados son los siguientes: **2** si se considera variabilidad espacial discreta, **1** si se considera variabilidad espacial mediante subcuencas o subregiones y **0** si no se contempla.
- **Aplicación en regiones áridas y desérticas (RA).** Asigna un valor de **1** si el método se ha desarrollado o implementado en regiones áridas o desérticas. En caso contrario, se asigna un valor de **0**.
- **Recarga subterránea (RS).** Asigna un valor de **1** si en el método el objetivo es la estimación de la recarga, como parámetro representativo de la disponibilidad del recurso. En caso contrario, se asigna un valor de **0**.
- **Cantidad de parámetros base (PB).** Cuantifica la cantidad de parámetros y variables que requiere el método o modelo.
- **Características fisiográficas (CF).** Asigna un valor de **1** si el método considera las características fisiográficas, haciendo referencia a las características del ciclo hidrológico, a la forma y relieve de la superficie y a las características del suelo. En caso contrario, se asigna un valor de **0**.
- **Pérdidas y saturación del suelo (SS).** Asigna un valor de **1** si el método considera el exceso de saturación del suelo como recarga potencial. En caso contrario, se asigna un valor de **0**.

Finalmente, para la valoración total, se utiliza la siguiente relación:

$$\text{Valor estimado} = \frac{1}{9} \left(2ET + \frac{VE}{2} + RA + RS + \frac{2}{PB} + CF + SS \right) \quad (2)$$

Durante el proceso de análisis y la evaluación de los modelos y métodos hidrológicos estudiados, se concluyó que los de Bradbury y Balseq son los más apropiados para la evaluación integral de la disponibilidad hídrica en regiones áridas y desérticas, teniendo en cuenta sus características y su concordancia con los lineamientos establecidos. Así mismo, en los resultados de la valoración hecha (tabla 1), los métodos mejor evaluados son el método Bradbury, el modelo de balance hidrológico (WBM, por su sigla en inglés), el método Balseq y los modelos numéricos de flujo subterráneo.

Los modelos que consideran las características de la zona saturada, como los modelos numéricos de flujo subterráneo y el modelo Soil Moisture, son en general muy buenos y completos; sin embargo, requieren un proceso complejo y detallado de recopilación de información hidroclimatológica, del suelo y de la estructura

geológica para obtener un modelo aceptable. Además, se debe contar con suficiente información en calidad y cantidad para realizar una correcta calibración y verificación de los parámetros que contemplan, pues su aplicación en las regiones en estudio es bastante compleja, debido a la limitación en la información.

En el caso del modelo de balance hídrico (WBM, por su sigla en inglés), en la evaluación se concluyó que es más conveniente emplear metodologías que contemplen la distribución espacial del proceso hidrológico para determinar de manera integral la disponibilidad del recurso, teniendo en cuenta que con el modelo WBM se hace un balance hídrico regional, generalizando los parámetros cobertura y textura del suelo, sin considerar la variabilidad espacial. Por consiguiente, producto del proceso de evaluación y análisis, los modelos Balseq y Bradbury resultan ser los seleccionados para iniciar el planteamiento y el desarrollo de una metodología para evaluar integralmente la disponibilidad hídrica en regiones áridas y desérticas.

METODOLOGÍA PROPUESTA

Con el fin de estimar la disponibilidad hídrica para regiones áridas y desérticas, con base en la cuantificación

Tabla 1
Valoración total de los métodos y modelos hidrológicos

Método	Valoración							Valor estimado
	ET	VE	RA	RS	PB	CF	AS	
Bradbury	1	2	0	1	5	1	1	0,71
Balseq	1	1	0	1	5	1	1	0,66
WBM	1	0	1	1	5	1	1	0,71
Modhac	1	0	1	0	8	1	1	0,58
SMA	0	1	1	1	8	1	1	0,53
Seamud	0	1	0	1	8	1	1	0,42
Balance subterráneo	1	0	1	1	9	0	0	0,47
WTF	0	1	1	1	3	0	0	0,35
CMB	0	1	1	1	3	0	0	0,35
RIB	0	1	1	1	4	0	0	0,33
Flujo subterráneo	1	2	1	1	5	0	0	0,60

Nota: Evaluación cualitativa de los métodos o modelos para la estimación de la disponibilidad hídrica, con base en la información obtenida y los lineamientos definidos.

^[1] Con base en los lineamientos conceptuales definidos en el proceso de investigación, los métodos o modelos hidrológicos se evaluaron de acuerdo con seis parámetros: variabilidad espacial discreta (VE), uso en regiones áridas o desérticas (RA), estimación de la recarga como propósito (RS), cantidad de parámetros base (PB), características fisiográficas (CF) y pérdidas y saturación del suelo (SS).

de la recarga potencial del recurso subsuperficial, se propone un método de balance hidrológico por encima de la zona saturada, que permita contemplar la variabilidad espacial por medio de un sistema de información geográfica (SIG). Es un método sencillo, que utiliza la información mínima disponible y considera las características fisiográficas y la distribución espacial del proceso hidrológico, generando como resultado un mapa de la recarga potencial neta del recurso subsuperficial.

En la figura siguiente (figura 2) se presenta el esquema del balance hidrológico propuesto, especializado o segmentado en celdas de igual tamaño, con el propósito de considerar la variabilidad espacial de las características fisiográficas. Se propone el uso de álgebra de mapas para la estimación de los parámetros utilizados en el balance. El modelo parte de información topográfica, hidroclimatológica de precipitación (P) y temperatura (T), así como las características de cobertura y tipo del suelo, empleando el enfoque del número de curva (SCS). El balance se hace para cada celda, soportado en herramientas geográficas y tomando en cuenta la distribución espacial y temporal de los parámetros.

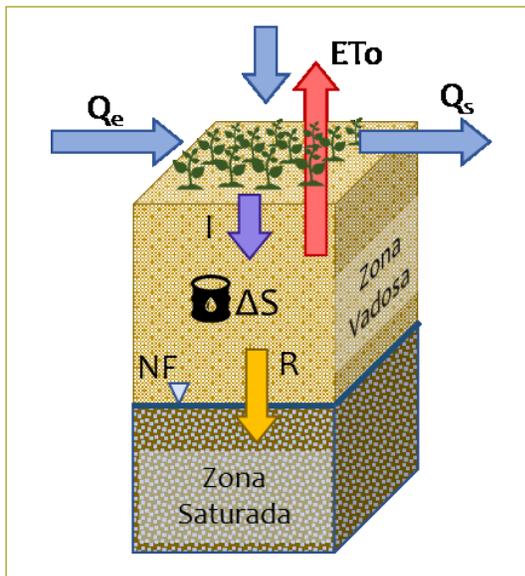


Figura 2. Esquema del balance hidrológico propuesto.

En la metodología se considera la recarga directa, proveniente de la precipitación, que llega a la zona no saturada y modifica así la humedad del suelo, que posteriormente se convierte en recarga potencial al pasar

al almacenamiento subterráneo o zona saturada. Se estableció un concepto de almacenamiento de agua del suelo para representar el flujo a través del suelo o zona vadosa, hasta la zona saturada; es decir, se consideró al suelo como una reserva de agua. La recarga potencial (R) solo se produce si el almacenamiento del suelo, representado por la capacidad de campo o capacidad máxima de almacenamiento ($S_{máx}$), está completamente lleno.

En la metodología se propone, en concordancia con el modelo Bradbury y otros autores, que la recarga es la entrada de agua dentro de la zona saturada en el momento en el que comienza a formar parte de las reservas subterráneas, producto del movimiento descendente del agua. Igualmente, considera que la escorrentía se puede infiltrar a medida que avanza de acuerdo con las direcciones de flujo, a diferencia de otros modelos. A renglón seguido se describe el balance hidrológico sobre la zona saturada en cada una de las celdas del modelo espacial y para cada periodo de tiempo definido (ecuación 3).

$$(P + Q_e - Q_s - ET_o - \Delta S_{zns} = R)_{\{(i,j),t\}} \quad (3)$$

Donde:

R: recarga potencial.

P: precipitación total sobre la celda.

Q_e : escorrentía superficial de entrada proveniente de otras celdas.

Q_s : escorrentía superficial de salida, generada y dirigida a otras celdas.

ET_o : evapotranspiración real en la celda.

ΔS_{zns} : cambio en la humedad del suelo de la celda.

CONCLUSIONES

- Dado que las regiones áridas y desérticas son las zonas objeto de la investigación, al hacer las abstracciones del caso, derivadas del análisis de variables y la disponibilidad de información, con el método propuesto se evalúa la disponibilidad de agua, sin considerar la zona saturada.
- Las regiones áridas y desérticas tienen marcadas limitaciones en la oferta natural de agua, con largos periodos de sequía, convirtiendo las aguas superficiales en una fuente poco fiable del recurso para su uso y aprovechamiento. Adicionalmente, estas regiones presentan dificultad y escasez generalizada de información.

- En el marco de la evaluación integral de la disponibilidad del recurso hídrico en estas regiones, se hace relevante y necesario considerar el análisis y la cuantificación del almacenamiento subterráneo.
- Los métodos hidrológicos desarrollados específicamente para regiones áridas y desérticas son escasos. Los estudios efectuados en estas regiones parten de modelos diseñados en principio para otro tipo de regiones y ajustados según la disponibilidad de información.
- Las principales características requeridas en un modelo hidrológico integral para las regiones en estudio son el cambio en el almacenamiento subterráneo, la escala de tiempo, la variabilidad espacial, las características fisiográficas y la cantidad de variables involucradas en la modelación.
- En las regiones áridas y desérticas, los modelos utilizan escalas de tiempo muy grandes debido a la escasez de información, con lo cual la variabilidad espacial y temporal de la precipitación se convierte en un parámetro muy relevante para la cuantificación de la disponibilidad del recurso.
- En lo referente a los métodos hidrológicos evaluados, la mejor valoración la obtuvieron los métodos de Bradbury, WBM y Balseq, que son métodos de balance hidrológico por encima de la zona saturada y parten de la precipitación para estimar la recarga potencial.
- La metodología propuesta para cuantificar la disponibilidad del recurso en las regiones áridas y desérticas consiste en un balance hidrológico discretizado por celdas, con las mínimas variables posibles a una escala de tiempo mensual o anual.
- Con el fin de considerar la espacialidad de los parámetros, en la metodología propuesta se emplea álgebra de mapas para estimar las variables requeridas en el balance hidrológico por celda.
- En la metodología propuesta se estima la cantidad de agua proveniente de la precipitación, que llega a la zona no saturada (modificando la humedad del suelo) y que se convierte posteriormente en recarga potencial al pasar a la zona saturada.
- Al evaluar la disponibilidad de información en las regiones en estudio, en la metodología propuesta para la cuantificación del recurso se consideran únicamente las variables de precipitación, temperatura, características del terreno y del suelo.
- Los datos de precipitación y temperatura se pueden obtener a partir de la medición de estaciones meteorológicas o climatológicas. Para las zonas con registros instrumentados insuficientes se recomienda utilizar datos de información satelital, como la base de datos Chirps para la precipitación y ERAS5 o la NOAA para los datos de temperatura.
- Para la metodología propuesta, se puede estimar la evapotranspiración a partir de los datos de temperatura y precipitación.
- Para considerar las características del suelo, en la metodología propuesta se plantea el empleo del método del número de curva (CN) para estimar la precipitación efectiva, que se convertirá luego en escorrentía y en infiltración.
- Como fuentes de información se proponen los mapas de suelos del territorio colombiano y de clasificación de las tierras por su vocación de uso, que permitan tener una buena aproximación a las características de la cobertura o tipo de suelo y estimar el número de curva (CN) para cada celda, así como la capacidad máxima de almacenamiento en el suelo o zona no saturada.
- Para el registro de las variables hidrológicas y del suelo se propone ampliar la instrumentación en las regiones áridas y desérticas, que además permite avanzar en las metodologías de estimación del recurso hídrico y, consecuentemente, en su gestión.
- En las regiones áridas y desérticas de países desarrollados, que disponen de mayor instrumentación e información, se pueden aplicar métodos más detallados y con escalas de tiempo más pequeñas. En la evaluación se destacan el método *Soil Moisture Accounting* (SMA) y los modelos numéricos de flujo subterráneo.
- Se recomienda aplicar la metodología propuesta en el presente proyecto de investigación en un caso de estudio específico.

REFERENCIAS

- DANE (2018). *Departamento Administrativo Nacional de Estadística*. Obtenido de Censo Nacional de Población y Vivienda. Servicios Públicos: <https://dane.maps.arcgis.com/apps/MapSeries/index.html?appid=2749922ca5f8469db9990986c02b1b93>.
- Fitts, C. R. (2012). *Groundwater science* (2nd ed.). Waltham, MA: Academic Press, Elsevier.
- Hirata, R., Zoby, J., & Oliveira, F. (2017). *Groundwater: strategic or emergency reserve*. En C. Bicudo, T. J.G. & S. MCB (eds.). Cham: Springer.

- Martín-Carrasco, F., Garrote, L., Iglesias, A., & Mediero, L. (2012, 11 de julio de 2012). Diagnosing causes of water scarcity in complex water resources systems and identifying risk management actions. *Water Resources Management*, 27. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11269-012-0081-6>.
- Ospina, J., Domínguez, C., Vega, E., ... Rodríguez, M. (2017). Analysis of the water balance under regional scenarios of climate change for arid zones of Colombia. *Atmosfera* 30 (1), 63-76. DOI: 10.20937/ATM.2017.30.01.06.
- Pabón C., J. D., & Alarcón H., J. C. (2016). The effects of climate change on arid and semi-arid areas of Colombia. *InterCarto. InterGIS*, 1(22), 56-62. DOI: 10.24057/2414-9179-2016-1-22-56-62.
- Schumann, A. H. (1998). Infiltration: Introduction. En R. W. Herschy & R. W. Fairbridge (eds.), *Hydrology and lakes. Encyclopedia of earth science*. Dordrecht: Springer. DOI: https://doi.org/10.1007/1-4020-4513-1_129.
- Sivakumar, M., Das, H., & Brunini, O. (2005). Impacts of present and future climate variability and change on agriculture and forestry in the arid and semi-arid tropics. *Climate Change*, 70(1), 31-72.
- Srinivasan, V., Lambin, E., Gorelick, S., & Thompson, B. R. (2012, October). The nature and causes of the global water crisis: syndromes from a meta-analysis of coupled human-water studies. *Water Resources Research*, 48 (10), 48. DOI: 10.1029/2011WR011087.
- United Nations - UN (2015, September 25). *Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development (A/RES/70/1)*. General Assembly. Obtenido de https://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/70/1&Lang=E.

Comportamiento ante cargas estáticas de paneles de yeso en *steel framing*, sometidos a diferentes sollicitaciones como elementos no estructurales

Static load behavior in steel framing plaster panels, subjected to different demands as non-structural elements

NANCY TORRES CASTELLANOS¹ - YEISON SIÁCHICA GUERRERO²

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

2. Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Ingeniería Estructural.

nancy.torres@escuelaing.edu.co - yeison.siachica@mail.escuelaing.edu.co

Recibido: 21/01/2021 Aceptado: 12/02/2021

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

Resumen

Los paneles en *steel framing* (SF) se han utilizado desde mediados del siglo XIX; sin embargo, su concepción data de los principios del mismo siglo con el uso de madera para elaborar marcos o celosías (*wood frame*), remplazados posteriormente por acero al finalizar la Segunda Guerra Mundial, debido a que el empleo de la madera incrementó los incendios en las ciudades bombardeadas. A partir de entonces se inició la industrialización del SF, potenciando la construcción de edificaciones para diferentes usos.

En Colombia, gracias a su rendimiento en la etapa de construcción, se utiliza en muros divisorios y estructuras no portantes, en remplazo de la mampostería tradicional, lo que permite a constructoras disminuir los tiempos de ejecución en obra y, por lo tanto, sus costos operativos. Tomando en cuenta el crecimiento en otros países y las ventajas que ofrece el sistema SF, los autores de este artículo consideran pertinente poner en conocimiento del lector algunas de las bondades que este sistema ofrece, implementado como sistema de construcción principal. Así las cosas, la metodología que se desarrolló en esta investigación tiene un alto componente experimental, la cual consistió en evaluar 18 paneles de una y dos secciones, revestidas con placas de yeso en sus dos caras, logrando un espesor final de 12 cm; los perfiles utilizados fueron

calibre 20, o 0,836 mm de espesor; las alturas de los paneles fueron de 2,44 m, con anchos variables de 1,22 m y 2,44 m. Los paneles se sometieron a cargas estáticas axiales, fuera del plano y en él.

Los resultados de este proyecto experimental se compararon con las capacidades máximas obtenidas teóricamente, siguiendo la metodología presentada por el American Iron and Steel Institute (AISI). Se encontró que para los ensayos a flexión hay una variación importante en la relación capacidad teórica/capacidad experimental, en la cual se concluye que existe una sobrestimación de la capacidad del panel a flexión; igualmente, se compararon los resultados para los ensayos a compresión y corte lateral, y se halló una variación menor entre la relación de capacidad teórica/capacidad experimental, por lo que es posible implementar la metodología propuesta por AISI, ya que predice valores coherentes para el diseño de estas estructuras a corte y compresión.

Palabras claves: *steel framing*, sistema liviano, revestimiento en láminas de yeso, cargas estáticas.

Abstract

Steel framing (SF) panels have been used since the mid-nineteenth century, however, its conception dates to the beginning of the same century with the use of wood to make frames or lattices (wood frame),

which were later replaced by steel at the end of the Second World War, because the use of wood enhanced the fires in the bombed cities. Since then, the industrialization of steel framing began, promoting the construction of buildings for different uses.

In Colombia, thanks to its performance in the construction stage, it is used in dividing walls and non-load-bearing structures, replacing traditional masonry, which allows construction companies to reduce on-site execution times and therefore their operating costs.

Considering the growth in other countries and the advantages offered by the Steel framing system, the author of this document considers it pertinent to inform the reader of some of the benefits that this system offers, implemented as the main construction system. In such a way that the methodology developed in this research has a high experimental component, which consisted of evaluating 18 panels of one and two sections coated with gypsum boards on both sides, achieving a final thickness of 12 cm, the profiles used were 20 gauge or 0.836 mm thick, the heights of the panels were 2.44 m with variable width of 1.22 m and 2.44 m. The panels were subjected to static axial, out-of-plane, and in-plane loads.

The results of this experimental project were compared with the maximum capacities obtained theoretically, following the methodology presented by the American Iron and steel institute (AISI), finding that for the flexural tests there is an important variation in the theoretical capacity / experimental capacity ratio. The results for compression and lateral shear tests were also compared, finding a smaller variation between the ratio of theoretical capacity / experimental capacity, therefore, the methodology proposed by AISI can be implemented, since it predicts consistent values for the design of these structures in shear and compression.

Keywords: steel framing, lightweight system, gypsum sheathing, static loads.

INTRODUCCIÓN

La población mundial aumentará en dos mil millones para 2050. Este crecimiento (más rápido de lo previsto) ha llevado al ser humano a buscar nuevos sistemas de construcción que sean de fácil aplicación, con poco desperdicio y bajo costo. Los materiales de construcción han tenido un papel clave en el desarrollo de la civilización, particularmente el yeso y el acero, puesto que han contribuido en gran medida al crecimiento de viviendas urbanas y rurales.

Por otra parte, en el siglo XIX se utilizaba la madera en la construcción de casas en Japón y Norteamérica, ya que este era un material fácil de conseguir y de trabajar para la elaboración de celosías de bajo peso, fácil armado y buen desempeño (*wood framing*). No obstante, al finalizar la Segunda Guerra Mundial, Japón eliminó el uso de la madera como material de construcción para estructuras portantes, pues la madera fue un factor que maximizó el daño ante los bombardeos; además, con esta medida, buscaba disminuir la deforestación.

Como resultado de esto, en Japón y en otras partes del mundo se inició la industrialización del acero formado en frío para remplazar las celosías en madera por celosías en acero (*steel framing*), y aprovechando el auge de los paneles de yeso se construyeron casas portantes en SF revestidas de yeso y fibrocemento (Cristina & De Crasto, 2007).

Desde entonces, el desarrollo de marcos metálicos revestidos con paneles de yeso se ha convertido en un sistema ampliamente utilizado en Europa, Norteamérica y Latinoamérica; su uso se centró en la construcción de paneles divisorios, paneles para fachada, entresijos y cielos rasos, sobre todo en Estados Unidos (Chicago, especialmente), Brasil, Perú, Argentina y Chile, países en los que se implementó en mayor medida el sistema en la construcción.

En la actualidad, el *steel framing* y otras tecnologías resultan afectadas por falta de interés en la investigación de su comportamiento estructural, puesto que en el medio colombiano de la construcción hay gran variedad de sistemas constructivos que parecen de uso estándar y no estructural, pero que también se pueden utilizar específicamente con el conocimiento adecuado. La construcción en Colombia está enfocada en sistemas y materiales tradicionales como el concreto y la mampostería, que causan un mayor impacto ambiental.

En consecuencia, la mayoría de las investigaciones están enfocadas en el comportamiento del concreto, anclajes y muros en mampostería, dejando de lado sistemas como el SF y su comportamiento ante cargas verticales y laterales. No obstante, en los últimos años se ha incrementado el uso del *steel framing* en algunos países de Latinoamérica, por lo cual es probable que, a corto plazo, se acepte en Colombia como sistema estructural; por lo tanto, mediante este trabajo se considera pertinente hacer aportes sobre su comportamiento ante diferentes solicitaciones, con el propósito de poder evaluar estructuras actuales y construir adecuadamente edificaciones que cumplan desde todo punto de vista con los lineamientos exigidos por la NSR.

El objetivo de este trabajo de grado consistió en evaluar el comportamiento del sistema *steel framing* revestido con placas de yeso, ante cargas fuera del plano y en él, en dos tipologías: panel simple y panel doble, con dimensiones comunes para el uso en edificación, simulando las cargas a las cuales estaría expuesta una estructura de este tipo, evaluando el comportamiento en

cuanto a su deformación y capacidad máxima de carga. Esto se hace con el fin de que el *steel framing* se presente como una oportunidad de construir de una manera más limpia, implementando tecnologías recientes de menor impacto ambiental, sin dejar de lado la comodidad y la seguridad de las construcciones actuales.

Cálculo de capacidades teóricas

A continuación, se presentan las ecuaciones utilizadas para el cálculo de la capacidad teórica en paneles sometidos a carga axial.

Primero se verifica la relación de esbeltez del elemento, teniendo en cuenta el arriostramiento causado por el revestimiento y las condiciones de apoyo.

- **Pandeo global**

$$K * L_y = 2 * l \quad (1)$$

$$\frac{K * L_y}{r_y} \quad (2)$$

Posteriormente, se deberá revisar el esfuerzo por pandeo alrededor del eje que controle, esto es, el que tenga mayor esbeltez, en la siguiente forma:

$$F_{cre} = \frac{\pi^2 * E}{\frac{KL}{r^2}} \quad (3)$$

- **Pandeo por flexotorsión**

Para el pandeo por flexotorsión, se debe utilizar la longitud no arriostrada, por lo que el esfuerzo se podrá calcular como:

$$F_{cre} = \frac{1}{2\beta} * (\sigma_{ex} + \sigma_t) - \sqrt{(\sigma_{ex} + \sigma_t)^2 - 4 * \beta * \sigma_{ex} * \sigma_t} \quad (4)$$

Donde:

$$\sigma_{ex} = \frac{\pi^2 * E}{\frac{KL}{r^2}} \quad (5)$$

$$\sigma_t = \frac{1}{A * r_o^2} * \left(G * J + \frac{\pi^2 * E * C_w}{L^2} \right) \quad (6)$$

$$\beta = 1 - \frac{X_o^2}{r_o} \quad (7)$$

Se deben comparar los dos valores de esfuerzo y tomar el valor que controla, esto es, el menor. Por último, se calcula la fuerza axial nominal para pandeo global, así:

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{F_y}{F_{cre}}} \quad (8)$$

Para $\lambda_c \leq 1,5$

$$F_n = (0,658^{\lambda_c}) * F_y \quad (9)$$

Para $\lambda_c > 1,5$

$$F_n = \left(\frac{0,877}{\lambda_c^2} \right) * F_y \quad (10)$$

$$P_n = A_g * F_n \quad (11)$$

- **Fuerza nominal axial**

Ahora se procede a calcular la carga axial nominal por pandeo local, de acuerdo con lo descrito en AISI S100.

$$P_{nl} = A_e * F_n \quad (12)$$

Donde:

$$A_e = U_{s1} * A_{nt} \quad (13)$$

$$A_{nt} = A_g - n_b * d_h * t + t * [s^2 / (4 * g + 2d_h)] \quad (14)$$

U_{s1} es un valor proporcionado por AISI S100.

- **Capacidad limitada por la conexión**

Se debe revisar el límite entre la conexión del revestimiento al panel; para este caso, AISI S240 presenta la máxima carga especificada por el espesor del revestimiento en yeso y el número de tornillo.

Tabla 1

Máxima carga axial nominal
 Maximum Axial Nominal Load (Specified Load)
 Limited by Gypsum Sheathing-to-Wall Stud Connection Capacity

Gypsum Sheathing	Screw Size	Maximum Nominal (Specified) Stud Axial Load
1/2 inch (12,7 mm)	N.º 6	5,8 kips (25,8 kN)
1/2 inch (12,7 mm)	N.º 8	6,7 kips (29,8 kN)
5/8 inch (15,9 mm)	N.º 6	6,8 kips (30,2 kN)
5/8 inch (15,9 mm)	N.º 8	7,8 kips (34,7 kN)

Fuente: AISI. S240.

Por último, se determina la fuerza axial admisible del conjunto por LRFD, así:

$$\Phi=0,85$$

$$\varphi * P_n \tag{15}$$

Diseño de panel sometido a carga lateral

Siguiendo los parámetros descritos en AISI S400, la resistencia nominal al corte se determina de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

$$V_n = v_n * w \tag{16}$$

$$\frac{h}{w} \leq 2 \tag{17}$$

Donde:

h = altura del muro de corte.

w = ancho del muro de corte.

v_n = resistencia nominal a corte por unidad de longitud determinada de AISI S400.

$$\Phi=0,7$$

Diseño a flexión de paneles revestidos con láminas de yeso

Existen varios métodos para determinar la capacidad a flexión, pero la elección de este dependerá de la precisión que se desee; cuando se utiliza el revestimiento, se genera una restricción discreta, lo que significa que el revestimiento arriestra las vigas, ocasionando que se pueda evitar el pandeo global. Por lo tanto, el pandeo local y la fuerza nominal a causa del pandeo por dis-

torsión podrán establecerse siguiendo el procedimiento descrito a continuación:

- **Momento nominal considerando el pandeo local**

$$M_{nl} = S_e * F_y \tag{18}$$

- **Momento nominal por distorsión**

Para determinar la fuerza de pandeo por distorsión, es necesario establecer el momento por pandeo de distorsión; hay que tomar en cuenta las restricciones generadas por las conexiones del revestimiento y el módulo del revestimiento utilizado.

$$k_{\varphi w} = EI_w/L_1 + EI_w/L_2 \tag{19}$$

Donde:

EI_w= módulo de rigidez de las láminas de yeso. N-mm²/mm.

L1 y L2 = ver figura 13.

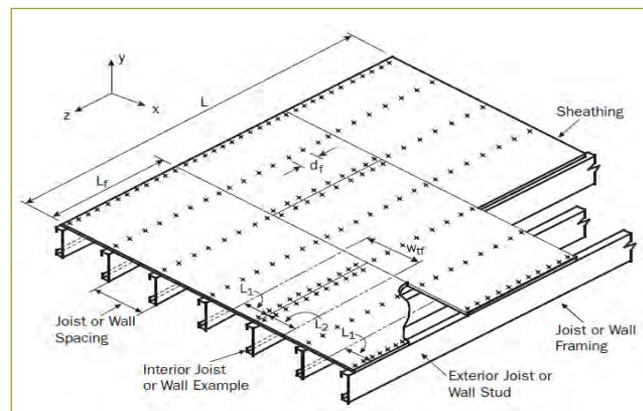


Figura 1. Dimensiones utilizadas en el diseño a momento.

Fuente: Yu (2003).

Posteriormente, se debe seleccionar el valor de k_φ de acuerdo con el espesor del perfil para poder obtener k_φ; la rigidez elástica rotacional y la geométrica por la conexión se obtienen a partir de:

Tabla 2
Restricción rotacional

T (mils)	t (in.)	k _{φc} (lbf-in/in./rad)	k _{φc} (N-mm/mm/rad)
18	0,018	78	348
27	0,027	43	367
30	0,03	84	375
33	0,033	86	384
43	0,043	94	419
54	0,054	105	468
68	0,068	123	546
97	0,097	172	766

Fuente: Yu (2003).

Tabla 3
Rigidez de la lámina de yeso

Board Thickness (in.) (mm)	EI (Lbf-in ² /in) of width (N-mm ² /mm)
0,5 (12,7)	1500 to 4000 (220.000 to 580.000)
0,625 (15,9)	3000 to 8000 (440.000 to 1.160.000)

Fuente: Yu (2003).

Obtenidos los valores, hay que tomar en cuenta las propiedades de la sección:

$$A_f = (b + d)t \quad (20)$$

$$J_f = \frac{1}{3}bt^3 + \frac{1}{3}dt^3 \quad (21)$$

$$I_{xf} = \frac{t(t^2b^2 + 4bd^3 + t^2bd + d^4)}{12(b + d)} \quad (22)$$

$$I_{yf} = \frac{t(b^4 + 4db^3)}{12(b + d)} \quad (23)$$

$$I_{xyf} = \frac{tb^2d^2}{4(b + d)} \quad (24)$$

$$C_{wf} = 0 \quad (25)$$

$$X_{of} = \frac{b^2}{2(b + d)} \quad (26)$$

$$h_{xf} = \frac{-(b^2 + 2db)}{2(b + d)} \quad (27)$$

$$h_{yf} = y_{of} = \frac{-d^2}{2(b + d)} \quad (28)$$

Ahora podrán remplazarse en las siguientes ecuaciones:

$$K_\varphi = (1/k_{\varphi w} + 1/k_{\varphi c}) - 1 \quad (29)$$

$$K_{\varphi fe} = \left(\frac{\pi}{L}\right)^4 \left(EI_{xf} * (X_{of} - h_{xf})^2 + EC_{wf} - E \frac{I_{xyf}^2}{I_{yf}} (X_{of} - h_{xf})^2 \right) + \left(\frac{\pi}{L}\right)^2 * G * J_f \quad (30)$$

$$K_{\varphi we} = \left(\frac{E * t^3}{6ho(1 - \mu^2)}\right) \quad (31)$$

$$K_{\varphi wg} = \left(\frac{\pi}{L}\right)^2 * \left(\frac{t * ho^3}{60}\right) \quad (32)$$

Por último, el momento por deformación elástica se evalúa a partir de la siguiente ecuación:

$$M_{crd} = S_f * F_{crd} \quad (33)$$

Donde:

$$F_{crd} = \beta * \frac{k_{\varphi fe} + k_{\varphi we} + k_\varphi}{k_{\varphi fg} + k_{\varphi wg}} \quad (34)$$

$$S_f = \frac{I_x}{\frac{ho}{2}} \quad (35)$$

Para una sección C - Stud, se tiene que el momento por pandeo distorsional se calcula siguiendo esta ecuación:

$$\lambda_d = \sqrt{\frac{M_y}{M_{crd}}} \quad (36)$$

$$M_{nd} = \left[1 - 0,22 \left(\frac{M_{crd}}{M_y} \right)^{0,5} \right] \left(\frac{M_{crd}}{M_y} \right)^{0,5} M_y \quad (37)$$

Coefficiente de capacidad de disipación básico (R)

Para evaluar el coeficiente de capacidad de disipación de energía básico debido a la ductilidad R_μ , se utilizó el método planteado en una de las investigaciones hechas por Newmark y Hall (1982; Rochel Awad, 2012). En esta se establece que el parámetro es sensible al periodo de la estructura, por lo cual se usa el criterio de igualdad de desplazamiento e igualdad de energía.

Concluyendo que, para periodos $T > 1$

$$R = \mu \quad (38)$$

Donde:

$$\mu = \delta u / \delta y \quad (45)$$

y para periodos cortos: $0,12 \text{ s} \leq T \leq$

$$R = \sqrt{2\mu - 1} \quad (46)$$

RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIÓN

Compresión

En primer lugar, se obtuvo el peso de la viga usada en el montaje para adicionarlo a la carga registrada por la celda durante el ensayo; se instrumentó en ambas caras del panel, mediante 4 LVDt colocados en dirección axial, con el objeto de observar y promediar la deformación unitaria en una longitud de 1,37 m (fotografía 1), el ensayo se realizó siguiendo el protocolo de carga con incrementos del 25 % la capacidad máxima teórica, de acuerdo con lo especificado en la guía ASTM-E72.

La capacidad de los paneles en compresión se evaluó según lo descrito en ASTM E-72, y para los paneles simples se obtuvo un valor de capacidad igual a 101 kN y para los paneles dobles, 177 kN. Se descartaron dos muestras por problemas en el montaje.



Fotografía 1. Instrumentación de ensayos a compresión.

A renglón seguido, se pueden observar las envolventes de los ensayos estáticos (gráfico 1):

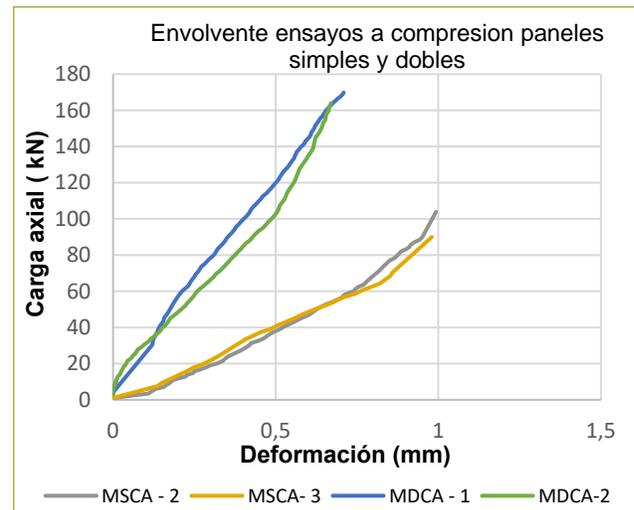


Gráfico 1. Envolvente ensayo a compresión paneles simples y dobles.

Se observa que los paneles simples y dobles tienen un comportamiento lineal, hasta alcanzar la capacidad máxima; sin embargo, el panel simple tiene un mayor acortamiento, lo que se atribuye a la estabilidad que da

utilizar un espécimen con un ancho menor, puesto que el panel doble fue más propenso a salirse de su plano.

No se pudo identificar un pandeo general en el panel, pues el lugar de la falla no fue predecible; también se evidenció que una vez que el panel alcanza su capacidad máxima, se presenta una falla súbita en las dos tipologías.

A continuación, se muestran las diferencias porcentuales entre la carga teórica y la carga experimental.

Tabla 4
Comparación de valores teóricos vs. experimentales.
Paneles dobles

Tipo	Carga Teórica (kN)	Carga experimental (kN)	Diferencia teórico vs. experimental
MSCA-2	101	103	2 %
MSCA-3	101	89	-11 %
MDCA-1	177	170	-3 %
MDCA-2	177	165	-6 %

Consecuentemente con los valores que aparecen en la tabla anterior (tabla 4) con respecto a las variaciones teórico vs. experimentales, estas fueron menores, lo cual significa que la metodología propuesta por AISI tiene una buena aproximación a la capacidad máxima de carga real.

Lo anterior se puede observar de mejor modo en un gráfico (gráfico 2), en el que se evidencia que las relaciones de capacidad se aproximan a uno, lo cual indica que la metodología unificada es óptima para el desarrollo de estas estructuras.

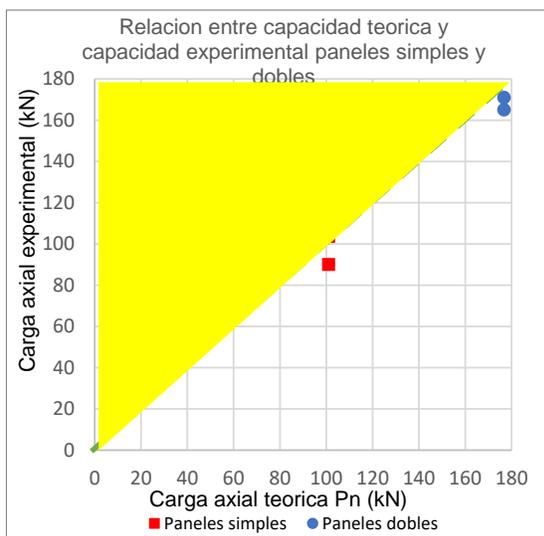


Gráfico 2. Relación entre capacidad teórica y capacidad experimental.

En otro gráfico (gráfico 3) se confirma lo expuesto anteriormente, puesto que la relación entre capacidad teórica reducida por el coeficiente ϕ vs. experimental presenta valores por encima de la línea trazada a 45°; es decir, todos los valores teóricos son mayores que los experimentales, trabajando del lado de la seguridad.

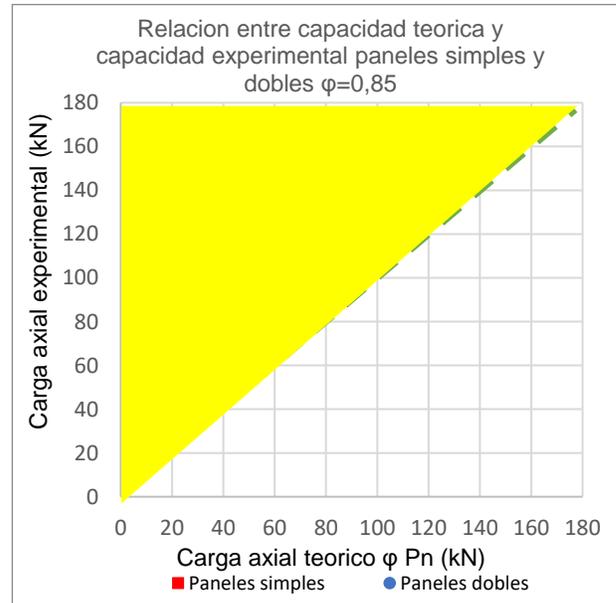


Gráfico 3. Relación entre capacidad teórica reducida y capacidad experimental.

Modos de falla

Una de las fallas encontradas en el proceso de carga fue que, con los incrementos, las conexiones del revestimiento-montante del tercio inferior se desgarran, hasta desprenderse totalmente del marco (fotografía 2), por lo cual, al fallar primero las conexiones, pierde arriostramiento discreto y la falla se termina de producir por pandeo local en los montantes (fotografía 3). En algunos casos, la falla fue en la zona superior, y en otros, en la zona inferior.

Flexión fuera del plano

Se evaluó la resistencia a flexión en los paneles simples siguiendo un protocolo de carga en ciclos continuos, con incrementos del 25 % respecto a la carga teórica esperada, hasta llegar a la capacidad máxima.



Fotografía 2. Falla de la conexión revestimiento - montante.



Fotografía 3. Pandeo local del montante.

A renglón seguido, se pueden observar el montaje y la instrumentación que se utilizaron para la obtención de las deformaciones en los lugares de interés (fotografía 4).



Fotografía 4. Ensayo a flexión fuera del plano instrumentación MCS-1.

Para obtener la capacidad teórica de los paneles se siguió la metodología descrita, y se obtuvieron estos valores: 6011 N-m panel simple y 10520 N-m panel doble.

Seguidamente, se presentan las curvas envolventes para los paneles simples y dobles (gráficos 4 y 5). Se observa que tienen un comportamiento lineal hasta llegar a la capacidad máxima de carga y que, además, los desplazamientos máximos en las zonas elástica e inelástica no presentan mayor variación entre las dos tipologías, por lo cual es posible decir que el desplazamiento no es un parámetro dependiente de la carga, sino que depende de la geometría y el material. Una vez que el material alcanzó su capacidad máxima, se comportó de manera dúctil en las dos tipologías. Como se puede observar en los gráficos, hay un decrecimiento gradual.

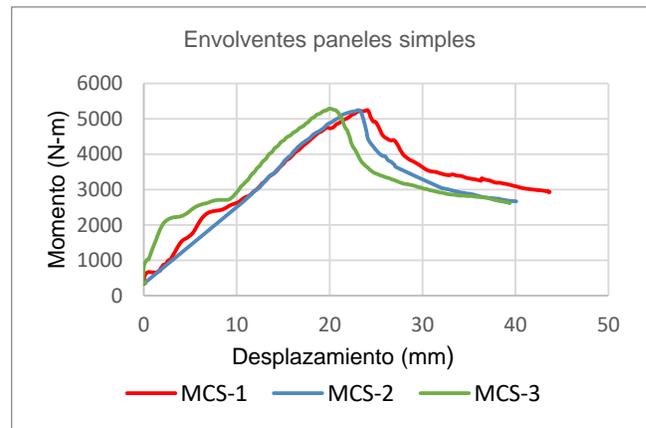


Gráfico 4. Envolventes ensayos a flexión fuera del plano paneles simples.

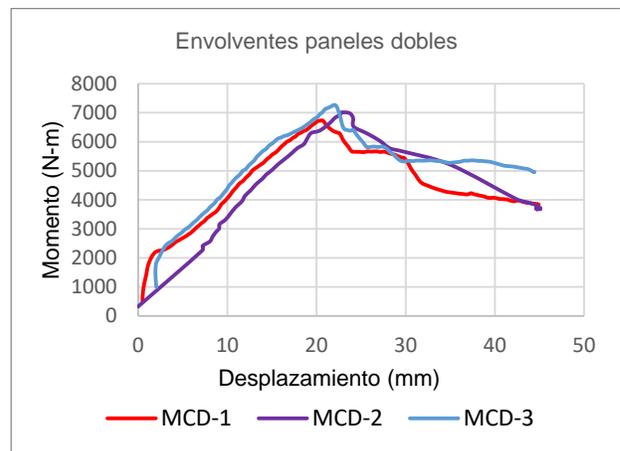


Gráfico 5. Envolvente ensayos a flexión fuera del plano paneles dobles.

A continuación, se presenta una comparación de los momentos teóricos vs. los momentos experimentales para paneles simples y dobles (tabla 5). Los momentos tuvieron una variación promedio de un 12 % para paneles simples y 32 % para paneles dobles, esto es, que la metodología consultada en AISI predice un mayor valor de la capacidad máxima real obtenida.

Tabla 5
Valores teóricos vs. experimentales ensayos en paneles simples y dobles

Tipo	Momento teórico a flexión (N-m)	Momento experimental a flexión (N-m)	Diferencia teórico vs. experimental
MCS-1	6011	5286	-12 %
MCS-2	6011	5244	-12 %
MCS-3	6011	5285	-12 %
MCD-1	10520	6736	-35 %
MCD-2	10520	7008	-33 %
MCD-3	10520	7266	-30 %

Para dar más claridad sobre los resultados obtenidos, se presentan dos gráficos. En el primero (gráfico 6), se observa la relación de capacidad teórica vs. capacidad experimental, y en el segundo (gráfico 7), se puede apreciar la relación entre capacidad teórica y capacidad experimental reducida por φ .

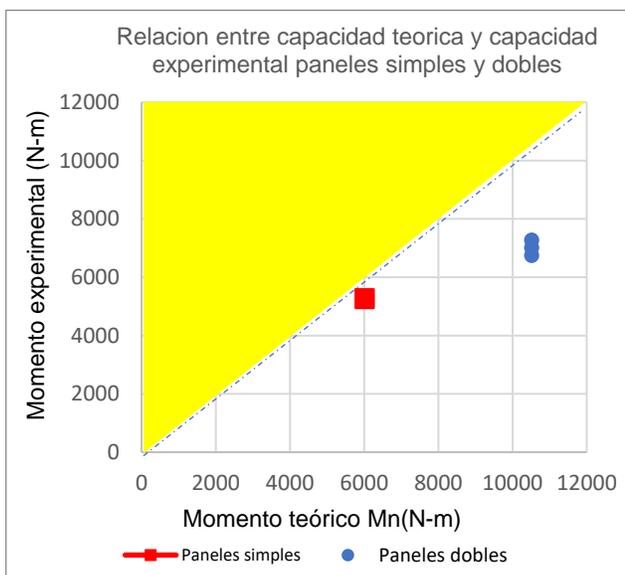


Gráfico 6. Relación entre capacidad teórica y capacidad experimental.

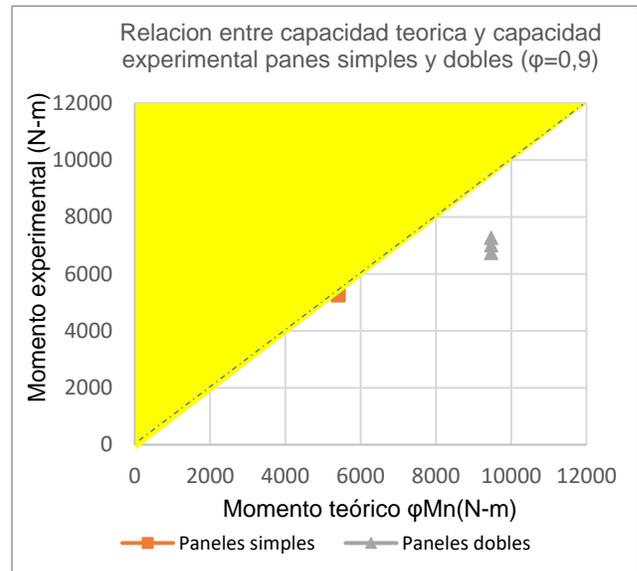


Gráfico 7. Relación entre capacidad teórica y capacidad experimental ($\phi = 0,9$).

Se observa que los datos en su mayoría se encuentran por debajo de la línea trazada a 45° para los paneles simples y dobles, lo cual indica que las relaciones entre capacidad teórica vs. capacidad experimental son menores que 1, por lo cual es posible concluir que la metodología actual sobrestima la capacidad teórica en todos los casos, aun cuando ya se han multiplicado por el coeficiente de reducción φ ; por lo tanto, se recomienda hacer más ensayos con diferentes revestimientos, para obtener un coeficiente φ que incluya todas las variables que tiene el sistema SF.

Modos de falla

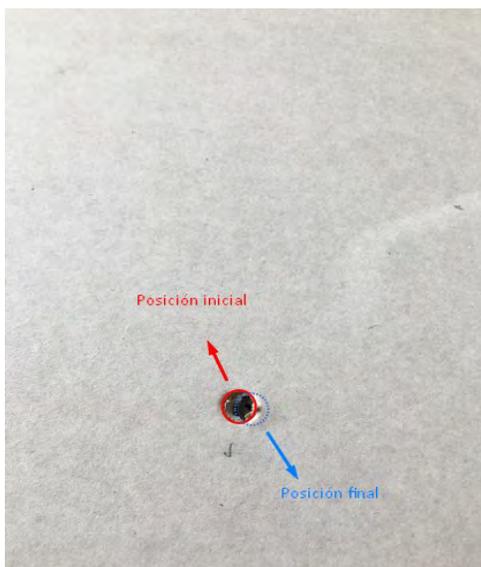
En las siguientes fotos (fotografías 5 y 6) se pueden observar algunos modos de falla comunes obtenidos durante los ensayos a paneles simples y dobles. Como se puede ver, la falla da inicio por pandeo local en los montantes, ocasionando la fractura del revestimiento en la conexión revestimiento-montante.

Así las cosas, fue posible concluir que la falla en todos los casos se inició en los montantes por pandeo local, como lo mencionaron en su investigación Selvaraj & Madhavan (2019), sin importar que el panel sea simple o doble, pero también se dijo que las aberturas del montante son un factor clave, puesto que las fallas siempre se presentaron cerca de estas. Además, la falla

se produce de manera aleatoria en los costados, lo que se atribuyó a todas las variables que comprenden la construcción de los paneles; algunos registraron fallas en la zona superior y otros, en la zona inferior.



Fotografía 5. Pandeo local panel doble.

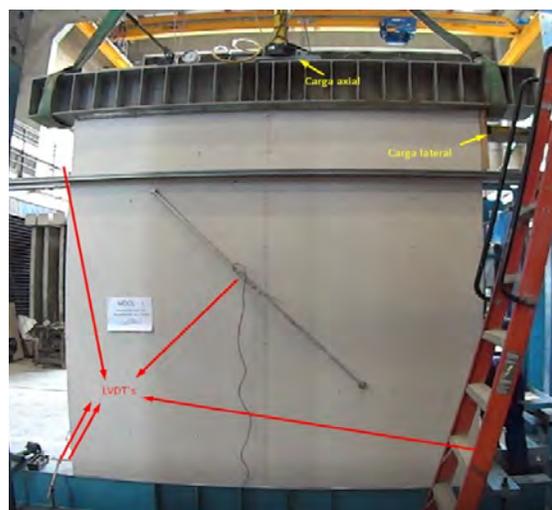


Fotografía 6. Fractura del revestimiento en la conexión.

Corte lateral

Una vez obtenidos los datos de compresión, fue posible evaluar la capacidad teórica de los paneles a corte, teniendo en cuenta una carga axial debida a un nivel adicional. El ensayo a corte se llevó a cabo siguiendo los lineamientos y el protocolo de carga descrito en ASTM E564.

En la foto siguiente (fotografía 7) se observa el montaje para un panel doble o simple, instrumentado en los lugares de interés; las cargas se aplicaron por medio de gatos hidráulicos, y en la zona superior se utilizaron rodillos que permitieran el desplazamiento lateral y transfirieran la carga axial a una viga de acero, de modo tal que se garantizara una carga distribuida constante sobre el panel, actuando en conjunto con la carga lateral en sus etapas de incrementos.



Fotografía 7. Instrumentación ensayo a corte panel doble.

La capacidad a corte de los paneles se calculó siguiendo AISI S100.

Allí se menciona que la capacidad a corte se podrá calcular (como se presentó en el capítulo anterior) cuando no exista arriostamiento, y se aclara que se deberá evaluar como una cercha cuando exista arriostamiento y la capacidad del panel se limitara a resistencia a tensión del elemento; por consiguiente, se calculó como una cercha y se obtuvieron los siguientes resultados: panel simple, 11,5 kN, y panel doble, 18 kN.

Más adelante (gráfico 8), se pueden apreciar los resultados obtenidos para los paneles simples y dobles. Se observa que los paneles simples tienen un mayor desplazamiento con respecto a los paneles dobles, lo cual quiere decir que el panel doble es más rígido para esta configuración en particular; esto también se atribuye al ángulo de arriostamiento, debido a que la riostra de los paneles simples tenía un ángulo mayor que 45° , por lo que la componente horizontal es menor en comparación con los paneles dobles, que tenían la riostra a 45° .

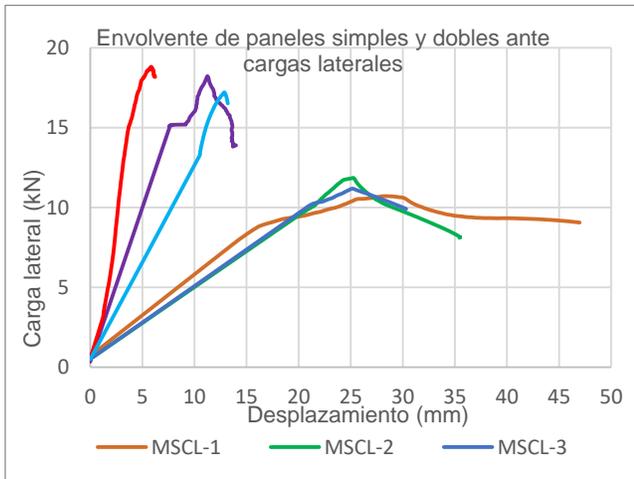


Gráfico 8. Envolvente de carga lateral paneles simples.

En la tabla siguiente (tabla 6) se observan los valores obtenidos para los paneles simples y dobles. Allí se evidencia que la variación porcentual no es alta, pero la falla no se produce en el elemento en tensión como se esperaba, sino que se inicia en la canal inferior del panel levantándose las aletas, aunque el valor es cercano porque tienen el mismo espesor y se esperaba que fluyera el arriostamiento, pero en este caso fluyeron las aletas.

La metodología presentada por AISI tiene un acercamiento bastante bueno para el diseño de los paneles a corte. El aporte del revestimiento se desprecia, puesto que el trabajo principal se da en el marco.

Tabla 6

Valores teóricos vs. experimentales ensayo carga lateral paneles simples y dobles

Tipo	Carga lateral teórica (kN)	Carga lateral experimental (kN)	Diferencia teórico vs. experimental
MSCL-1	11,5	12	8 %
MSCL-2	11,5	11	2 %
MSCL-3	11,5	11	-2 %
MDCL-1	18	18	1 %
MDCL-2	18	18	4 %
MDCL-3	18	17	-4 %

Más adelante se muestra que todos los datos están cerca del trazo diagonal, y se indica que las relaciones entre capacidades están próximas a 1, esto es, que la metodología unificada es válida para evaluar capacidades ante carga lateral (gráfico 9). Además, cuando la capacidad teórica es reducida por el coeficiente φ , los datos obtenidos se

encuentran por encima de la diagonal, y se afirma que la metodología unificada predice valores menores que la capacidad real ante carga lateral (gráfico 10).

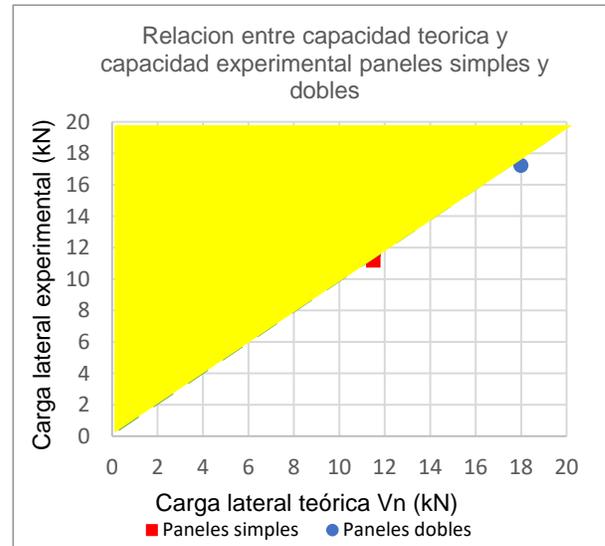


Gráfico 9. Relación entre capacidad teórica y capacidad experimental.

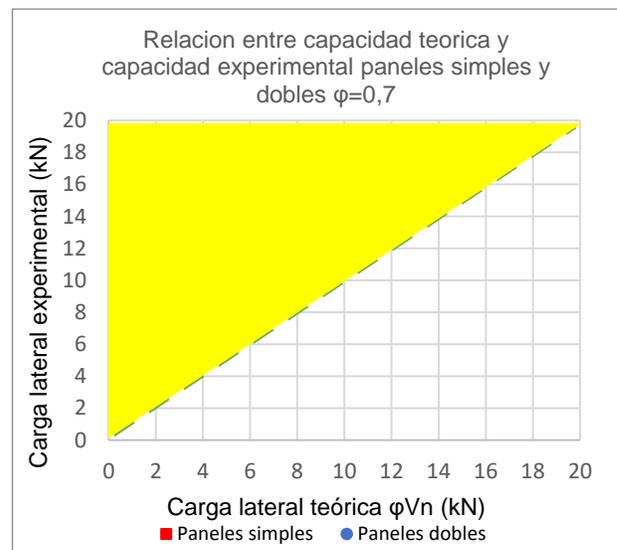


Gráfico 10. Relación entre capacidad teórica y capacidad experimental $\varphi = 0,7$.

Por otra parte, se puede concluir que el hecho de no tomar en cuenta el aporte del revestimiento no tiene mayor incidencia en los valores de capacidad máxima, por lo cual el autor considera adecuado un valor de $\varphi=0,7$ como coeficiente de reducción para paneles a corte, revestidos en sus dos caras con placas de yeso.

Modos de falla

Durante los ensayos fue posible identificar algunos modos de falla comunes, los cuales se muestran a continuación. Las zonas donde el revestimiento tiene más contacto ante carga lateral presentan aplastamiento y desgarramiento en la conexión, lo que significa que la conexión del revestimiento al montante es la primera en fallar (Macillo et al., 2017).

Las siguientes fotografías representan una secuencia de la falla, con el objeto de que el lector pueda identificar qué sucede en una estructura de *steel framing* antes de llegar a su capacidad máxima. Se observa cómo al principio el material sufre aplastamiento, después las esquinas de las placas se comienzan a desportillar, posteriormente se fractura el revestimiento en la conexión al montante, lo que ocasiona que ya no trabaje todo el revestimiento (fotografía 8), y por último, se produce el aplastamiento del montante y del panel (fotografía 9).



Fotografía 8. fractura del revestimiento-separación del marco metálico-revestimiento.



Fotografía 9. Aplastamiento panel y montante.

Rigidez

En la manera como se calculó la rigidez teórica (Nie et al., 2020), se consideraron el módulo de elasticidad, geometría y el área del material que se utilizó como arriostramiento; a su vez, la rigidez experimental se calculó tomando en cuenta la geometría de los paneles simples y dobles, siguiendo AISI.

A continuación se presentan los valores de rigidez obtenidos, en una tabla en la que no solamente se relacionaron la fuerza y el desplazamiento, sino que también se consideraron las dimensiones del espécimen (tabla 7).

Tabla 7
Rigidez experimental paneles simples y dobles

Tipo	Fuerza (kN)	Desplazamiento (mm)	a (mm)	b (mm)	Rigidez (N/mm)
MSCL-1	12	25	2440	1220	989
MSCL-2	11	25	2440	1220	936
MSCL-3	11	25	2440	1220	889
MDCL-1	18	11	2440	2440	1654
MDCL-3	17	12	2440	2440	1339

A renglón seguido, se observa una comparación de valores de rigideces teóricas vs. experimentales para los paneles simples y dobles, evidenciando que la rigidez experimental es prácticamente mayor en todos los casos. Esto se atribuye al hecho de que al evaluar la rigidez no se contempló un posible aumento en esta debido al aporte por el revestimiento.

Tabla 8
Comparación teórica vs. experimental de rigideces en paneles simples y dobles

Tipo	Rigidez teórica (N/mm)	Rigidez experimental (N/mm)	Diferencia teórica vs. experimental
MSCL-1	809	989	22 %
MSCL-2	809	936	16 %
MSCL-3	809	889	10 %
MDCL-1	1599	1654	3 %
MDCL-3	1599	1339	-16 %

Coefficiente de disipación de energía

Para evaluar el coeficiente de disipación de energía se utilizaron los gráficos de las envolventes obtenidas a partir de los ensayos a corte, las cuales se muestran a continuación.

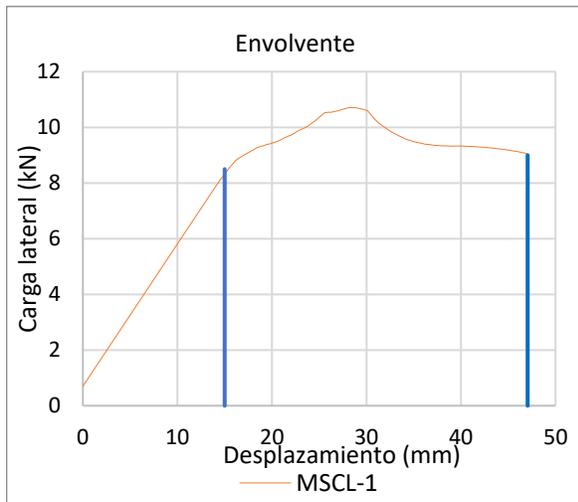


Gráfico 11. Envolvente MSCL-1.

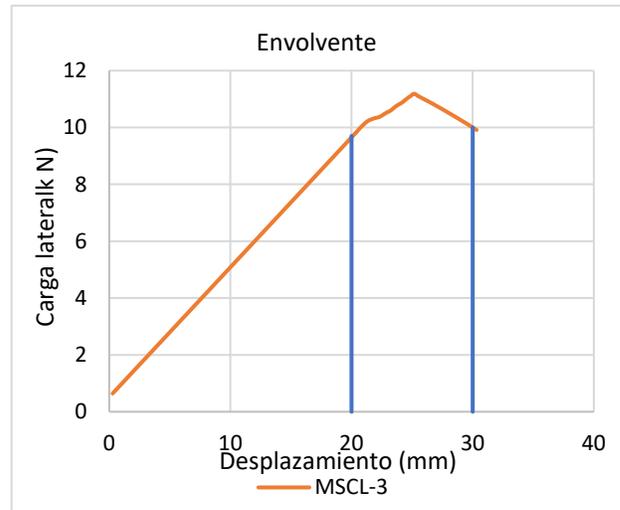


Gráfico 14. Envolvente MSCL-3.

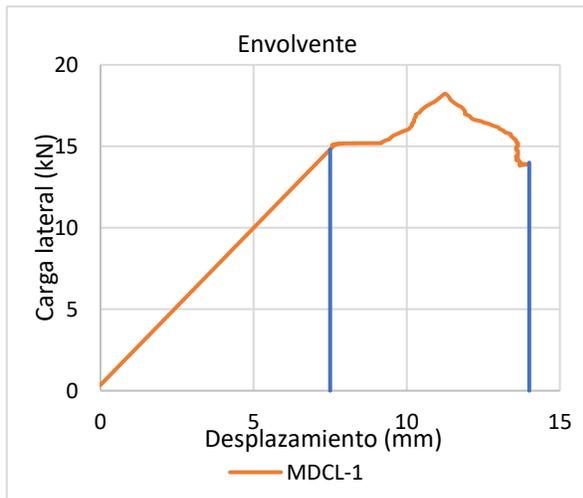


Gráfico 12. Envolvente MDCL-1.

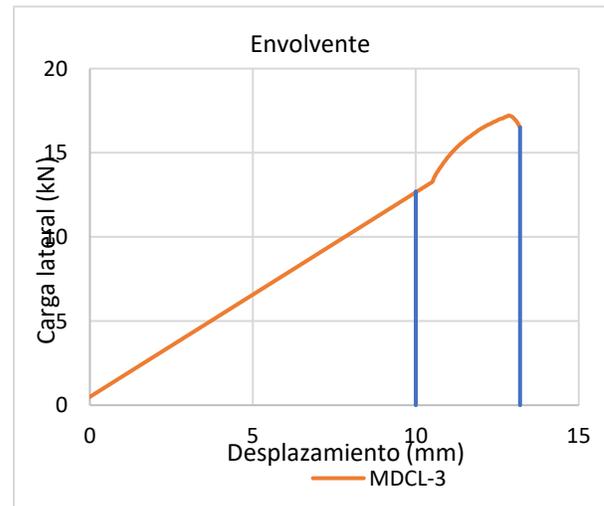


Gráfico 15. Envolvente MDCL-3.

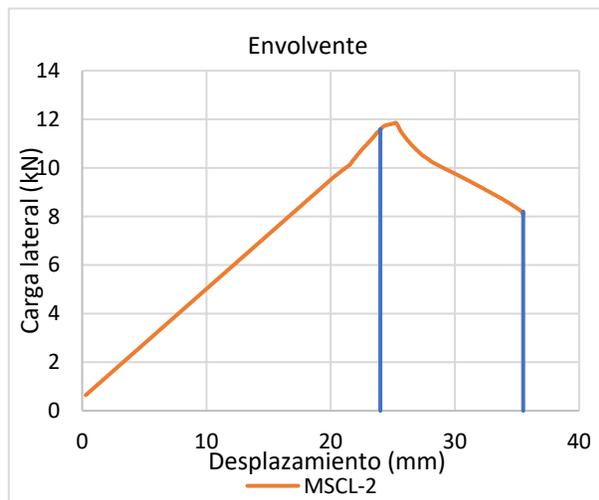


Gráfico 13. Envolvente MSCL-2.

Los resultados teóricos de R observados en la tabla siguiente (tabla 9) son el producto del uso de la metodología descrita.

Tabla 9
Valores de R para paneles dobles y simples

Tipo	δu (mm)	δy (mm)	μ	R_0
MSCL-1	47	15	3	2,2
MSCL-2	35	25	1	1,3
MSCL-3	30	20	1	1,4
MDCL-1	14	7,5	1	1,6
MDCL-3	13	10	1	1,2

Promedio 1,5

Comparativo económico *steel framing* vs. mampostería estructural

Uno de los factores más importantes al momento de elegir un sistema estructural con respecto a otro siempre será el aspecto económico, ya que es primordial para el desarrollo de un proyecto. Más adelante se observa el subtotal antes del IVA por metro cuadrado para el SF (tabla 29), así como el subtotal antes del IVA por metro cuadrado para la mampostería estructural; al comparar estos dos valores se observa una variación del 1 %, siendo favorable para el SF.

No obstante, existen otros aspectos importantes que inciden en el costo total de un proyecto, entre los cuales sobresale el rendimiento; construir con SF es más rápido en un 15 % con respecto a la mampostería estructural, lo cual coincide con lo mencionado por Cristina & De Crasto (2007); consecuentemente, los gastos operacionales del proyecto tendrían una reducción significativa.

Otro factor que se debe tener en cuenta es el peso total de la estructura. El SF tiene un peso de 17,66 kg/m², un valor bastante bajo al compararlo con construcciones en concreto y mampostería estructural; es decir, que las fuerzas sísmicas de diseño para una estructura de capacidad portante en *steel framing* serán menores, así como los requerimientos en la cimentación.

Desde el punto de vista económico, la mampostería estructural está mejor posicionada; no obstante, al analizar factores como el peso y la velocidad de construcción, resultan más favorables las construcciones en SF.

CONCLUSIONES

1. En cuanto a los ensayos de flexión fuera del plano, se encontró que el valor experimental tiene una variación alta con respecto al valor teórico; además, se halló que con la metodología actual se sobrestimó la capacidad de carga en un 35 % para paneles dobles y en un 12 % para paneles simples, por lo que la metodología unificada no satisface las capacidades experimentales.
2. Las ecuaciones utilizadas para el cálculo teórico en los ensayos de compresión y corte satisfacen actualmente los requisitos de capacidad, con los coeficientes de reducción propuestos.
3. Luego de obtener los resultados a carga lateral se pudo evidenciar que la placa de yeso no tiene un aporte significativo en la capacidad máxima en los cálculos teóricos, sin embargo, de requerirse una mejor precisión deberá tenerse en cuenta un aumento de la rigidez por el revestimiento.
4. La configuración geometría en los paneles a corte, afecta de manera directa en la capacidad de este, por lo cual se recomienda utilizar valores de arriostramientos que no superen los 45°.
5. Con los resultados obtenidos, es posible determinar un valor de $R = 1,5$ para paneles dobles sometidos a carga lateral; sin embargo, hay que tener cuidado con el uso de otros revestimientos de mayor capacidad, pues un aporte influirá directamente en la capacidad de disipación de energía.
6. El revestimiento genera un arriostramiento discreto al aumentar la capacidad, pero no garantiza que sea la mejor opción para diseñar un elemento, puesto que la falla puede ser súbita si la capacidad del marco es mucho menor.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda hacer más ensayos empleando otros revestimientos, al igual que otros tipos de arriostramientos para tener más valores R , cuando se desee diseñar tomando en cuenta el revestimiento.
2. A la luz de los resultados obtenidos para uso estructural interno, se aconseja evaluar otras tipologías con revestimientos exteriores para complementar la información presentada en este artículo.
3. Se sugiere, para investigaciones posteriores, hacer una comparación detallada de los requerimientos sísmicos de una estructura en *steel framing*, comparada con otros sistemas tradicionales.
4. A la luz de los resultados obtenidos en esta investigación para el coeficiente de capacidad de disipación sísmica $R = 1,5$ en paneles sísmicos con entramado liviano de acero formado en frío, con placas de yeso, se recomienda revisar los valores propuestos en el Decreto 1711 del 13 de diciembre de 2021, los cuales se encuentran en la tabla F.4.A.8.1 (Parámetros sísmicos).
5. Esta es una investigación inicial acerca del comportamiento del sistema *steel framing* y se debe complementar con futuras investigaciones ante cargas cíclicas, fatiga y comportamiento sísmico de las conexiones.
6. Se recomienda hacer futuras investigaciones en paneles sometidos ante cargas laterales con un alto

componente experimental, para poder evaluar detalladamente el comportamiento.

Agradecimientos

Este proyecto no se habría culminado con éxito sin el aporte de la ingeniería Nancy Torres Castellanos, de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, y de todo su equipo de trabajo del laboratorio. Gracias por su orientación, observación y disposición.

REFERENCIAS

- Cristina, R., & De Crasto, M. (2007). Arlene Maria Sarmanho Freitas. In *steel framing: Arquitectura*. [http://www.construccionenacero.com/Articulos_y_Publicaciones/Libros/Steel Framing Arquitectura.pdf](http://www.construccionenacero.com/Articulos_y_Publicaciones/Libros/Steel_Framing_Arquitectura.pdf)
- Feng, R.-Qiang, Zhu, B., Xu, P. H., & Qiu, Y. (2019). Seismic performance of cold-formed steel framed shear walls with steel sheathing and gypsum board. *Thin-Walled Structures*, 143(March 2018), 106238. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.106238>
- Henriques, J., Rosa, N., Gervasio, H., Santos, P., & da Silva, L. S. (2017). Structural performance of light steel framing panels using screw connections subjected to lateral loading. *Thin-Walled Structures*, 121 (January), 67-88. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.09.024>.
- Landolfo, R. (2019). Lightweight steel framed systems in seismic areas: current achievements and future challenges. *Thin-Walled Structures*, 140 (February), 114-131. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.03.039>.
- Macillo, V., Fiorino, L., & Landolfo, R. (2017). Seismic response of CFS shear walls sheathed with nailed gypsum panels: experimental tests. *Thin-Walled Structures*, 120 (September), 161-171. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.08.022>.
- Nie, S., Zhou, T., Zhang, Y., Zhang, B., & Wang, S. (2020). Investigation on the design method of shear strength and lateral stiffness of the cold-formed steel shear wall. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/8959712>.
- Padilla-Llano, D. A., Eatherton, M. R., & Moen, C. D. (2016). Cyclic flexural response and energy dissipation of cold-formed steel framing members. *Thin-Walled Structures*, 98, 518-532. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2015.10.021>.
- Pan, C. L., & Shan, M. Y. (2011). Monotonic shear tests of cold-formed steel wall frames with sheathing. *Thin-Walled Structures*, 49(2), 363-370. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2010.10.004>.
- Pekoz, T. (1986). *Development of a unified approach to the design of cold-formed steel members (May)*, 77-84.
- Rochel Awad, R. (2012). *Análisis y diseño sísmico de edificios*. Medellín: Fondo Editorial Eafit.
- Selvaraj, S., & Madhavan, M. (2019). Flexural behaviour and design of cold-formed steel wall panels sheathed with particle cement board. *Journal of Constructional Steel Research*, 162, 105723. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.105723>.
- USG Corporation (2014). The Gypsum Construction Handbook. In *The Gypsum Construction Handbook*. <https://doi.org/10.1002/9781118819197>.
- Veljkovic, M., & Johansson, B. (2007). *Armazón de acero ligero para edificios residenciales*, 44 (2006), 1272-1279.
- Yu, C. (2010). Shear resistance of cold-formed steel framed shear walls with 0.686 mm, 0.762 mm, and 0.838 mm steel sheet sheathing. *Engineering Structures*, 32(6), 1522-1529. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.01.029>.
- Yu, W.-W. (2003). *Scholars' Mine* Scholars' Mine AISI-Specifications for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members AISI Manual Cold-Formed Steel Design 2002 Edition AISI Manual Cold-Formed Steel Design 2002 Edition American Iron and Steel Institute. <https://scholarsmine.mst.edu/ccfss-aisi-spec><https://scholarsmine.mst.edu/ccfss-aisi-spec/130>.
- Zhang, W., Xu, X., Zheng, Y., Wang, S., & Li, Y. (2021). Influencing factors analysis on shear capacity of cold-formed steel light frame shear walls. *Structures*, 33(1239), 3588-3604. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.06.064>.

Máquina caracterizadora de materiales piezoeléctricos

Piezoelectric materials characterizing machine

SEBASTIÁN DONATO NOVA¹ - NICOLÁS FERNÁNDEZ MONCADA² - JUAN DAVID RINCÓN³ - SANTIAGO JEJEN SALINAS⁴ - DANIEL JOSÉ GONZÁLEZ⁵ - IVÁN CAMILO DURÁN TOVAR⁶

1. Estudiante del programa de Ingeniería Mecánica de la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
2. Estudiante del programa de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
3. Ingeniero mecánico e ingeniero electricista de la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
4. Ingeniero electrónico e ingeniero electricista de la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
5. Magíster en Ingeniería Electrónica. Profesor asociado del programa de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
6. Doctor en Ingeniería Eléctrica. Profesor asistente del programa de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

sebastian.donato@mail.escuelaing.edu.co - nicolas.fernandez@mail.escuelaing.edu.co - juan.rincon-a@mail.escuelaing.edu.co - santiago.jejen@mail.escuelaing.edu.co - daniel.gonzalez@escuelaing.edu.co - ivan.duran@escuelaing.edu.co

Recibido: 18/02/2021 Aceptado: 02/03/2021

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

Resumen

La sociedad, en su continua búsqueda de soluciones a las necesidades energéticas, ha explorado caminos que la han llevado a analizar incluso soluciones de microgeneración o nanogeneración, dando origen a técnicas conocidas como *energy harvesting* o cosechamiento de energía, que plantean la generación de energía eléctrica en forma renovable a partir de fuentes de origen natural o actividad humana, entre las cuales está el efecto piezoeléctrico.

Las soluciones propuestas con base en esta tecnología son múltiples y han servido para clasificar los materiales desde el punto de vista químico, de composición del material, con varias herramientas, pero no se han realizado estudios desde el punto de vista de la frecuencia, fuerza y objeto de impacto, razón por la cual se diseñó una máquina caracterizadora de monedas piezoeléctricas, que permite controlar la

velocidad de impacto, independizar la frecuencia y la fuerza aplicada, cambiar el objeto de impacto, variar distancias, medir tensiones y corrientes producidas, entre otras.

Mediante pruebas preliminares hechas con otros tipos de máquinas de presión, se observa que los materiales piezoeléctricos no se deben impactar con materiales duros, como es el caso del metal. Al utilizar diversos tipos de cauchos, gracias a la versatilidad de la máquina, su sistema de control y la interfaz, se podrán obtener las clasificaciones en términos de corrientes, tensiones, fuerzas, frecuencias y velocidades, para obtener la mayor generación de energía eléctrica a partir de piezoeléctricos.

Palabras claves: *energy harvesting*, piezoeléctricos, microgeneración, interfaz humano-máquina, tensión eléctrica.

Abstract

Society in its continuous search for solutions to energy needs has explored paths that lead it to analyze even micro-generation or nano-generation solutions, giving rise to techniques known as energy harvesting for the generation of electrical energy in a renewable way from sources of natural origin or human activity, among them, we find the piezoelectric effect.

The solutions proposed in this technology are multiple and have classified the materials from the chemical point of view, material composition, with various tools. However, no studies have been carried out from the point of view of frequency, force, and impact object, which is why a piezoelectric coin characterizing machine was designed, which allows controlling the impact speed, making the frequency, and applied force independent, changing the impact object, varying distances, measuring voltages and currents produced, among others.

Through preliminary tests carried out with other types of pressure machines, it is observed that piezoelectric materials should not be impacted with hard materials such as metal. By using different types of rubbers, thanks to the versatility of the machine, its control system, and the interface, different classifications can be obtained in terms of currents, voltages, forces, frequencies, and speeds, to obtain the highest power generation electrical from piezoelectric elements.

Keywords: energy harvesting, piezoelectric, micro-generation, human-machine interface, electrical voltage.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la necesidad de sustituir las fuentes de energías fósiles ha venido en aumento, tal como se observa en el reporte de estatus global de energía renovables 2021, donde el crecimiento de la adición anual neta de capacidad de generación de energía en el año 2020 fue del 83 %, frente a las fuentes no renovables (REN21, 2021). La principal razón son los problemas, como por ejemplo el cambio climático, el cual se ha convertido en uno de los temas más relevantes para la sociedad. El desarrollo de nuevas energías y la implementación de nuevas aplicaciones para estas mismas son ahora el nuevo reto de los ingenieros.

Entre las nuevas energías que se han venido desarrollando, están las técnicas de generación de energía renovable a un nivel menor que el de fuentes hidráulicas, eólicas o solares; estas se podrían denominar microgeneración o nanogeneración, que buscan la alimentación de objetos de menor tamaño o de bajo consumo energético (computadores, celulares, bombillos, electrodomésticos, etc.), y ayudan así a la reducción de residuos generados en su desecho que agravan el problema ambiental.

Con este enfoque se desarrolló la técnica conocida como *energy harvesting* o cosechamiento de energía (Da y Khaligh, 2009; Illias, Ishak, Mokhlis y Hossain, 2020), que plantea la generación de energía eléctrica de ma-

nera renovable, a partir de fuentes de origen natural o actividad humana.

Una de las fuentes de energía que forman parte del *energy harvesting* es el efecto piezoeléctrico, el cual, mediante materiales como el cristal de cuarzo, es capaz de producir energía eléctrica en respuesta a un esfuerzo mecánico aplicado. Actualmente, no hay ningún país que base su matriz energética en el efecto de piezoelectricidad, o que al menos esta cuente con un porcentaje alto de participación; esto es lo que nos llevó al estudio de tales materiales piezoeléctricos.

La piezoelectricidad se viene explorando desde 1881 (Cúpich y Garza, 2000), pero en algunos boletines tecnológicos se afirma que los registros de publicaciones de artículos sobre materiales piezoeléctricos datan del año 1980 (Fecyt, 2010). Esta tecnología posee algunos proyectos relevantes, tales como el desarrollo de baldosas piezoeléctricas (Hwang et al., 2015), o piezoelectricidad para perfiles viales en ciudades (Tamayo y Cardozo, 2017). En cuanto a la caracterización de los materiales, se han encontrado ciertas publicaciones desde el punto de vista de la química y la composición del material (Sherrit y Mukherjee, 2007; Gusarova et al., 2013). Entre las herramientas aplicadas para la caracterización están la interferometría (Riobó, Álvarez, Garea y Veiras, 2014), convertidores de pulso resonante (Phipps, 2010), medidores LCR de resistencia, capacitancia e inductancia (Singh, 2014), pero no estudios desde el punto de vista de la frecuencia, fuerza y objeto de impacto.

Por esta razón, desde el Semillero de Energía y Potencia, perteneciente al Grupo de Investigación Modelación Estratégica en Energía y Potencia de la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, se está buscando la forma de analizar estas características anteriormente mencionadas con la construcción de una máquina caracterizadora de monedas piezoeléctricas. Se espera que la máquina caracterizadora permita:

- Realizar pruebas sobre una moneda piezoeléctrica.
- Lograr la independencia de la frecuencia respecto a la fuerza de impacto.
- Controlar la velocidad con la que se impacta la moneda piezoeléctrica.
- Cambiar el objeto con el que se impactará la moneda piezoeléctrica.
- Variar las distancias de impacto.
- Medir voltajes y corrientes producidas.

En este artículo se pretende mostrar los resultados preliminares del diseño para la construcción de la máquina desde los puntos de vista mecánico y eléctrico-electrónico.

El orden para el presente texto es el siguiente: la sección I corresponde a la introducción del artículo; la sección II tiene que ver con la descripción de la teoría sobre el funcionamiento de la piezoelectricidad; en la sección III se habla acerca del diseño mecánico y eléctrico-electrónico de la máquina caracterizadora; en la sección IV se muestran los resultados preliminares sobre el diseño y la construcción, y en la sección V se presentan las conclusiones del artículo.

TEORÍA SOBRE PIEZOELECTRICIDAD

La piezoelectricidad (del griego antiguo *piezein*, ‘presionar’) fue un descubrimiento hecho por los hermanos Jacques y Pierre Curie en 1880 (Ren, 2021), gracias al cual encontraron un fenómeno asociado a ciertos cristales que, al ser sometidos a presiones mecánicas, genera cargas eléctricas en su superficie, adquiriendo una polarización eléctrica y, por consiguiente, una diferencia de potencial (Martín, 2018; Cohen, 2008). Entre los materiales más utilizados para la piezoelectricidad, el más importante es el cristal de cuarzo (SiO_2). Un ejemplo de funcionamiento puede observarse a continuación (figura 1).

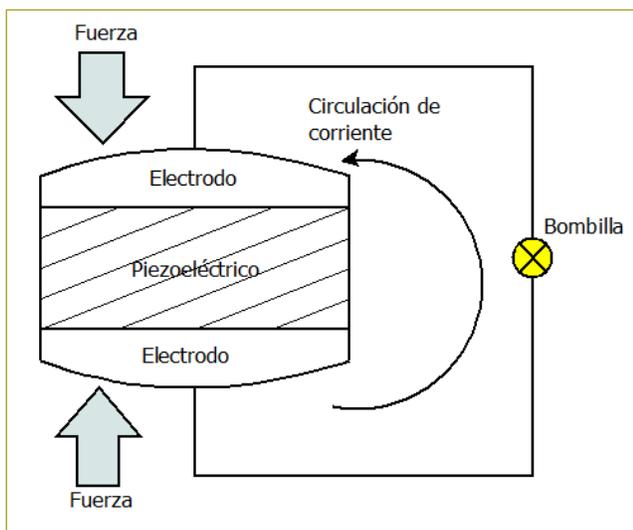


Figura 1. Efecto piezoeléctrico de generación de carga eléctrica.

Fuente: Bhaumik et al., 2017.

Los hermanos Curie, al igual que otros científicos, trabajaron la piezoelectricidad con el cuarzo y posteriormente con otros materiales naturales. En la actualidad, la mayoría de los materiales empleados para piezoeléctricos son sintéticos, aunque, durante la Segunda Guerra Mundial, se encontraron varios materiales cerámicos que presentan las mismas propiedades del efecto piezoeléctrico (Martín, 2018). A renglón seguido se muestran algunos de los materiales naturales y sintéticos empleados (tabla 1).

Tabla 1
Materiales empleados en piezoeléctricos

Naturales	Sintéticos
Cuarzo	Titanato zirconato de plomo
Sal de Rochelle	Polímero de fluoruro de polivinilideno
Turmalina	Titanato de bario
Topacio	Óxido de zinc
Sacarosa	Fosfato de galio
Berlinita	Nitruro de aluminio

Fuente: Martín, 2018; Ledoux, 2011.

Como es posible generar cargas eléctricas al someter el material a fuerzas de presión, también es posible deformar el material al someterlo a un campo eléctrico. Este fenómeno inverso ocurre cuando se inyecta corriente eléctrica sobre los electrodos de un piezoeléctrico, la cual genera fuerzas de deformación en el interior del material (figura 2). El material puede recuperar su forma original una vez que deja de someterse al campo eléctrico (Martín, 2018).

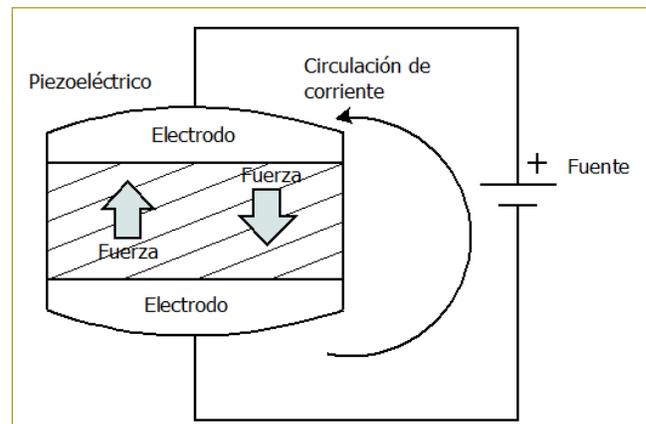


Figura 2. Efecto piezoeléctrico de deformación del material.

Fuente: Özdemir y Akkaya, 2016.

Los materiales piezoeléctricos están compuestos por cristales naturales o sintéticos sin centro de simetría en el campo molecular. La compresión provoca la separación de los centros de gravedad en las cargas eléctricas en el interior del material. Como consecuencia de esto, en la masa aparecen dipolos elementales y en las superficies enfrentadas surgen cargas de signo opuesto (Martín, 2018; Ledoux, 2011). A continuación, se muestra la estructura molecular de la titanato zirconato de plomo (PZT) (figura 3).

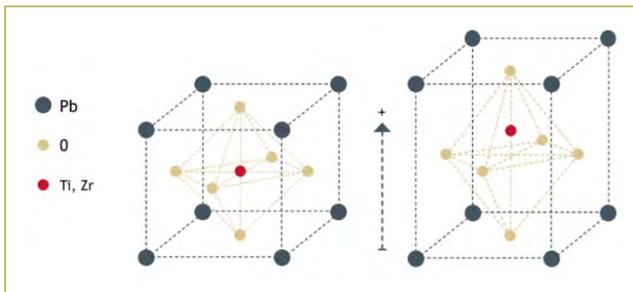


Figura 3. Estructura de la titanato zirconato de plomo.

Fuente: Martín, 2018.

En la siguiente sección, se hará una descripción del prototipo desde las características mecánicas y las características eléctricas y electrónicas. Primero se abordará el diseño mecánico.

DISEÑO MECÁNICO

La máquina caracterizadora tiene varios componentes mecánicos y estructurales, diseñados detalladamente para cumplir las funciones de variar la frecuencia y la fuerza de impacto. Los componentes mecánicos son, un eje de transmisión de potencia, dos rodamientos, una leva con su respectivo seguidor, un vástago y un resorte.

Lo primero que se hizo fue el diseño de la leva, teniendo como parámetros iniciales el desplazamiento de 0,01 m y el radio base de 0,03 m, para una velocidad angular de 7600 rpm. La leva se diseñó para un movimiento armónico, con una función seno mediante las ecuaciones (1) y (2), donde R_x y R_y son las coordenadas del perfil de la leva, R_b es el radio base, β es el desplazamiento angular y ΔR es el desplazamiento lineal en el ángulo β .

$$R_x = (R_b + \Delta R) \times \sin(\beta) \quad (1)$$

$$R_y = (R_b + \Delta R) \times \cos(\beta) \quad (2)$$

Para calcular el desplazamiento ΔR , se hace uso de la ecuación (3), en la que se toman en cuenta la altura inicial H_0 , que corresponde al radio base, y la elevación H_i , que corresponde al desplazamiento máximo.

$$\Delta R = H_0 + \frac{H_i}{2} \times (1 - \cos(\beta)) \quad (3)$$

Al tabular los datos de las coordenadas R_x y R_y , cuyos valores están en metros, se logra el diseño gráfico de perfil de la leva (figura 4).



Figura 4. Perfil de la leva.

Fuente: Elaboración propia.

El estudio del comportamiento de la leva mediante gráficas fue muy importante antes de la construcción, para poder diseñar el seguidor adecuadamente y hacerle pequeños ajustes del desplazamiento en el diseño final. Para esto se realizaron gráficas de desplazamiento, velocidad y aceleración en función del desplazamiento angular β , haciendo uso de las ecuaciones (4) y (5). En las figuras siguientes (figuras 5, 6 y 7) se muestran la caracterización del desplazamiento, la velocidad y la aceleración de la leva.

$$V_i = \frac{\pi \times H_i \times w}{2 \times \beta} \quad (4)$$

$$a_i = \frac{\pi^2 \times H_i \times w^2}{2 \times \beta^2} \quad (5)$$

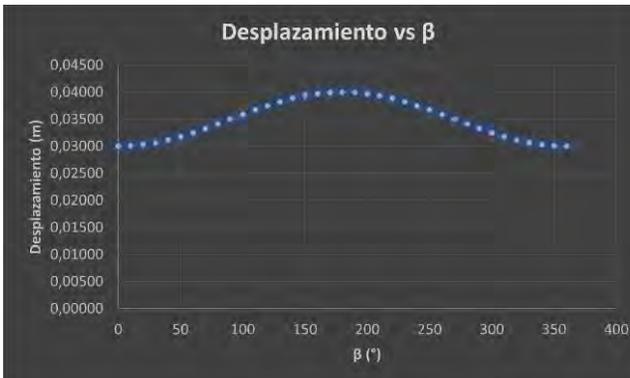


Figura 5. Desplazamiento de la leva.

Fuente: Elaboración propia.

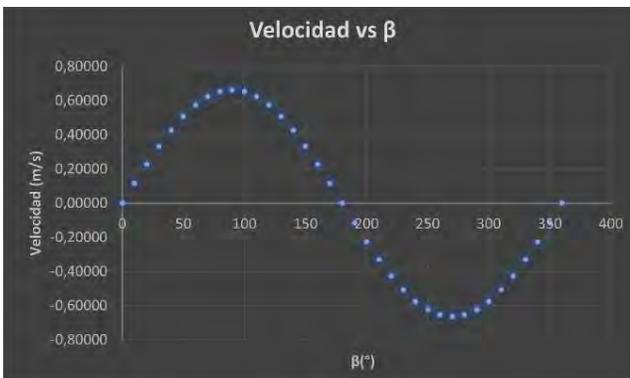


Figura 6. Velocidad de la leva.

Fuente: Elaboración propia.

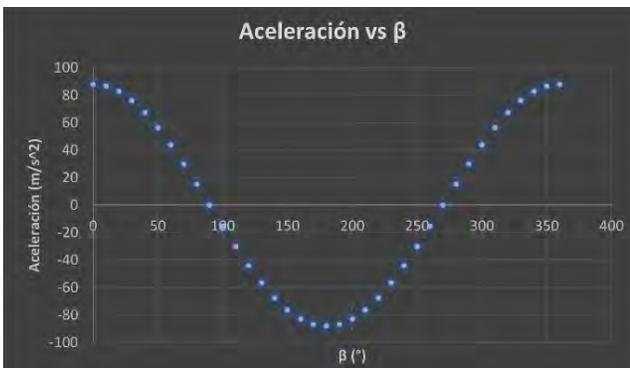


Figura 7. Aceleración de la leva.

Fuente: Elaboración propia.

Por último, la leva se diseñó en el *software* SolidWorks, para poder mecanizarla en la máquina CNC (el diseño final se observa en la figura 8). El material se determinó tomando en cuenta las propiedades mecánicas y los costos, consiguiendo buenos beneficios del nailon 6,6. Tiene excelente resistencia al desgaste, baja fricción, resistencia térmica, buena rigidez y dureza.

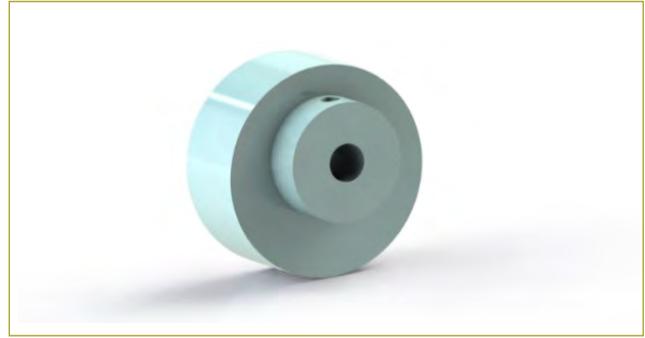


Figura 8. Diseño de la leva en SolidWorks.

Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, se realizó un diseño más sencillo de los otros componentes. El eje se diseñó teniendo en cuenta el acople al motor con un diámetro de 0,5 pulgadas (in) en acero AISI 1020 CR, con una longitud de 200 mm. Los rodamientos se seleccionaron de catálogos con una dimensión de 0,5 in, correspondiente al diámetro del eje, en tanto que el seguidor y el vástago se diseñaron en función del grosor de la leva, ambos componentes hechos en acero AISI 1020 CR, obteniendo un coeficiente de fricción de 0,06, el cual es muy bajo y apropiado para el funcionamiento.

El vástago tiene un diámetro de 1 in, con dos reducciones en sus extremos a 3/4 de in para acoplar el seguidor y la herramienta de impacto. Por facilidad en el mecanizado, el seguidor se realizó, en forma cilíndrica, de 10 mm de diámetro.

La función del resorte es retornar el seguidor cuando la leva se encuentre con un desplazamiento mínimo, motivo por el cual se efectuaron cálculos para un resorte a compresión, teniendo en cuenta una fuerza máxima de 43,98 Nm. Aplicando la ecuación $F = -(K)(X)$ se obtiene un valor para la constante K de 4398 Nm.

Para la estructura de la máquina, se consideran las dimensiones de los componentes previamente diseñados y adquiridos. Al no ser una máquina grande ni presentar altos esfuerzos por cargas y vibraciones, la estructura se diseña con tubo cuadrado de acero de 1 in, con espesor de 1 mm. Las dimensiones generales de la máquina son 250 mm de ancho, 270 mm de alto y 300 mm de profundidad. La estructura se recubrirá con una pintora epóxica, muy resistente a la corrosión. El diseño de la estructura se hizo en SolidWorks (figura 9).

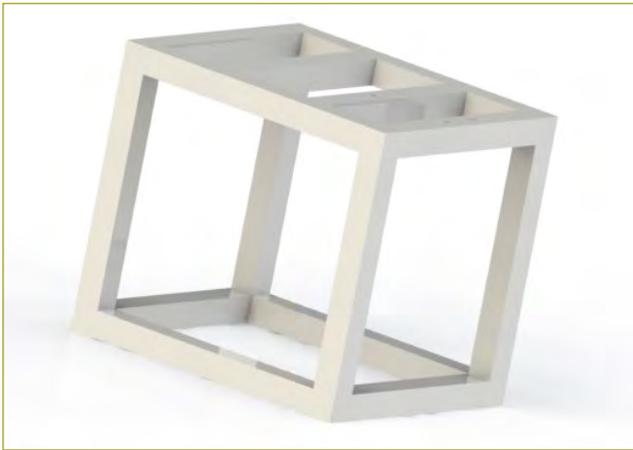


Figura 9. Diseño de la estructura en SolidWorks.
Fuente: Elaboración propia.

Adicionalmente, se hace el diseño de un elevador de tijera con el objetivo de variar la distancia a la que se encuentra el material piezoeléctrico de la herramienta de impacto. Variar dicha distancia permite dos cosas: variar la fuerza de impacto y variar el tiempo de contacto. El elevador se diseña y mecaniza a partir de platinas de 1/18 de in de grosor (figura 10).



Figura 10. Diseño del elevador en SolidWorks.
Fuente: Elaboración propia.

El material y la forma de las herramientas de impacto son parte de las pruebas que se deben realizar con la máquina en funcionamiento. Mediante pruebas efectuadas con la máquina universal, se observa que los materiales piezoeléctricos no se deben impactar con materiales duros, como es el caso del metal. Por eso, se fabricarán herramientas con diferentes tipos de caucho y forma, que logren amortiguar el impacto.

El vástago incluye la reducción en su extremo para lograr el acople de diversas herramientas. A continua-

ción, se muestra el diseño final de la máquina caracterizadora, en el que se incluyen elementos mecánicos, eléctricos y electrónicos (figura 11).

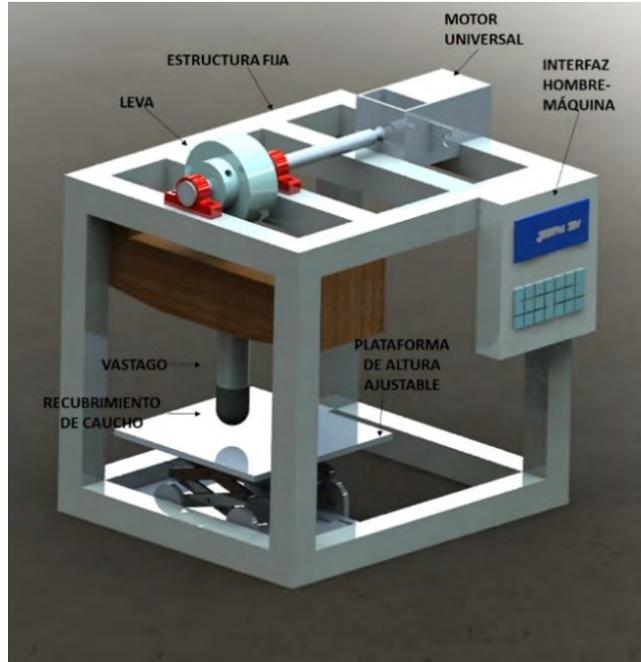


Figura 11. Diseño completo de la máquina en SolidWorks.
Fuente: Elaboración propia.

Diseño eléctrico-electrónico

En la parte del diseño eléctrico-electrónico se planteó un sistema de control con retroalimentación para la automatización de la máquina caracterizadora. El esquema de este sistema se presenta a renglón seguido (figura 12).

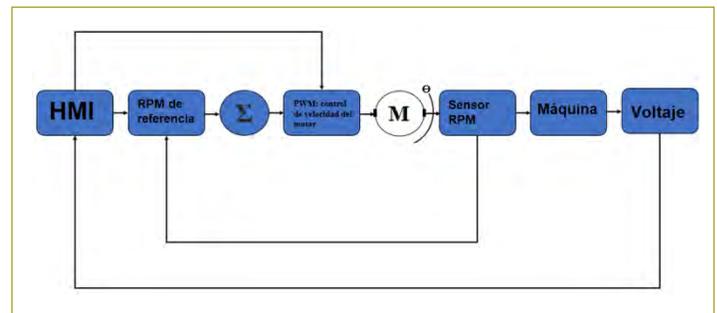


Figura 12. Sistema de control de la máquina caracterizadora.
Fuente: Elaboración propia.

En este diseño se muestra el sistema de conexión que involucra todo el proceso en la prueba del piezoeléctrico, comenzando por la interfaz humano-máquina (HMI,

por su sigla en inglés) hasta la generación o producción de tensión eléctrica. El proceso se divide en una parte electrónica, que va del HMI hasta el motor, y una parte mecánica, que va desde el motor hasta la producción de tensión eléctrica.

Al poder medir estos parámetros de tensión y revoluciones por minuto, se procesa entonces la energía de salida o del impacto. Es entonces cuando dicha energía de salida muestra la relación existente entre tensión de salida y frecuencia, tensión de salida y fuerza, y la eficiencia del material piezoeléctrico.

Para el uso del motor, primero se hicieron varias medidas sobre un motor de lavadora adquirido para los primeros ensayos de la máquina, con el fin de determinar el voltaje y la corriente a los cuales funcionan. Los datos obtenidos para el motor se muestran a continuación (tabla 2).

Tabla 2
Datos de corriente, tensión y velocidad para el motor de lavadora

Porcentaje de tensión	Corriente [A]	Velocidad [rpm]
100 %	3,9	1300
80 %	2,9	1250
60 %	2,2	1250
50 %	1,8	1250
40 %	1,5	1247

Fuente: Elaboración propia.

Se encontró que el motor posee control de giro horario y antihorario. También se hicieron pruebas de las revoluciones por minuto del motor a determinado nivel de tensión, cuyos resultados se presentan seguidamente (tabla 3).

Tabla 3
Datos de tensión y velocidad para el motor seleccionado

Velocidad [rpm]	Tensión (DC)	Velocidad [rpm]	Tensión (AC)
2580	21 Vdc	3500	24 Vac
1873	18 Vdc	5300	40 Vac
1450	15 Vdc	1500	30 Vac
1172	14 Vdc	7800	50 Vac
880	12 Vdc		

Fuente: Elaboración propia.

Se plantea controlar la velocidad del motor con un controlador PID digital implementado en un computador de placa reducida, un actuador (puente H) y un sensor de RPM optoacoplador. La medición de la tensión de salida generado por los piezoeléctricos se hace por medio del mismo computador de placas reducidas, empleando un conversor analógico digital para adquirir y procesar los datos en tiempo real.

Estos datos se utilizarán para la respectiva puesta en marcha de la máquina caracterizadora. Como último ensayo, se efectuaron las mismas pruebas sobre un motor de paso como el mostrado en la figura siguiente (figura 13). Este motor presentó movimiento desde 11 Vdc y 27 Vrms en corriente alterna.

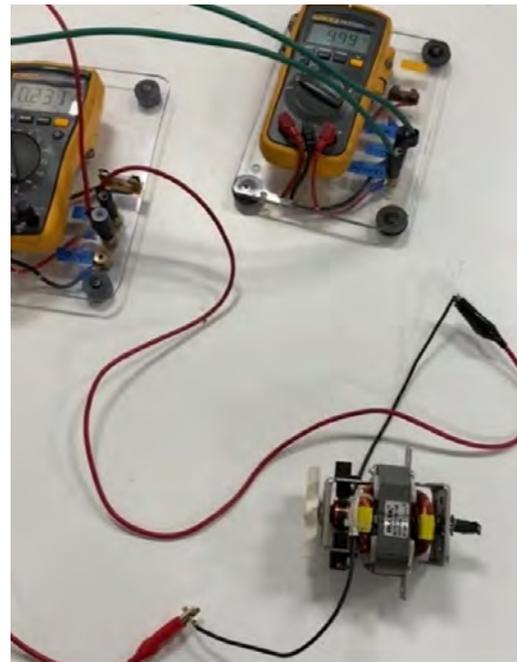


Figura 13. Motor de paso usado en la máquina caracterizadora.

Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS PRELIMINARES

Se realizaron pruebas de compresión a una serie de discos piezoeléctricos (figura 14), en una máquina universal como la mostrada más adelante (figura 15, parte izquierda), en las cuales se encontró que, al aplicarles una carga con pendiente constante de 10 N/s, hasta llegar a 230 N, se logra obtener una tensión de 10 voltios (V) en la máxima presión (figura 15, parte derecha).



Figura 14. Discos piezoeléctricos para las pruebas de la máquina.

Fuente: Elaboración propia.

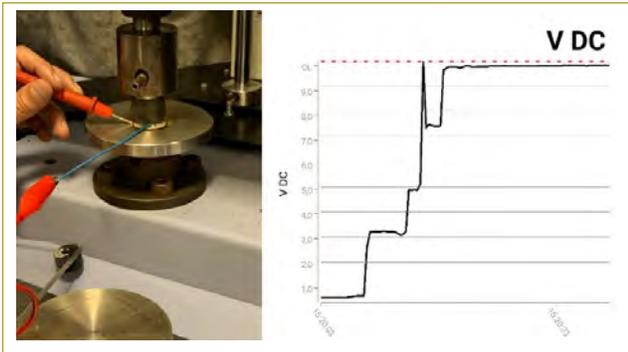


Figura 15. Montaje de pruebas de compresión con medición en multímetro Fluke 3000/FC.

Fuente: Elaboración propia.

Para el diseño electrónico se caracterizó el motor de paso con el montaje mostrado anteriormente (figura 13). En dicho montaje se hizo la medición de velocidad y de corriente del motor, con base en la tensión eléctrica aplicada. Como resultado se obtuvo la gráfica que se presenta seguidamente, en la cual se puede apreciar el dimensionamiento electrónico de los circuitos (figura 16).

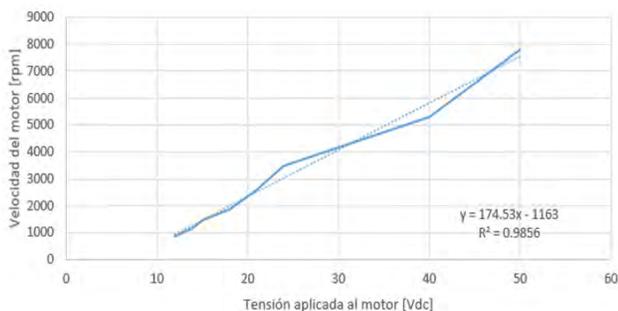


Figura 16. Medición de voltaje con posterior implementación de medición de RPM.

Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

Con la prueba de compresión se ve una primera aproximación en la relación proporcional que existe entre la presión aplicada y el voltaje generado, que se dice lineal $F \propto V$.

Además, con esta prueba se encontró que un material elástico (en la punta del objeto de impacto) produce una generación de voltaje más prolongada en comparación con un material con punta rígida.

Con la independencia entre la fuerza y la frecuencia se podrá comprobar esta relación directa planteada con anterioridad, al igual que hallar la relación con la frecuencia de impacto.

El prototipo permitirá determinar los puntos máximos de funcionamiento de los piezoeléctricos, con lo cual se podrán optimizar los diseños que se hagan con estos materiales.

La versatilidad de la máquina diseñada, así como la variación de sus parámetros, permite a los usuarios un mejor aprovechamiento de la energía proveniente de los materiales piezoeléctricos, dando detalles importantes en cuanto a la generación eléctrica, en términos de frecuencia, fuerza y materiales de impacto.

REFERENCIAS

- Bhaumik, A., Das, A., Mishra, A. K., Shaw, A., Yadav, A. y Roy, S. (2017). *Non-conventional energy sources using piezoelectric crystal for wearable electronics* (pp. 1-4). 1st International Conference on Electronics, Materials Engineering and Nano-Technology (IEMENTech). DOI 10.1109/IEMENTECH.2017.8077009.
- Cohen, R. E. (2008). *First-principles theories of piezoelectric materials piezoelectricity: evolution and future of a technology* (pp. 471-492). Heidelberg: Springer Berlin.
- Cúpich, M. y Garza, F. J. (2000). Actuadores piezoeléctricos. *Ingenierías*, III(6), 22-28.
- Da, Y. y Khaligh, A. (2009). *Hybrid offshore wind and tidal turbine energy harvesting system with independently controlled rectifiers* (pp. 4577-4582). 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics. DOI 10.1109/IECON.2009.5414866.
- Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología (Fecyt) (2010). Materiales piezoeléctricos. *Boletín Vigilancia Tecnológica*, pp. 1-12.
- Gusarova, E., Gusarov, B., Zakharov, D., Bousquet, M., Viala, B., Cugat, O., Delamare, J. y Gimeno, L. (2013). An improved method for piezoelectric characterization of polymers for energy harvesting applications. *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 476, 012061.
- Hwang, S. J., Jung, H. J., Kim, J. H., Ahn, J. H., Song, D., Song, Y., Lee, H. L., Moon, S. P., Park, H. y Sung, T. H. (2015). Designing and manufacturing a piezoelectric tile for harvesting energy from footsteps. *Current Applied Physics*, 15(6), pp. 669-674. DOI: 10.1016/j.cap.2015.02.009.

- Illias, H. A., Ishak, N. S., Mokhlis, H. y Hossain, M. Z. (2020). *IoT-based Hybrid Renewable Energy Harvesting System from Water Flow* (pp. 204-208). IEEE International Conference on Power and Energy (PECon). DOI 10.1109/PECon48942.2020.9314412.
- Ledoux, A. (2011). *Theory of piezoelectric materials and their applications in civil engineering* (tesis de maestría, Massachusetts Institute of Technology [MIT]).
- Martín, A. (2018). *Aplicaciones del efecto piezoeléctrico para la generación de energía* (tesis de grado, Universidad Carlos III de Madrid).
- Özdemir, A. E. y Akkaya, S. (2016). *Alternative renewable energy producing systems by utilizing piezoelectric transducers* (pp. 59-62). IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications (Icrera). DOI 10.1109/ICRE-RA.2016.7884357.
- Phipps, A. (2010). *Modeling and characterization of piezoelectric energy harvesting systems with the pulsed resonant converter* (tesis doctoral, Universidad de Florida).
- Ren, G. (2021). *Review of piezoelectric material power supply* (pp. 136-139). International Conference on Electronics, Circuits and Information Engineering (ECIE). DOI 10.1109/ECIE52353.2021.00035.
- REN21: Renewables Now (2021). *Renewables 2021 Global Status Report*. Disponible en https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2021_Full_Report.pdf.
- Riobó, L., Álvarez, N., Garea, M. y Veiras, F. (2014). *Interferómetro de polarización para la caracterización mecánica de dispositivos piezoeléctricos* (pp. 765-769). IEEE Biennial Congress of Argentina (Argencon). DOI 10.1109/ARGENCON.2014.6868585.
- Singh, A. (2014). Preparation and characterization of piezoelectric materials (pp. 1-5). International Conference for Convergence for Technology. DOI 10.1109/I2CT.2014.7092213.
- Sherrit, S. y Mukherjee, B. K. (2012). Characterization of piezoelectric materials for transducers, dielectric and ferroelectric reviews. *Dielectric and Ferroelectric Reviews*, 175-244.
- Tamayo, D. A., y Cardozo, N. K. (2017). *El uso de piezoeléctricos para la generación de energía sostenible como proyecto piloto en un perfil vial de Bogotá* (trabajo de grado, Universidad Católica de Colombia).
- Žukauskaitė, A., Broitman, E., Sandström, P., Hultman, L. and Birch, J. (2015). Nanoprobe mechanical and piezoelectric characterization of $\text{Sc}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}(0001)$ thin films. *Phys. Status Solidi A*, 212(3), 666-673. DOI: 10.1002/pssa.201431634.

Caracterización hidroclimatológica y evaluación hidrológica de una cuenca natural y antrópica. Estimación de caudales medios y extremos

Hydro-climate characterization and hydric assessment of a natural and anthropic basin: Moderate and extreme flow estimates

ALFONSO RODRÍGUEZ DÍAZ¹ - RICARDO AGUILAR PIÑA² - ANDRÉS OTÁLORA CARMONA³ - ROMEO RAMOS⁴

1. Profesor titular de la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Bogotá, D.C., Colombia.
2. Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Bogotá, D.C., Colombia.
3. Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Bogotá, D.C., Colombia.
4. Drummond Ltd. Bogotá, D.C., Colombia.

alfonso.rodriguez@escuelaing.edu.co - william.aguilar@escuelaing.edu.co - andres.otalora@escuelaing.edu.co - ramos@drummondLtd.com

Recibido: 22/02/2021 Aceptado: 04/03/2021

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

Resumen

Se desarrolló una metodología para evaluar la disponibilidad de agua superficial en función de los requisitos establecidos por la compañía Drummond Ltd., que se encarga del desarrollo de la minería de superficie en el sur del departamento del Cesar (Colombia). La metodología incluye un balance hidrológico a largo plazo para estimar el caudal promedio en cualquier punto de una red de drenaje de una cuenca particular y establecer el caudal máximo para un periodo de retorno determinado, en puntos definidos previamente.

La herramienta desarrollada para la estimación de los tipos de flujos es compatible con un SIG para *software* de dominio comercial y público. Además, se crearon nuevas herramientas para evaluar los procesos hidrológicos que se pueden usar en cualquier otro sistema de cuencas hidrográficas.

Este modelo se aplicó particularmente en la cuenca del arroyo San Antonio, ubicada en la zona de explotación de Drummond Ltd., en la parte sur del departamento del Cesar (Colombia). De acuerdo con la clasificación del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam), el arroyo San Antonio es un afluente del río Cesar, que se encuentra en la zona hidrográfica "b", en la subcategoría ab-28, que corresponde a la cuenca Magdalena-Cauca. El sistema de drenaje del arroyo San Antonio está conformado por un número importante de corrientes efímeras, cuya condición permanente drena sus aguas al río Cesar, en una zona aluvial plana en la que en épocas de invierno se generan grandes superficies de inundación, que en la mayoría de los casos modifican el alineamiento de estos cauces efímeros.

En el plano esquemático, por medio de la presente investigación se busca implementar el modelo y reproducir las condiciones de flujo

en la red de drenaje en la cuenca, al igual que modelar, a partir de un tránsito hidrológico, las condiciones naturales en las partes media y alta de la cuenca en la zona de la sierra del Perijá, hasta la zona de llanura de inundación y su posterior descarga al río Cesar.

El SIG implementado y estructurado tiene un modelo espacial que cubre toda la red de drenaje en condiciones naturales, utilizando como insumo una serie de variables hidroclimáticas que se extienden espacialmente en la cuenca, a partir de la generación de subcuencas más pequeñas en la zona de estudio.

El modelo incluye, basado en una profundidad máxima de lluvia de 24 horas, una metodología para generar precipitaciones y construir histogramas de lluvias de diseño. Adicionalmente, el modelo contiene la clasificación de los suelos según la metodología del Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos.

Para la estimación del caudal medio se hizo un balance de agua a largo plazo, utilizando la herramienta de análisis espacial ArcGis en cada celda para la zona de estudio, con base en la subdivisión espacial de rejillas o cuadrículas de precipitación media y de evaporación potencial y real. La metodología desarrollada permite realizar análisis y obtener resultados de hidrogramas de eventos extremos en cualquier punto de la corriente. Estos caudales se estimaron mediante el uso de la herramienta HEC-HMS, en función de los datos de precipitación y las características físicas previamente obtenidas y disponibles en el SIG, y procesadas por HEC/Geo-HMS. El tránsito hidráulico del canal se hizo con el método de Muskingum.

En conclusión, se desarrolló un modelo que reproduce las condiciones naturales y apoya las decisiones sobre la gestión del agua en la cuenca del arroyo San Antonio.

Palabras claves: caracterización hidroclimática, disponibilidad de agua superficial, estimación de caudal medio, balance a largo plazo, caudales extremos.

Abstract

A methodology was developed to assess surface water availability in compliance with the requirements established by Drummond Ltd., which develops open-pit mining in the south of the department of Cesar (Colombia). The methodology includes a long-term hydric balance to estimate the average flow at any point of a draining network for a specific basin and establish the maximum flow for a determined return period, at previously established points.

The developed tool to estimate the types of flow is compatible with a geographical information system for free and commercial software. Furthermore, new tools were created to assess the hydric processes that can be used in any other system of hydric basins.

This model was specifically used in the basin of the San Antonio stream, located in the area of influence of Drummond Ltd., in the south of the department of Cesar (Colombia). According to the classification of the Colombian National Climate Service (IDEAM in Spanish), the San Antonio stream is an affluent of the Cesar river, found in the hydrographic zone "b" in the subcategory ab-28, which correspond to the Magdalena-Cauca basin. The draining system of the San Antonio stream is made up of a significant number of ephemeral streams, whose permanent condition constantly drain their water into the Cesar river in a flat alluvial zone wherein, during winter times, large extensions of flooding take place, most of which modify the alignment of such ephemeral streams.

In terms of structure, through this research, we attempt to implement the model and reproduce the flow conditions in the basin's draining network, as well as model, based on a hydric change, the natural con-

ditions in the middle and high parts of the basin in the zone of Serría del Perijá until the flooding flatlands and their eventual discharge into the Cesar river.

The implemented and structured system has a spatial model that covers all the draining network in natural conditions, using a series of hydro climatological variables that expand spatially in the basin, through the generation of smaller sub-basins in the study zone.

The model includes, based on a maximum rainfall of 24 hours, a methodology to generate precipitations and build histograms of design rains. Additionally, the model contains the classification of soils according to the methodology of the USA's Natural Resources Conservation Service.

To estimate the average flow, a long-term water balance was performed, using the spatial analysis tool ArcGis in each cell of the study zone, based on the spatial cell/grid subdivisions of average precipitation and potential and real evaporation.

The developed methodology allows to perform analysis and obtain results from extreme events hydrograms at any point of the current. These flows are estimated using HEC-HMS, in compliance with the precipitation data and the physical characteristics previously obtained and available in the information system and processed by HEC/Geo-HMS. The hydraulic transit of the canal was performed with the Muskingum method.

In conclusion, a model was developed to reproduce the natural conditions and supports the decisions on water management in the San Antonio stream basin.

Keywords: hydro climatic characterization, surface water availability, average flow estimation, long-term balance, extreme flows.

INTRODUCCIÓN

La Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito ha desarrollado, por intermedio de su Centro de Estudios Hidráulicos, una metodología para evaluar la oferta hídrica de superficie basada en la solicitud hecha por la compañía Drummond Ltd. y los requisitos establecidos por la misma compañía, responsable de la minería a cielo abierto que se realiza alrededor de cuencas que conforman la zona de influencia de la zona minera del sur del departamento del Cesar (Colombia). La metodología contiene un balance hídrico a largo plazo para estimar los flujos medios en cualquier punto de la red de drenaje de una cuenca y calcular los caudales máximos para diferentes periodos de retorno, determinados en puntos definidos previamente.

El objetivo de este proyecto de investigación es evaluar la oferta hídrica superficial en la cuenca que conforma el área de drenaje de la cuenca del arroyo San Antonio (balance hídrico a largo plazo para descargas medias. Caudales mínimos y caudales máximos) para condiciones naturales, por medio de metodologías de hidrología convencionales, de acuerdo con Drummond Ltd. y con la información disponible.

RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

Con base en la información disponible se recolectaron datos de variables hidroclimáticas del área minera del Cesar que ha intervenido Drummond Ltd., hasta la división de la cordillera Oriental en la serranía del Perijá, con el objetivo de estructurar y ensamblar un modelo espacial para todas las zonas hídricas a través de una geodatabase (en la plataforma ARCSIG de ESRI). El modelo se complementó con las estaciones hidroclimáticas de la red nacional de estaciones del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam), las cuales se incorporaron como puntos en la base de datos del modelo.

Para establecer la cobertura del suelo y definir los números de la curva de escorrentía (CN), se tomaron los resultados de los estudios de zonificación del suelo de Colombia y del departamento del Cesar realizados por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). Se utilizaron ortofotos de la zona de estudio provista por el servicio Global Land Cover Facility, de la Universidad de Maryland, así como el modelo de elevación digital obtenido de la NASA. Los parámetros y los datos recopilados de diferentes fuentes se integraron en una base de datos general, la cual se construyó para usarla a partir de identificadores por niveles de enlace.

Adicionalmente, en la información se incluye la topografía disponible en estado natural y antrópico de los cauces de interés sobre la cuenca del arroyo San Antonio, indispensable para la delimitación de las cuencas hidrográficas y para la obtención de los parámetros morfométricos requeridos para el tránsito hidrológico. En las zonas de llanura se ha utilizado la información topográfica suministrada por Drummond Ltd., correspondiente a secciones de 250 metros de ancho cada 500 metros sobre el trazado del nuevo realineamiento, el cual se ha definido sobre predios de su propiedad. En la figura siguiente se presenta la red de drenaje natural de la cuenca del arroyo San Antonio (figura 1).

ANÁLISIS DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS E HIDRÁULICOS DISPONIBLES. TRABAJOS REALIZADOS EN GIS

Tal como se mencionó anteriormente, el objetivo principal de este trabajo de investigación es establecer y desarrollar un modelo hidrológico o hidráulico basado en un sistema de información geográfica (SIG) que permita calcular la escorrentía superficial en flujos medios y extremos. Por lo tanto, la información de campo y los estudios disponibles constituyen una fuente principal

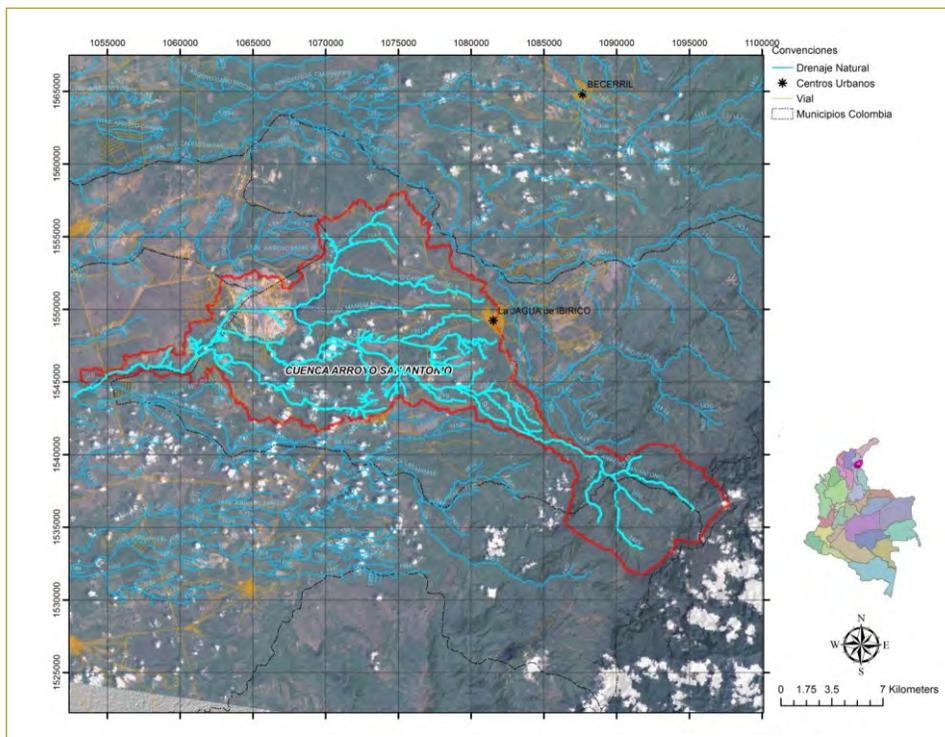


Figura 1. Red de drenaje natural de la cuenca del arroyo San Antonio.

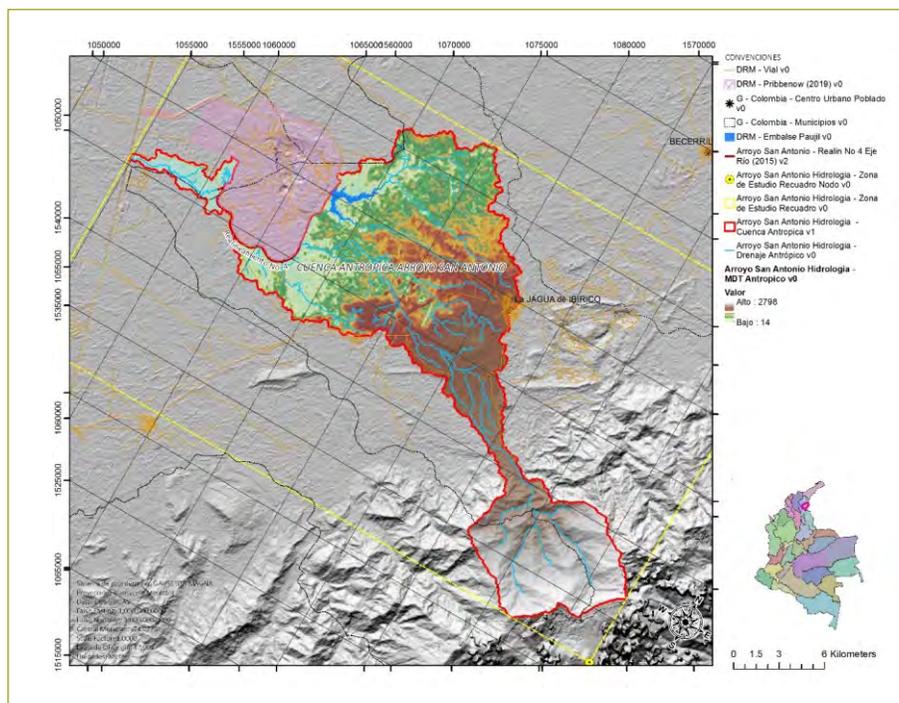


Figura 2. Modelo de terreno de la cuenca del arroyo San Antonio.

de contraste para la calibración del modelo a corto, mediano y largo plazo.

En la zona de estudio, Drummond Ltd. ha estado construyendo una red de información hidrológica que constituye el soporte para la calidad de los datos hidrológicos obtenidos del modelo desarrollado.

La información hidrológica e hidráulica se compone principalmente de trabajos previos para estudios de impacto ambiental en la zona del proyecto, de flujos medios y de trabajos complementarios en diferentes cuencas.

Implementación del modelo digital de terreno en el área de estudio

La caracterización topográfica georreferenciada se hizo por medio del modelo digital de elevaciones de la NASA (Aster GDEM), con una resolución aproximada de 30×30 metros, reacondicionado con los drenajes fotorrestituidos, así como la definición de las cuencas a partir del criterio de tramos de drenaje con aportaciones superiores o iguales a 4 km^2 . Adicionalmente, en este capítulo se recopilan algunas características morfológicas de las subcuencas delimitadas, tales como pendiente media, área y perímetro.

Del modelo general de terreno recopilado, correspondiente a los cuadrantes N09W074 y N10W074, se realizó el recorte de la zona específica utilizando un rectángulo definido previamente. La grilla recortada se usó para la generación de las subcuencas y la delimitación general de la cuenca hasta el punto de control o de salida con que se recortó de nuevo el modelo de terreno. El modelo de terreno resultante de la cuenca se presenta seguidamente (figura 2).

El modelo de terreno para la cuenca está compuesto por 1543 columnas y 949 filas, en una banda con tamaños de celda de 27,7778 metros y formato GRID tipo continuo.

A partir de la grilla de celdas de acumulación de flujo, y usando la herramienta HEC/Geo-HMS, se identificaron cuáles de ellas pertenecen a una corriente. Para esto se ha especificado como área de aportación el valor equivalente en suma de celdas a cuatro kilómetros cuadrados, por lo que la acumulación de flujo para una celda en particular debe exceder este valor para generar un sistema de drenaje. Es importante considerar que, a menor área de aportación utilizada, mayor será el número de corrientes identificadas y mayor será la dificultad en el cumplimiento de las condiciones paramétricas relacionadas con la estabilidad numérica respecto a los saltos de tiempo para el cálculo de los hidrogramas.

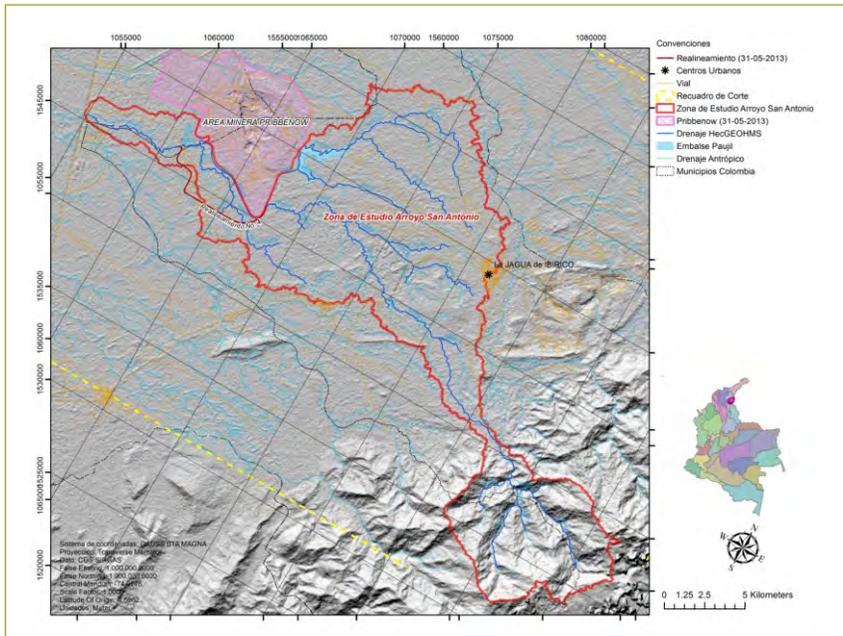


Figura 3. Red de drenaje procesada vs. red fotorrestituida.

El procedimiento general para la definición de drenajes incluye la creación de una grilla con las celdas identificadas como celdas de drenaje, la identificación de estas celdas con valores únicos para cada tramo y la creación de las entidades vectoriales tipo arco con los drenajes.

La red de drenaje de la topología geográfica está compuesta por 39 tramos, en una longitud de 158 kilómetros. Esta topología difiere en cuanto a su longitud respecto a la red fotorrestituida, debido a que para la esquematización del modelo se han excluido todos aquellos drenajes que no presenten aportaciones con áreas mayores de cuatro kilómetros cuadrados. A continuación se pueden observar las diferencias entre estas dos coberturas (figura 3).

Análisis de las precipitaciones y variables hidroclimatológicas

Estaciones denominadas “virtuales”

Teniendo en cuenta la localización y la cobertura sobre el área de interés de las estaciones de precipitación para el estudio regional de las precipitaciones, fue necesario definir algunas estaciones que se denominaron “virtuales”, con un valor de precipitación conocido, ubicadas en los extremos de la zona de estudio, correspondientes a la zona de alta montaña, que permitieran obtener un

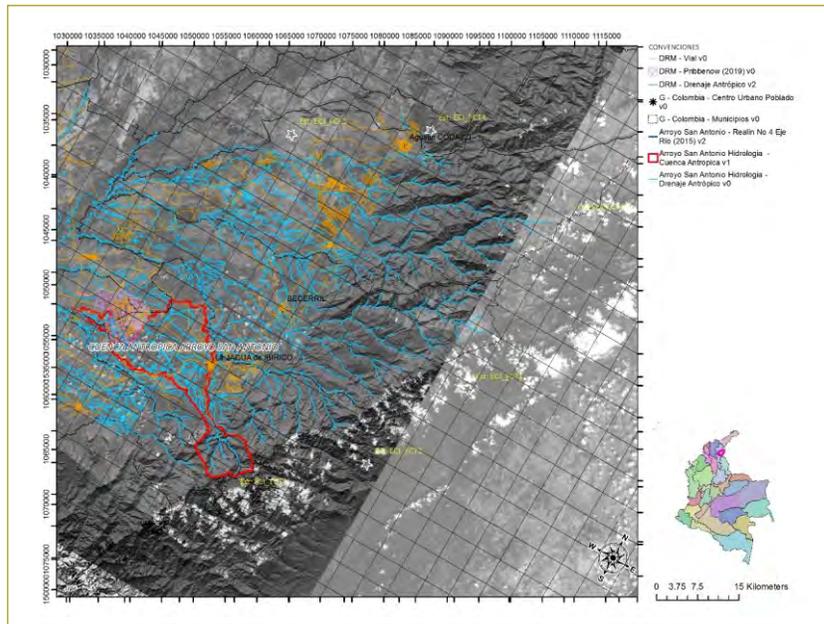
mapa con cobertura total en la zona de estudio al interpolar los valores representativos en un SIG.

Este último aspecto resultaba indispensable, ya que dicha información se usará posteriormente en la realización de los balances hídricos y en el estudio de las precipitaciones máximas en 24 horas, a través de los cuales se estiman los caudales medios y extremos máximos en los diferentes puntos del área del proyecto del arroyo San Antonio. A renglón seguido se puede ver la ubicación espacial de dichas estaciones virtuales (figura 4).

Precipitación total media mensual

Para la obtención de los valores totales anuales medios multianuales de precipitación se realizaron cálculos con los registros diarios disponibles, utilizando las series completas recopiladas; de igual manera, se hicieron los cálculos empleando solamente los registros totales mensuales, también para las series totales disponibles, y por último se estimaron los valores medios anuales en las estaciones con registros, en un periodo homogéneo, comprendido entre 1981 y 2003 en condición natural y entre 1981 y 2009 en condición antrópica, lo cual corresponde a series, con una extensión aceptable, de 23 y 29 años, que incluyen registros en condición antrópica luego de la intervención minera de la zona.

Figura 4. Localización de las estaciones virtuales en la zona de estudio.



En resumen, para la estimación del valor medio anual de precipitación en cada estación se obtuvieron valores para las series completas, a partir de los valores diarios, de los valores mensuales y de los registros anuales, en cada caso. El proceso, en cada estación, consistió básicamente en definir qué valores se incluían en los promedios y qué datos se descartaban.

Como resultado final, se generaron grillas interpoladas con los valores medios de la precipitación a escala regional. En la figura siguiente se puede apreciar el mapa interpolado de los valores de precipitación media mensual para el área de estudio (figura 5).

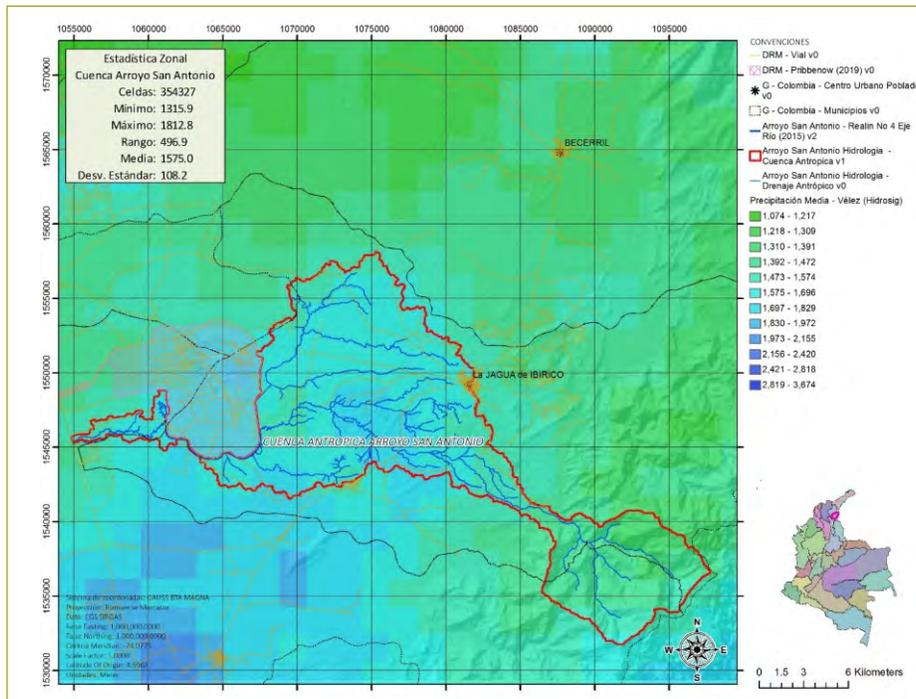


Figura 5. Grilla de valores medios multianuales de precipitación (mm).

Precipitación máxima en 24 horas

En el desarrollo del presente estudio hidrológico se adelantaron algunos análisis de los registros de precipitación máxima en 24 horas, teniendo en cuenta que la mayoría de las estaciones de precipitación son pluviométricas y que, en consecuencia, este se convertiría en el registro de máxima intensidad disponible en cada punto o estación.

Por otra parte, considerando que para toda el área del proyecto solo se cuenta con curvas IDF para una de las estaciones climatológicas de Drummond Ltd, construida con 12 años de registros de precipitación, de duración mínima de 30 minutos, resultaba previsible que las lluvias intensas, de relativa corta duración, deberían obtenerse en el proceso de simulación hidrológica a partir de los análisis de las precipitaciones máximas en 24 horas.

Consecuentemente, primero que todo se hizo un análisis sobre la disponibilidad de registros, tomando como válidos los años en los que los datos tenían por lo menos 9 meses.

Con base en el análisis de los registros de precipitación máxima en 24 horas, disponible mes por mes para cada año, se consultaron los datos sobre el número de años aptos con esta información. Además, con esta información se produjeron inicialmente las grillas o mapas

correspondientes al promedio de la precipitación máxima en 24 horas y a la desviación estándar del promedio de la precipitación máxima en 24 horas. Estos mapas representan la distribución espacial de dichas variables y son equivalentes a un proceso de regionalización, con lo que resulta posible estimar en cualquier punto o cuenca de la zona la precipitación máxima en 24 horas para un periodo de retorno (T_r) dado, mediante el ajuste de los valores leídos en las grillas a una distribución de valores extremos, en este caso la de Gumbel, corregida por el número de registros (23, de 1981 a 2003 en condición natural, y 29, de 1981 a 2009 en condición antrópica), bastante aceptada para lluvias máximas.

A renglón seguido se presentan los mapas de valores medios multianuales de precipitación máxima en 24 horas, interpolados espacialmente en la zona de estudio, sobre todo en la cuenca del arroyo San Antonio, para la condición natural y la condición antrópica (figuras 6 y 7).

Adicionalmente, en la figura siguiente se hace una comparación de los valores de precipitación mensual multianual, con el propósito de analizar la homogeneidad de los resultados por estación. Además, es posible apreciar la regularidad de los picos máximos y mínimos de cada estación, siendo este un referente de la homogeneidad de los resultados (figura 8).

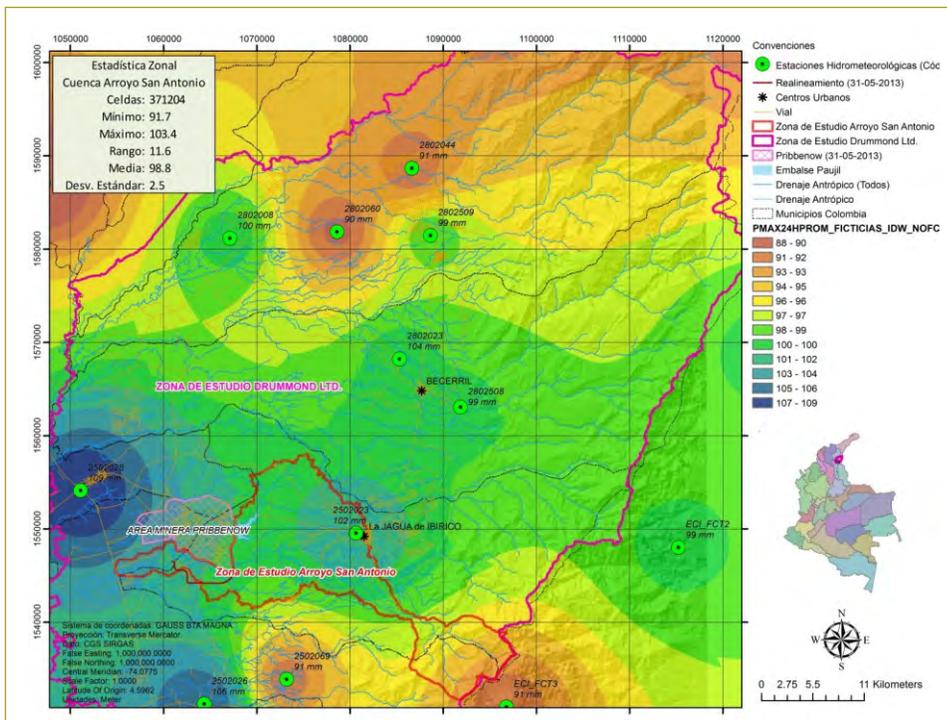


Figura 6. Grilla de valores medios multianuales de precipitación máxima en 24 horas (mm) en condición natural.

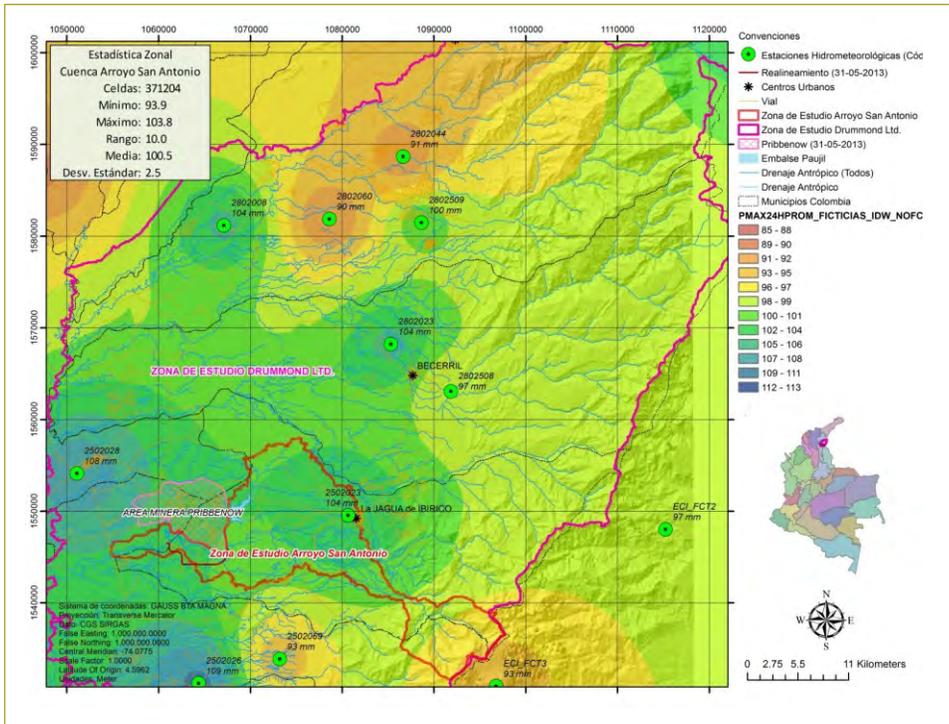


Figura 7. Grilla de valores medios multianuales de precipitación máxima en 24 horas (mm) en condición antrópica.

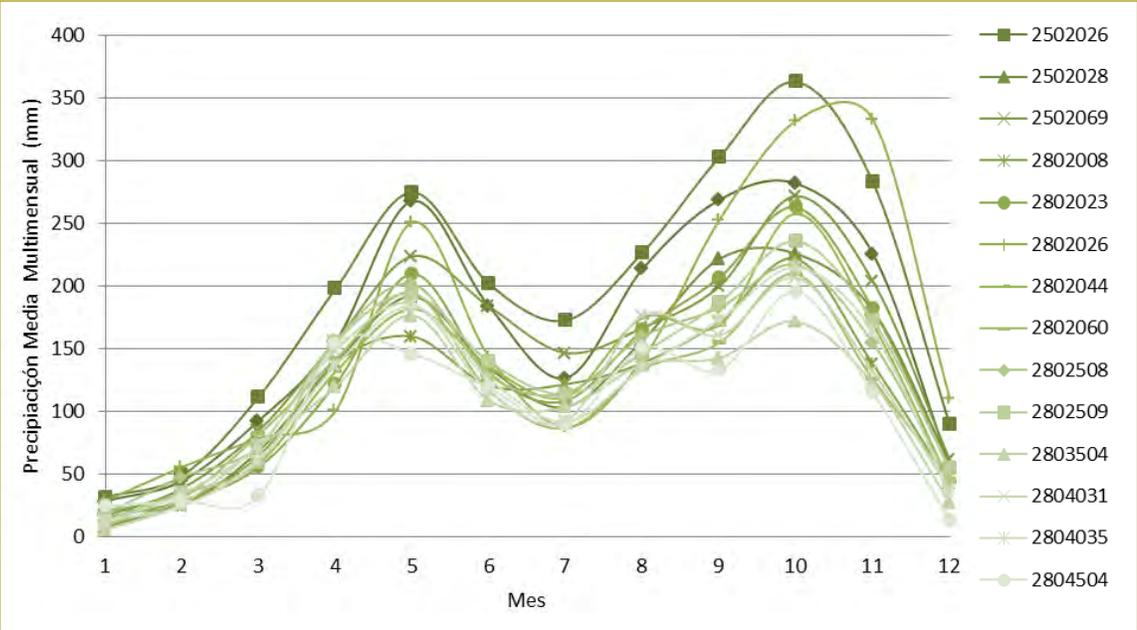
Lluvias intensas. Distribución temporal

Se seleccionaron tormentas máximas en la zona de estudio para el análisis temporal de las lluvias intensas, escogidas bien sea por su precipitación total o por su intensidad. Como resultado del análisis, más adelante se muestran el comportamiento de las lluvias intensas seleccionadas en la cuenca de estudio, la línea de ten-

dencia como regresión de todas las lluvias (punteada) y la ecuación correspondiente a dicha regresión (figura 9).

En esta figura es fácil apreciar, para las tormentas seleccionadas, que en general a las nueve horas se ha precipitado el 100 % de la lluvia, excepto en dos de las tormentas representadas. Así mismo, se puede concluir que a las seis horas ha ocurrido más del 95 % de la pre-

Figura 8. Precipitación media multimensual a partir de precipitación mensual total (mm) con serie completa.



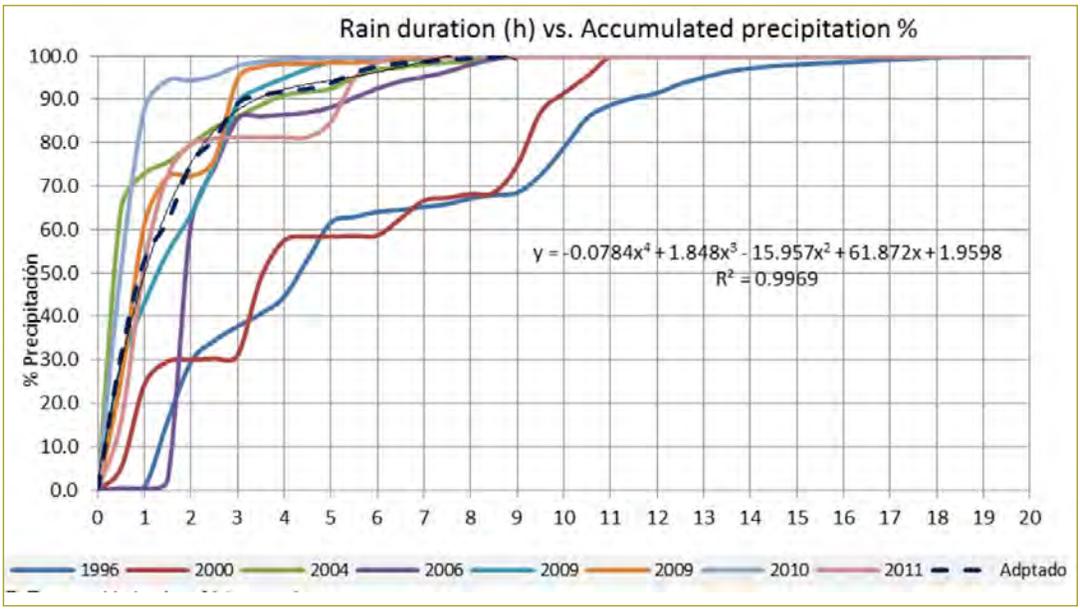


Figura 9. Comportamiento temporal de las lluvias intensas en la zona de estudio.

precipitación de 24 horas y a las tres horas se ha registrado cerca del 90 % del total precipitado en 24 horas.

De acuerdo con esta distribución, se adoptó un valor medio (línea de puntos en la gráfica), al tiempo que se establecieron la línea de tendencia y la ecuación para esta distribución.

Con base en los análisis efectuados con las lluvias seleccionadas anteriormente, se obtuvo una ecuación que define tanto la duración porcentual de la lluvia como su correspondiente porcentaje precipitado, teniendo en

cuenta que para lluvias con duraciones superiores a las 9 horas la precipitación total sería la de 24 horas, mientras que para duraciones menores se usaría la ecuación propuesta, que para ajustar los límites adecuadamente se llevó hasta el quinto grado (figura 10).

Así mismo, se presenta el histograma de los valores de la precipitación de 24 horas para diferentes duraciones de lluvia, calculado a partir de la aplicación del modelo de distribución temporal adoptado para esta investigación (figura 11).

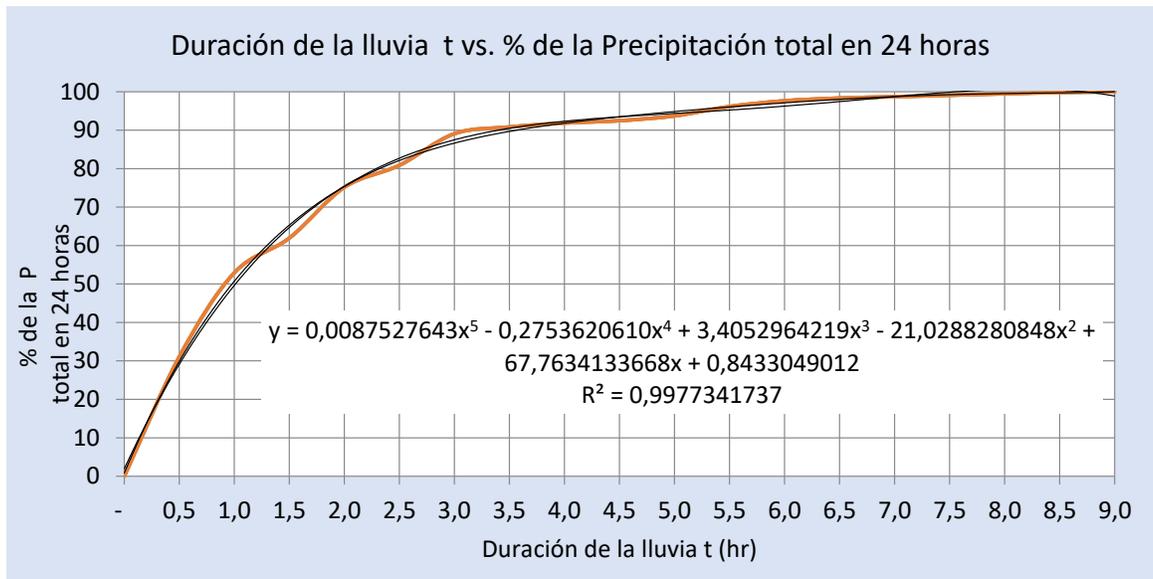
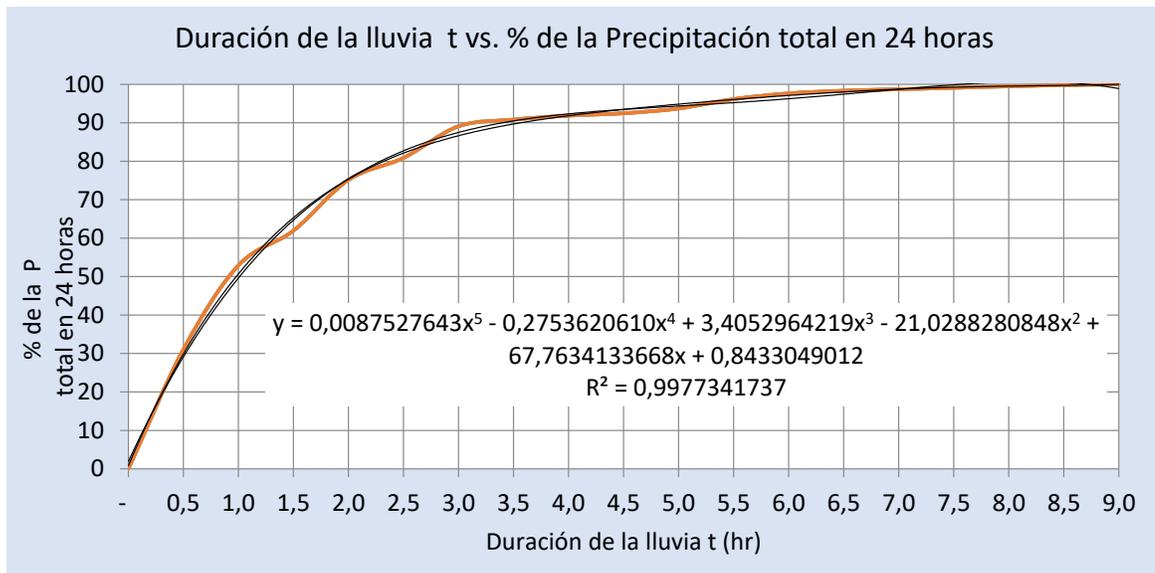


Figura 10. Relación de la duración de la lluvia vs. porcentaje estimado de P en 24 horas.

Figura 11. Histograma de porcentajes de P para diferentes duraciones de la lluvia, según el modelo de distribución temporal adoptado.



Análisis de temperatura

Además de la información de temperatura de las estaciones en terrenos llanos dentro del área de influencia del proyecto, se utilizaron los datos recopilados en los estudios hidroclimatológicos hechos por el Centro Nacional de Investigaciones de Café (Cenicafé) para generar un mapa de temperatura, cuya información es útil para determinar la evapotranspiración. El resultado se presenta en la figura siguiente (figura 12), correspondiente al mapa de temperatura media anual.

Análisis de evapotranspiración

Uno de los objetivos del estudio es calcular la evapotranspiración potencial y real anual, teniendo presente que con base en dicho parámetro se podrán hacer los balances hídricos a largo plazo y estimar caudales medios anuales a escala regional y en la zona específica del arroyo San Antonio. Dado que en los registros de datos de las estaciones de la zona no hay suficiente información y que además en la zona sur no existen estaciones cercanas, se aplicaron diferentes metodologías que permitieron la

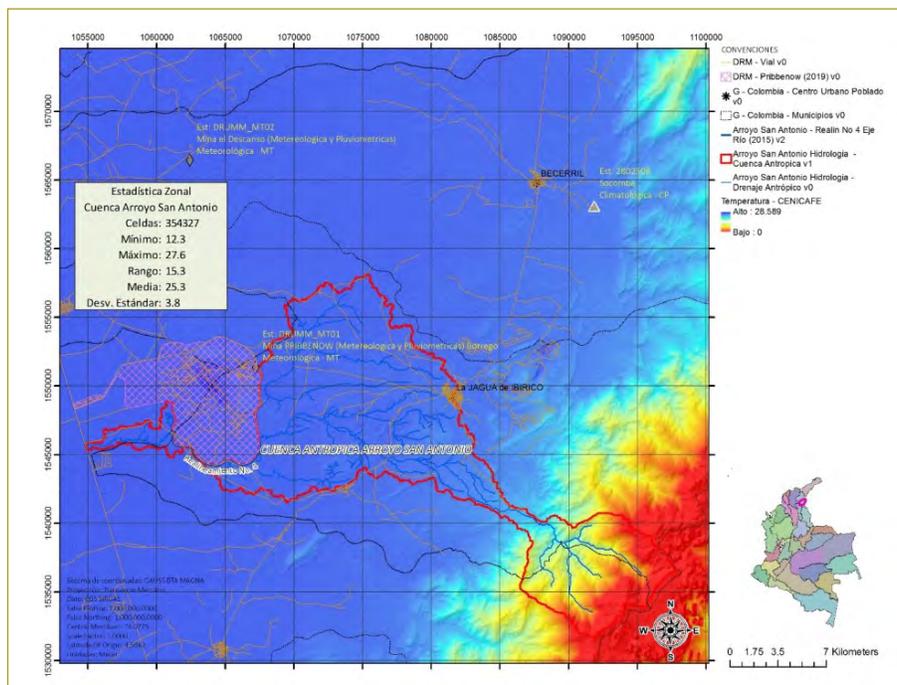
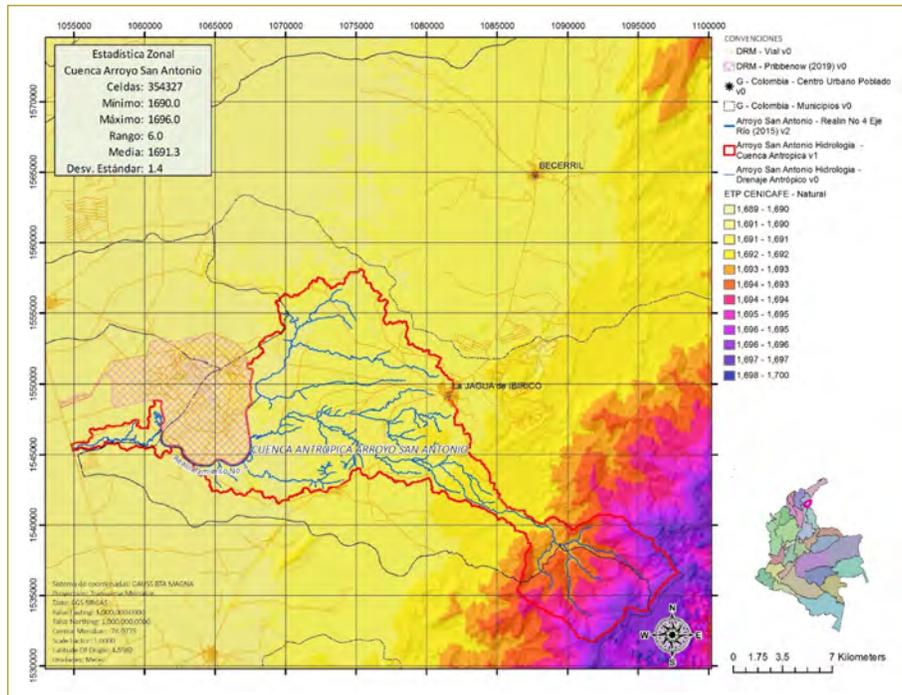


Figura 12. Mapa de temperatura media anual (°C), utilizando la expresión de Cenicafé.

Figura 13. Mapa de evapotranspiración potencial (mm). Modelo de temperatura de Cenicafé.



generación de grillas de evaporación potencial y real en cualquier punto; sin embargo, en el caso de la estimación de la evapotranspiración potencial, solamente se utilizó la expresión obtenida en los estudios climatológicos de Colombia, efectuados por Cenicafé. En la figura que aparece a continuación se presenta el mapa interpolado con los resultados de la precipitación potencial mensual en la zona de proyecto (figura 13).

Clasificación de los suelos utilizando la metodología propuesta por el U.S. Soil Conservation Service

La metodología propuesta por el Soil Conservation Service (SCS), del Departamento de Agricultura de Estados Unidos, permite estimar las pérdidas por infiltración y por encharcamiento o pérdida inicial en los análisis de lluvia-escorrentía. Dicho proceso de cálculo se hace mediante la asignación de un factor denominado CN (número de curva), que se establece a partir de varios factores, tales como el tipo de suelo, en lo referente a su permeabilidad, su uso, la condición hidrológica, relacionada con el grado de cobertura, la práctica agrícola –si se trata de suelos de esta clase– y la condición antecedente de humedad, entre otros aspectos.

En el caso particular de la cuenca del arroyo San Antonio, se utilizó la información de carácter regional,

producida en su mayoría por el IGAC, correspondiente a las asociaciones y clases agrológicas de la zona del Cesar (figura 14).

ANÁLISIS DE CAUDALES MEDIOS

Para estimar los flujos medios en cualquier punto de la cuenca, se hizo un balance hidrológico a largo plazo en cada celda dentro del área de estudio, en función de los mapas de precipitación media y evapotranspiración, que permiten determinar los flujos medios en un punto del mapa o de la grilla que se quiera modelar.

La siguiente expresión ayuda a establecer el caudal medio en cada celda, en el que, al valor estimado de precipitación por celda, se le resta la abstracción correspondiente a la evapotranspiración real. El valor correspondiente al área sobre la que se estima el caudal corresponde al tamaño de cada pixel, definido por la resolución espacial de las grillas utilizadas.

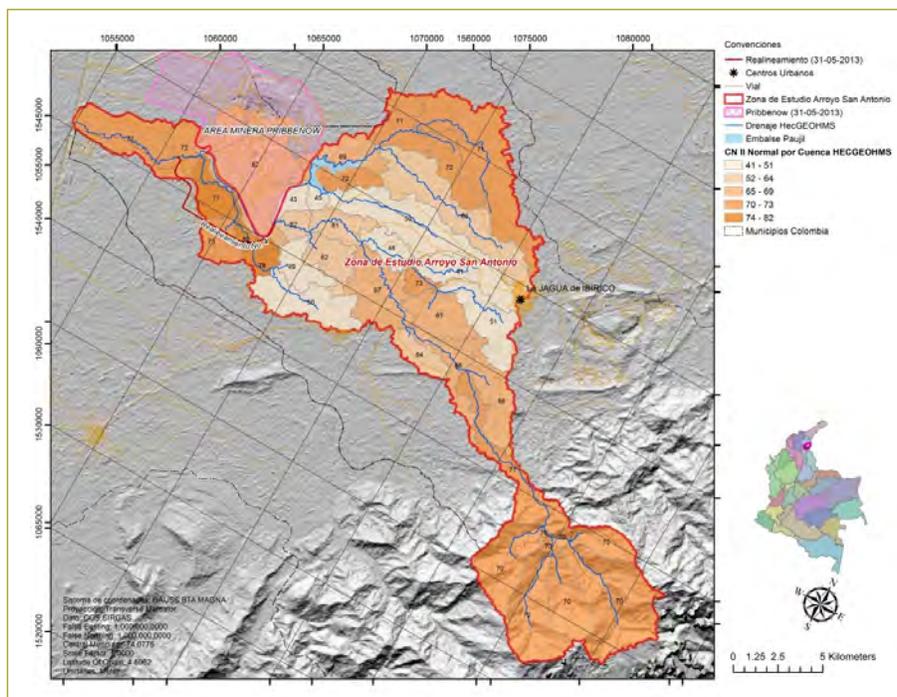
$$Q = (P - EVT) \times A$$

Ecuación 1. Determinación del caudal medio en un punto (grilla) de la cuenca.

Donde:

Q: caudal medio en m³/s.

Figura 14. Valores medios de CN II, condición normal, por subcuena de la cuenca del arroyo San Antonio.



P: precipitación (en mm/año).

EVT: evapotranspiración (en mm/año).

A: área de cada celda ($27,7778 \text{ m} \times 27,7778 \text{ m} = 771,60617284 \text{ m}^2$).

Seguidamente, se registran algunos valores obtenidos de caudales medios en puntos específicos de la corriente, estimados con base en los valores acumulados obtenidos de las grillas. El área indicada corresponde al área de aportación acumulada en condición natural hasta dicho punto (tabla 1).

CAUDALES EXTREMOS

En razón de que el modelo desarrollado es compatible con un SIG, es posible determinar flujos extremos en cualquier punto de la red de drenaje. Para lograr esto es necesario, como un trabajo previo, establecer el área de drenaje y su correspondiente rejilla de drenaje que permita la construcción del modelo hidrológico en HEC/Geo-HMS, usado en el modelo HEC-HMS.

Se calcularon diferentes parámetros físicos e hidrológicos para cada una de las principales cuencas

Tabla 1
Caudales medios en puntos de estudio para el estado natural de la cuenca del arroyo San Antonio

x	y	Clase	PNAME	Área (km ²)	Descripción	Caudal medio Cenicafé (m ³ /s)
1054890	1545310	Drummond	D20	311,5	Punto de control más aguas abajo sobre vía nacional	4,66
1067500	1546000	San Antonio	SA1	237,4	Punto de inicio de la modelación hidráulica. Unión de hidrogramas provenientes del canal Paujil y los drenajes de la zona de montaña	2,44
1066970	1544470	San Antonio	SA2	18,5	Punto de entrada lateral del Caño de Piedra hasta antes del nuevo canal de realineamiento N° 4	0,28
1061910	1547200	San Antonio	SA3	294,6	Punto de entrega del canal de realineamiento N° 2 (existente) al arroyo San Antonio. Incluye área del Caño de Piedra	0,49
1060890	1546530	San Antonio	SA4	298,6	Punto de entrega del canal de realineamiento N° 4 (propuesto) al arroyo San Antonio	4,55

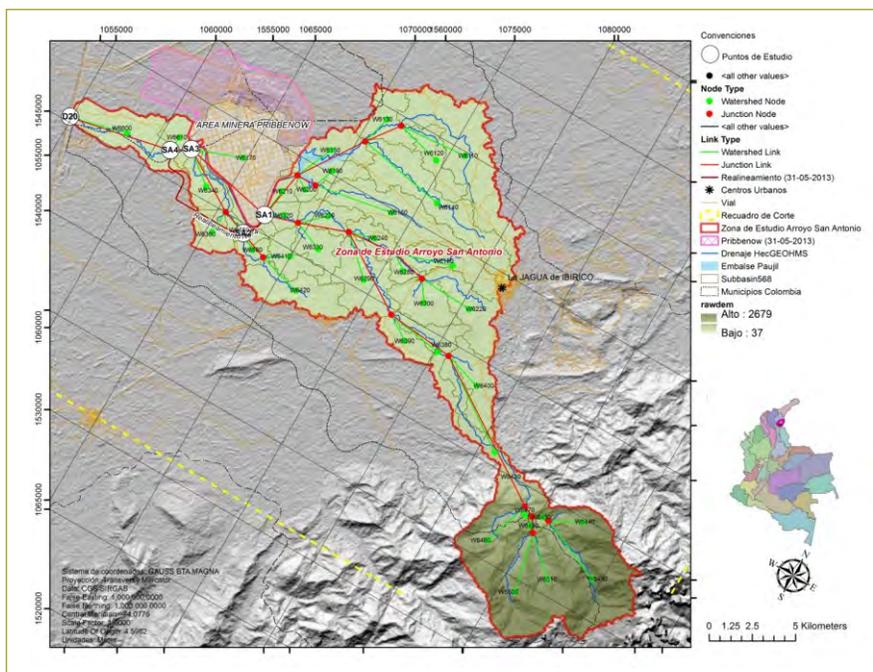


Figura 15. Esquema geográfico de subcuencas en HEC/Geo-HMS.

determinadas en este estudio, así como también para cada una de sus subcuencas, que son indispensables en la ejecución del modelo desarrollado. De manera similar, para cada una de las corrientes de ríos consideradas en cada cuenca principal, se estimaron los parámetros empleados en el método de Muskingum para el enrutamiento de canales.

En el marco de esta investigación, se utilizaron los métodos de SCS para pérdidas por lluvia y para la transformación de escorrentía pluvial y Muskingum para el tránsito de la creciente. Seguidamente, se presenta un esquema general de las subcuencas usadas para la modelación de caudales extremos en la herramienta HEC/Geo-HMS (figura 15).

En la transformación de la lluvia-escorrentía se utilizó el modelo HEC-HMS, el cual estima el hidrograma de salida con base en precipitación efectiva. Para lograr esto, se empleó el método del número de curva SCS de Estados Unidos, número que establece la precipitación efectiva basada en el CN. Como se mencionó en el presente artículo, el modelo se generó con la herramienta HEC-HMS para trece subcuencas, que corresponden a la cuenca del arroyo San Antonio.

Los resultados del modelo se calibraron con los registros de caudales medidos en la cuenca del arroyo El Zorro, corriente localizada también en el sur del Cesar, la cual tiene información de campo que permite

contrastar los resultados conseguidos con los resultados obtenidos en este modelo HMS.

Con el objetivo de mostrar la aplicación del modelo desarrollado, a continuación se presenta el resultado de la modelación del punto denominado “D20”, correspondiente al punto de control de la cuenca, situado en el sitio más aguas abajo de la modelación. A renglón seguido se muestran los resultados obtenidos para 2,33, 5, 10, 25, 50 y 100 años de periodo de retorno (tabla 2 y figura 16).

CONCLUSIONES

- Se construyó un modelo de escorrentía de la superficie de la lluvia, apoyado en un sistema de información geográfica que muestra que, una vez integrado a la información, es posible determinar fácilmente múltiples escenarios con múltiples modelos.
- Se probó con éxito el modelo de escorrentía en la cuenca del arroyo San Antonio, corriente ubicada en la zona minera de Drummond Ltd., en el sur del departamento del Cesar (Colombia).
- A pesar de la escasa información hidrológica, se desarrolló un modelo para la generación de hidrograma de crecientes y generación de caudales medios. En este modelo se tiene en cuenta la distribución espacial y temporal de la lluvia.

Tabla 2

Caudales máximos para el punto de control de la cuenca del arroyo San Antonio. Diferentes periodos de retorno

Puntos de estudio D20								
Área de drenaje sin Zona Sur de Montaña (km ²)	311,5	Inicio modelación	01Jan2013, 00:15	Factor de atenuación por área	0,6	Condición	Antrópica	
Resultado	Duración (h)	Archivo .csv	Periodo de retorno Tr					
			2,33	5	10	25	50	100
Q _{máx} (m ³ /s)	9 h	ECI_D20_9H-AN-TR_FS060.csv	15,4	28,5	41,2	60,2	75,7	92,1
Tiempo al pico			02Jan2013, 09:14	02Jan2013, 08:51	02Jan2013, 08:35	02Jan2013, 08:21	02Jan2013, 08:13	02Jan2013, 08:06
Volumen (mm)			6,71	12,31	17,68	25,52	31,99	38,75
Rendimiento máximo (m ³ /s x km ²) (Q/A)			0,049	0,091	0,132	0,193	0,243	0,296

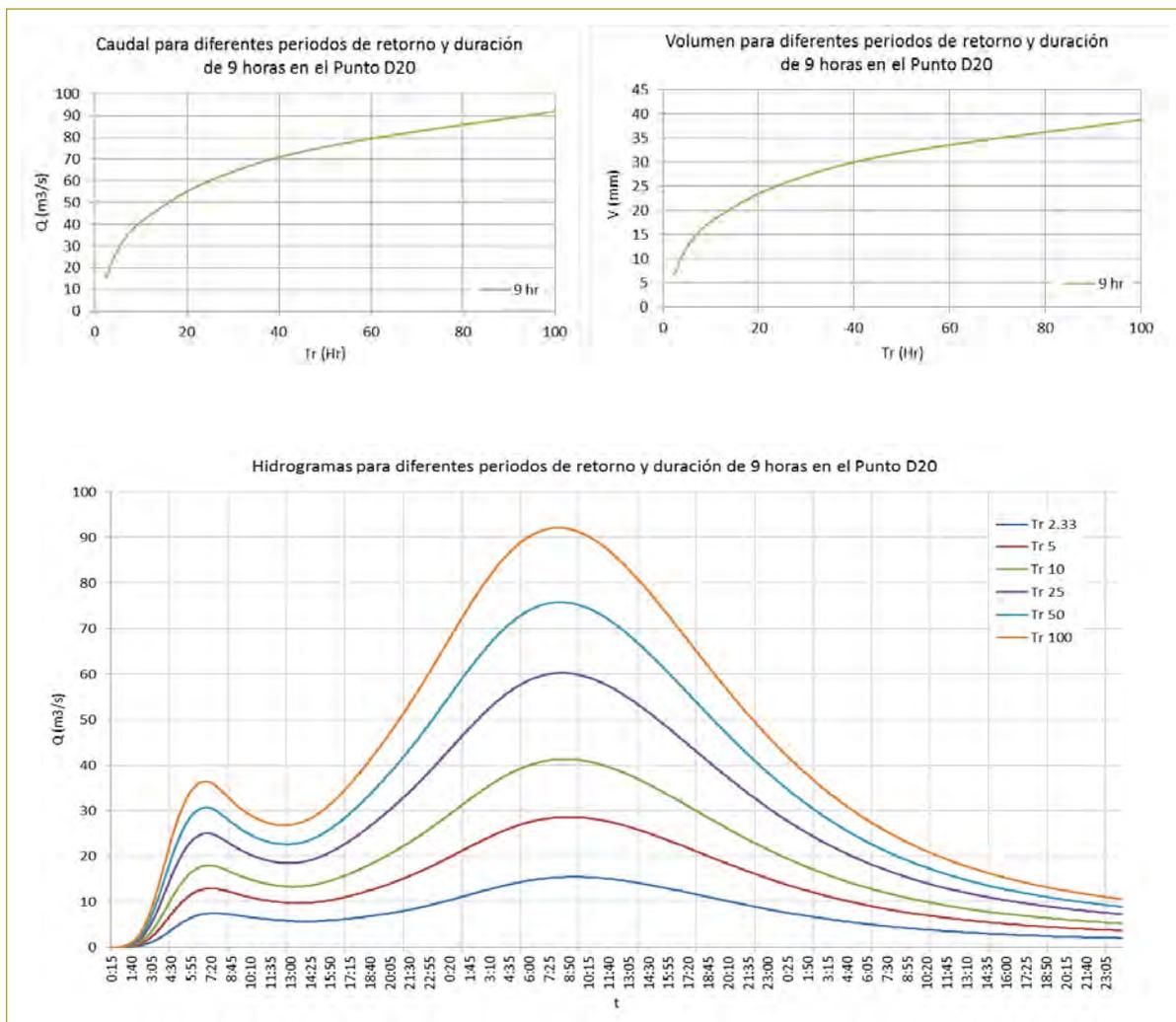


Figura 16. Hidrograma para eventos extremos para el punto de control de la cuenca del arroyo San Antonio. Diferentes periodos de retorno.

- El modelo desarrollado es dinámico y depende fundamentalmente de la calidad de la información de entrada, proveniente de los registros hidrológicos en la zona de estudio y los datos del tipo de suelo en la cuenca.
- El módulo HEC/Geo-HMS de ArcGIS es una herramienta que facilita la transformación de la escurrimiento de la superficie de la lluvia mediante el uso de toda la información geográfica disponible.
- Para el caso concreto de las cuencas hidrográficas que conforman la zona minera en el sur del Cesar (Colombia), se puede obtener información valiosa de los flujos medios y máximos en cualquier punto del sistema.

Reconocimientos

El Centro de Estudios Hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería quiere agradecer especialmente a Drummond Ltd. por su apoyo incondicional a este proyecto. La información que proporcionaron y sus recomendaciones fueron muy importantes para lograr los objetivos de este trabajo.

REFERENCIAS

- Chow, V.T. et al. (1988). *Applied hydrology*. Nueva York: McGraw Hill Book Company.
- Drummond Ltd. (2004-2014). Collected information corresponding to more than 30 consulting works about watersheds hydro climatological characterization. Watersheds in the mining area of Central Cesar State, Colombia.
- Esri (2010). ArcGIS 10.
- Landsat (2001). Orthorectified Landsat digital data.
- NASA. Digital elevation models, WGS 1984.
- U.S. Army Corps of Engineers. HEC-HMS 4.0.

Dispositivo para el ensayo de penetración estática de cono, utilizando sensores de presión hidráulica en el cono

Device for static cone penetration test, using hydraulic pressure sensors in the cone

WILSON ANDRÉS VÁSQUEZ ROMERO¹ - GUILLERMO PABÓN GUTIÉRREZ²

1. Ingeniero civil de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, ingeniero electromecánico de la Escuela Tecnológica Instituto Técnico Central, magíster en Ingeniería Civil de la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

2. Ingeniero civil de la Universidad Nacional de Colombia, M.Sc. y Ph.D., profesor de cátedra de la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

willand_v@hotmail.com, ing.wilsonvasquez@gmail.com -
guillermo.pabon@wsp.com, gpabongutierrez@gmail.com

Recibido: 05/02/2021 Aceptado: 25/02/2021

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

Resumen

En este artículo se presentan el diseño, la fabricación y la puesta en marcha de un cono instrumentado usando sensores de presión hidráulica, el cual cuenta con un sistema de adquisición de datos y una máquina para hincarlo. El cono propuesto, que registra la fuerza en la punta y la fricción en el fuste, corresponde a una alternativa desarrollada en Colombia.

Se establecieron dos sitios de investigación; el primero está en el campus de la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, y el segundo, en la localidad de Fontibón. En ambos sitios se efectuaron sondeos por los métodos convencionales, con el objeto de caracterizar geotécnicamente el subsuelo, y también se realizó el hincado del cono propuesto, registrando la presión en la punta y la fricción en el fuste.

Una vez obtenida la información con el cono instrumentado, se determinó el parámetro del cono “Nkt” a partir de la resistencia al corte no

drenada, obtenida mediante ensayos de compresión inconfiada, triaxial no consolidado no drenado y veleta de campo; también se obtuvo el parámetro del cono a partir de la relación de fricción “Fr”, y el límite líquido. Luego de calcular el parámetro del cono “Nkt”, se encontró que el valor depende del tipo de ensayo que se use para evaluar la resistencia al corte no drenada.

Para el sitio de investigación 1 (Escuela) y el sitio de investigación 2 (Fontibón), se determinaron ecuaciones de correlación con respecto al límite líquido y al índice de plasticidad.

Palabras claves: cono propuesto, ensayo CPT, piezocono, parámetro del cono, Nkt.

Abstract

This article presents the design, manufacture and commissioning of an instrumented cone using hydraulic pressure sensors, which has a data acquisition system and a machine to drive it. The proposed cone, which

registers the force at the tip and the friction at the shaft, corresponds to an alternative developed in Colombia.

Two research sites were established; the first site is at the campus of Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, and the second, in the locality of Fontibón. In both research sites, boreholes were carried out by conventional methods, to characterize the subsoil geotechnically. Likewise, at both sites, the proposed cone driving was carried out, recording the pressure at the tip and the friction at the shaft.

Once the information was obtained with the instrumented cone, the cone parameter “Nkt” was determined from the undrained shear strength, obtained by unconfined compression, unconsolidated undrained triaxial, and field vane tests; the parameter “Nkt” was obtained also from the cone friction ratio “Fr”, and the liquid limit.

Keywords: Proposed cone, CPT test, piezocone, cone parameter, Nkt.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la exploración del subsuelo en Colombia se realiza en gran parte mediante los métodos convencionales, esto es, por medio de perforación mecánica o perforación manual, donde, para materiales cohesivos, se ejecuta el ensayo de resistencia al corte con veleta o se extraen muestras mediante tubo de pared delgada para ensayos de laboratorio, y para materiales granulares se ejecuta el ensayo de penetración estándar (SPT, por su sigla en inglés).

En la toma de muestras con el tubo de pared delgada se genera alteración de esta en diversos aspectos, como en el hincado del tubo, extracción de la muestra, conservación de la humedad natural, transporte, almacenamiento y tallado de la muestra. En el ensayo de penetración estándar también se presenta alteración de los resultados del ángulo de fricción del suelo granular y en los parámetros de compresibilidad, debido a deficiencias en el peso de la masa, el número de golpes, y en la altura de la caída libre de la masa.

Dichas alteraciones generan cambios en los parámetros de resistencia al corte drenada del suelo, como el ángulo de fricción y la cohesión efectiva (ϕ' , C'), la resistencia al corte no drenada (C_u) y los parámetros de compresibilidad, parámetros que se utilizan para el análisis del comportamiento del suelo para diferentes campos de la geotecnia.

La exploración mediante técnicas avanzadas, tales como Down Hole, ReMi, MASW y refracción sísmica, y ensayos como el dilatómetro, el dilatómetro sísmico SDMT, el presiómetro de Ménard PMT, el piezocono CPTu y el piezocono sísmico SCPTu, generan una alteración mínima en los suelos, lo que permite obtener

parámetros de resistencia y compresibilidad del suelo más confiables, así como una evaluación de propiedades más continua y detallada.

Las exploraciones con técnicas avanzadas se ven limitadas por el elevado precio de los equipos; las empresas fabricantes de dichos equipos son extranjeras y tienen poca representación en Colombia, además del alto costo de los mantenimientos correctivos del equipo.

Sin embargo, es importante que en el país se aumente el uso de estos métodos de exploración, dado que el crecimiento de la infraestructura nacional con obras de gran inversión necesita parámetros del suelo más confiables, que conduzcan a diseños eficientes.

Una de las técnicas avanzadas de exploración es el ensayo de penetración estática de cono (CPT), que consiste en penetrar en el suelo de manera controlada una punta cónica, junto con un fuste (cuerpo cilíndrico), los cuales se encuentran instrumentados, obteniendo la presión en la punta, la fricción en el fuste y la presión de poros.

A partir de la presión en la punta, la fricción en el fuste y la presión de poros, se pueden obtener la resistencia al corte no drenada y el ángulo de fricción, y con el uso de correlaciones se determinan el coeficiente de consolidación, la densidad relativa, la permeabilidad, el módulo de Young, el módulo de corte, la relación de sobreconsolidación, la compresibilidad y la sensibilidad de los suelos.

El equipo es penetrado por una máquina hidráulica a una velocidad constante de 20 ± 5 mm/s, y registra, mediante un sistema de adquisición de datos, la resistencia en la punta, la fricción en el fuste y la presión de poros cada 5 cm de penetración.

El ensayo de piezocono “CPTu” tiene la ventaja de obtener perfiles rápidos y continuos, así como datos confiables y repetibles, debido a que no depende de errores de operadores; sin embargo, tiene sus desventajas, como su alta inversión, la necesidad de personal calificado para su operación, no obtiene muestras durante la ejecución y, además, la penetración se ve restringida en gravas o materiales altamente cementados.

En el presente artículo se expone un cono, que registra la presión en la punta y la fricción en el fuste, mediante un sistema hidráulico con transductores hidráulicos, lo que lleva a tener un equipo de menor costo y de fácil acceso a espacios limitados, puesto que la máquina que aplica la carga se diseñó con unas

dimensiones de 1,60 m de longitud por 1,0 m de ancho y 2,2 m de altura; cabe destacar que su costo de mantenimiento es más bajo, en razón de que la mayoría de sus partes son de fabricación nacional, lo que hace que el costo de importación disminuya.

Se establecen dos sitios de investigación: el primer sitio corresponde al campus de la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería y el segundo se encuentra ubicado en la localidad de Fontibón, específicamente en la carrera 104A bis # 23D-12.

Una vez obtenidas la presión en la punta y la fricción en el fuste con el cono propuesto en ambos sitios de investigación, se procedió a comparar dichos resultados con los reportados por el piezocono convencional, para luego determinar el parámetro del cono “Nkt”, el cual se recomienda determinar localmente.

En el sitio de la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería se llevó a cabo la penetración del piezocono convencional durante el desarrollo del proyecto titulado “Caracterización geomecánica estática y dinámica a partir de exploración directa, indirecta y ensayos de laboratorio en el Sitio de Experimentación Geotécnica en la Escuela Colombiana de Ingeniería (Segeci)”, investigación realizada por los ingenieros Sarmiento y León (2016).

METODOLOGÍA

En el piezocono convencional, se emplean celdas de carga con galgas extensiométricas para medir la fuerza en la punta y la fricción en el fuste. En los diseños básicos se utilizan celdas de carga separadas o celdas de

carga de sustracción. Más adelante se pueden observar tres tipos de diseño de conos (figura 1).

La fuerza en la punta se registra con una celda de carga que trabaja a compresión, en tanto que la fricción en el fuste es registrada con otra celda que recibe carga a compresión (figura 1a)); en este diseño, las dos celdas de carga trabajan por separado.

En el otro diseño indicado (figura 1b)), la celda de carga que registra la fuerza en el cono trabaja a compresión, mientras que la celda de carga que registra la fricción en el fuste trabaja a tensión.

Finalmente, en el último diseño presentado (figura 1c)), que corresponde al cono con celdas de carga de sustracción, dos celdas se encuentran en serie, de tal manera que la celda de carga S1 capta la fuerza en el cono y la celda de carga S2 registra la fuerza en el cono más la fricción en el fuste, lo cual indica que para obtener la fuerza de fricción en el fuste se le debe restar al dato obtenido en la celda de carga S2, la fuerza registrada en el cono por la celda S1.

En la figura siguiente (figura 2), se observa un corte de un cono donde se visualizan las galgas extensiométricas adheridas a un cuerpo cilíndrico, conformando de esta manera dos celdas de carga: una registra la fuerza en el cono y la otra registra la fricción en el fuste.

Las galgas extensiométricas están compuestas por materiales eléctricos dispuestos en una forma ondulante, adheridos a una película (figura 3). Cuando se estira la película, los conductores se alargan y cuando la película se comprime, se acortan. Las deformaciones del conductor generan cambios en la resistencia de los conductores eléctricos. A partir de los cambios de resistencia se puede calcular la deformación, ya que la

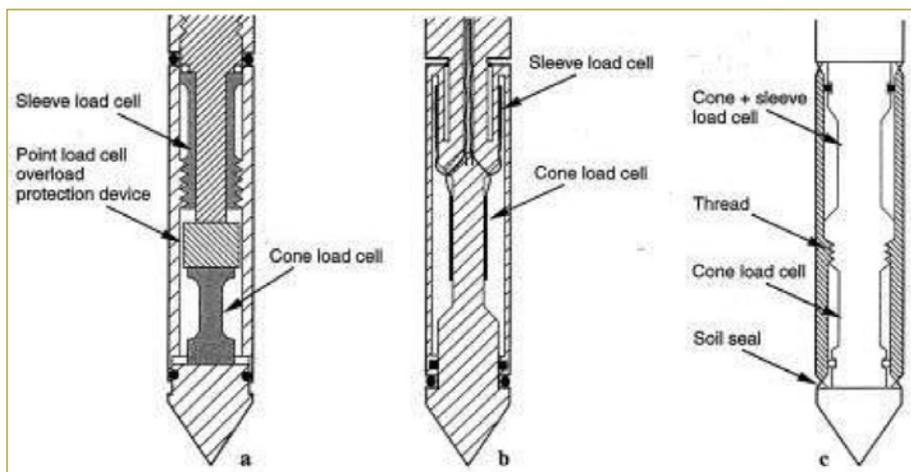


Figura 1. Tipos de diseño de conos de penetración: a) Celdas de carga por punta y fricción trabajando a compresión. b) Celda de carga por punta trabajando a compresión y celda de carga de fricción trabajando a tensión. c) Celdas de carga en serie por sustracción.

Fuente: Robertson & Cabal (2010).

Figura 2. Corte de piezocono con visualización de galgas extensométricas.
Fuente: Robertson (2015).

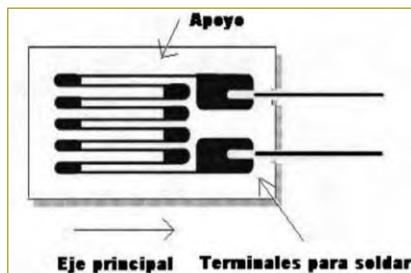


Figura 3. Galgas extensométricas.
Fuente: Hottinger, Brüel & Kjaer (2017).

resistencia eléctrica se incrementa en forma proporcional a la elongación y disminuye con la contracción.

Para registrar la presión con transductores, se necesita un sensor que mide el valor de presión y lo convierte en una señal eléctrica. Habitualmente, se colocan cuatro cintas extensométricas en un diafragma (figura 4), donde la deformación del diafragma provoca la deformación de las cintas y genera un aumento o una reducción proporcional de la resistencia.

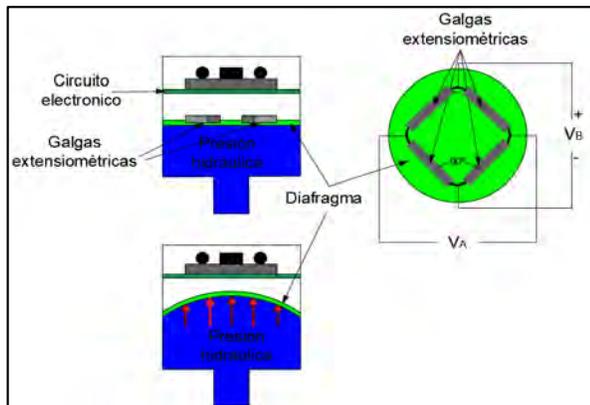


Figura 4. Ubicación de galgas extensométricas en un sensor de presión hidráulico resistivo.
Fuente: Velasco (2000).

Diseño y fabricación del cono propuesto

A continuación (figura 5), se indica el esquema del cono diseñado para esta investigación, con los transductores de presión hidráulica.

Se diseñó y fabricó el cono instrumentado a partir de las dimensiones de los sensores de presión, los vástagos y las camisas de los cilindros hidráulicos, así como el diseño del sistema de adquisición de datos, el cual registra cada segundo, la presión en la punta, y la fricción en el fuste, durante la penetración del cono instrumentado en el subsuelo (figura 6).

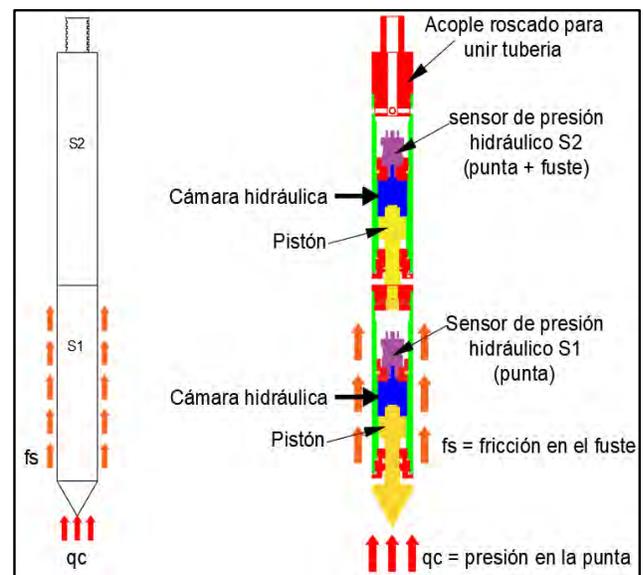


Figura 5. Ubicación de los sensores de presión hidráulica en el cono y en el fuste.

Fuente: Elaboración propia.

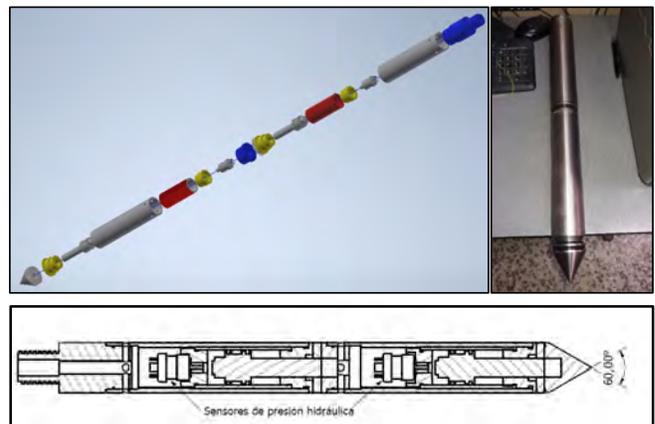


Figura 6. Cono instrumentado modelado.

Fuente: Elaboración propia.

En la etapa de diseño, se seleccionaron los dispositivos para la adquisición de datos de los transductores de presión del cono instrumentado; después se procedió a adquirir y conectar los equipos, de acuerdo con el diseño del circuito eléctrico (figura 7).

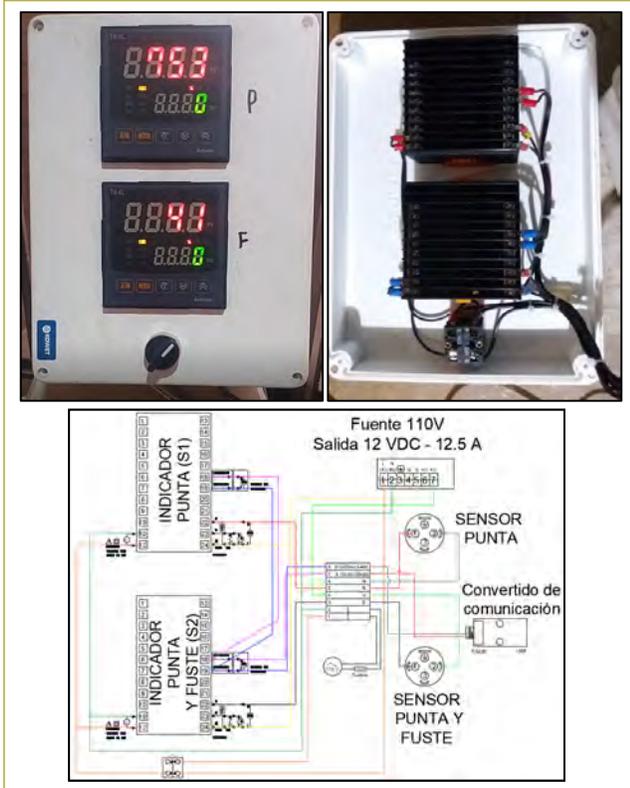


Figura 7. Elementos del sistema de adquisición de datos y diseño eléctrico.

Fuente: Elaboración propia.

Se diseña y fabrica la máquina que aplica la carga estática, con una capacidad de 5 ton, aproximadamente, para un cono de 60 mm de diámetro y una velocidad de aplicación de la carga de 20 ± 5 mm/s (figura 8).

Calibración

Una vez fabricado y ensamblado el cono instrumentado, se procede a calibrarlo en un marco de carga con una celda de carga tipo S, procedimiento que se realizó en el Laboratorio de Ingeniería Civil de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas (figura 9). También se determinaron la precisión y exactitud de los sensores que registran la resistencia en la punta y la fricción en el fuste.



Figura 8. Modelación y construcción del marco para la aplicación de la carga.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 9. Calibración del cono instrumentado (Laboratorio de Ingeniería Civil de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas).

Fuente: Elaboración propia.

La precisión y la exactitud promedio del sensor S1 que registra la presión en la punta son de 1,92 % y 2,49 %, respectivamente, mientras que la precisión y la exactitud promedio del sensor S2, que registra la presión en la punta y la fricción en el fuste, es de 2,71 % y 2,86 %, en ese orden (figura 5), las cuales son mayores, pero cercanas, a la precisión y la exactitud recomendadas por la ASTM D5778-12, “Standard Test Method for Electronic Friction Cone and Piezocone Penetration Testing of Soils”, la cual corresponde a 2 %.

El diámetro del cono diseñado es de 60 mm, que no cumple con los diámetros normalizados por la norma ASTM D 5778, los cuales son de 35,7 mm o 43,7 mm,

debido a que el diseño está limitado por las dimensiones de los sensores de presión hidráulica; cabe destacar que en el mercado se encuentran conos disponibles desde 16 mm hasta 71,4 mm de diámetro (figura 10 y tabla 1).

Figura 10. Rango de tamaños de conos en el ensayo CPT (2 cm², 10 cm², 15 cm², 40 cm²).

Fuente: Robertson y Cabal (2010).



Tabla 1

Rangos de diámetro y área de piezocono

Diámetro (mm)	Área (cm ²)
16,0	2
35,7	10
43,7	15
71,4	40

Fuente: Robertson y Cabal (2010).

Según Vertek (2015), los conos pequeños de hasta 1 cm², en el ensayo CPT, se utilizan en el laboratorio o investigaciones especializadas, mientras que los conos de mayor diámetro ofrecen una resistencia al cono más precisa en suelos de consistencia blanda. El cono propuesto está entre los rangos indicados por Robertson y Cabal (2010) (tabla 1), y su aplicación se desarrollará en suelos de consistencia blanda, por lo que se encuentra entre las aplicaciones descritas por Vertek (2015).

Hincado del cono propuesto en los sitios de investigación 1 y 2

Una vez que se diseñó y fabricó la máquina para aplicar la carga, el cono propuesto y el sistema de adquisición

de datos, y se hizo su respectiva calibración, se procedió a hincar el cono en los sitios de investigación 1 y 2.

El sitio de investigación 1 (Escuela) y el sitio de investigación 2 (Fontibón) están localizados en la ciudad de Bogotá, en la misma formación geológica “Q1sa” descrita por el Servicio Geológico Colombiano como formación Sabana, la cual corresponde a depósitos de capas de arcillas; hacia los bordes se encuentran capas de arenas, arcillas arenosas, turba y, en ocasiones, gravas.

De acuerdo con la exploración y caracterización geotécnica del sitio de investigación 1 (Escuela) y del sitio de investigación 2 (Fontibón), se tiene en ambos lugares un perfil promedio, conformado por arcillas de alta plasticidad, de consistencia baja a media, con humedades naturales altas, las cuales se hallan entre el límite plástico y el límite líquido; esto indica que el subsuelo explorado para los dos sitios de investigación se encuentra en estado plástico. Posteriormente, se muestran las variaciones del LL y el LP, así como la humedad natural “W” en profundidad para los dos sitios de investigación (figuras 11 y 12).

Igualmente, se indica el resumen de la resistencia al corte no drenada promedio obtenida en el sitio de investigación 1 (Escuela), en el cual, para una profundidad de 1,45 m a 2,90 m, se tiene un Cu promedio de 51,17 kPa, y luego, para una profundidad de 2,90 m a 15,0 m, se tiene un Cu promedio de 31,19 kPa (tabla 2).

Tabla 2

Resumen de la resistencia al corte no drenada obtenida en el sitio de investigación 1 (Escuela)

Profundidad, m	Resistencia al corte no drenada promedio “Cu”, kPa			
	Ensayo de compresión inconfiada	Ensayo de veleta de campo	Ensayo triaxial UU	Promedio
1,45 - 2,90	38,13	51,99	63,38	51,17
2,90 - 15,0	23,17	28,07	42,34	31,19

Fuente: Elaboración propia.

A renglón seguido se presenta el resumen de la resistencia al corte no drenada promedio obtenida en el sitio de investigación 2 (Fontibón), en el cual, para una profundidad de 1,40 m a 3,50 m, se tiene un Cu promedio de 38,03 kPa, y después, para una profundidad de 3,5 m a 15,0 m, se tiene un Cu promedio de 24,28 kPa (tabla 3).

Tabla 3

Resumen de la resistencia al corte no drenada obtenida en el sitio de investigación 2 (Fontibón)

Resistencia al corte no drenada promedio "Cu", kPa				
Profundidad, m	Ensayo de compresión inconfiada	Ensayo de veleta de campo	Ensayo triaxial UU	Promedio
1,4 - 3,5	24,83	34,34	54,94	38,03
3,5 - 15	14,28	24,18	34,37	24,28

Fuente: Elaboración propia.

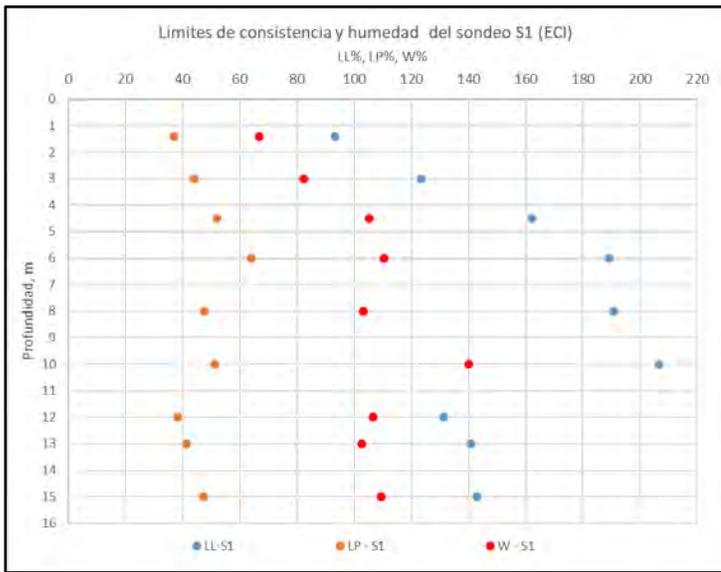


Figura 11. Límite líquido, límite plástico y contenido de humedad en el sondeo S1 del sitio de investigación 1 (Escuela).

Fuente: Elaboración propia.

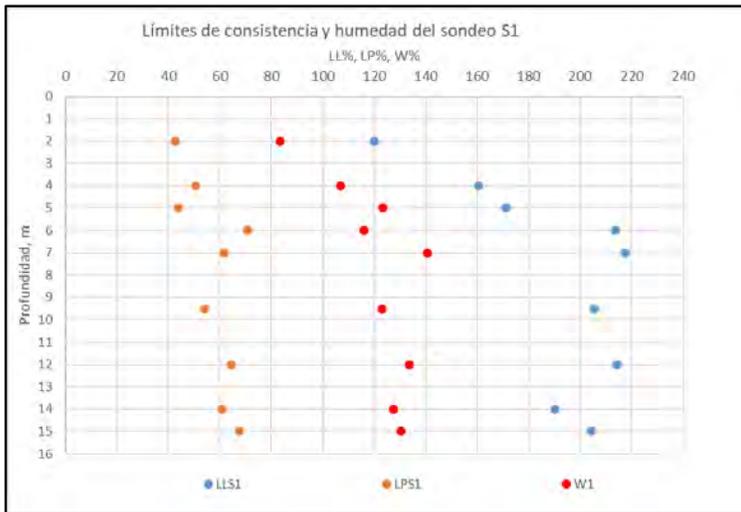


Figura 12. Límite líquido, límite plástico y contenido de humedad en el sondeo S1 del sitio de investigación 2 (Fontibón).

Fuente: Elaboración propia.

En ambos sitios de investigación se determinó la resistencia al corte no drenada mediante el ensayo de compresión inconfiada, el ensayo triaxial UU y el ensayo de veleta de campo (figura 13).



Figura 13. Toma de muestra tipo Shelby en el sitio de investigación 1 (Escuela) y ensayo triaxial UU en el Laboratorio de Ingeniería Civil de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Fuente: Elaboración propia.

En las figuras siguientes (figuras 14 y 15) se puede observar la variación en profundidad de la resistencia al corte no drenada en los sitios de investigación 1 y 2.

Se penetró el cono propuesto en el sitio de investigación 1 (Escuela) y en el sitio de investigación 2 (Fontibón) con los sensores hidráulicos, registrando la presión en la punta y la fricción en el fuste, haciendo uso de la máquina hidráulica, la cual se diseñó y fabricó para tal fin.

Se efectuaron tres penetraciones con el cono propuesto en el sitio de investigación 1 (Escuela) y tres penetraciones en el sitio de investigación 2 (Fontibón), obteniendo para cada sitio la resistencia promedio en la punta y la fricción promedio en el fuste.

Al comparar el promedio de la presión en la punta y la fricción en el fuste de las tres penetraciones realizadas con el cono propuesto en el sitio de investigación 1 (Escuela) con la presión en la punta y la fricción en el fuste de la penetración del piezocono convencional que hicieron Sarmiento y León (2016) en el mismo sitio, se observa que se presenta buena coincidencia, excepto cerca de la superficie, aun cuando el cono propuesto tiende a dar una resistencia en la punta y una fricción en el fuste menor que las correspondientes al cono convencional (figura 16).

Figura 14. Resistencia al corte no drenada en los sondeos S1 y S2 mediante el ensayo de compresión inconfiada, el ensayo triaxial UU y el ensayo de veleta de campo en el sitio de investigación 1 (Escuela).

Fuente: Elaboración propia.

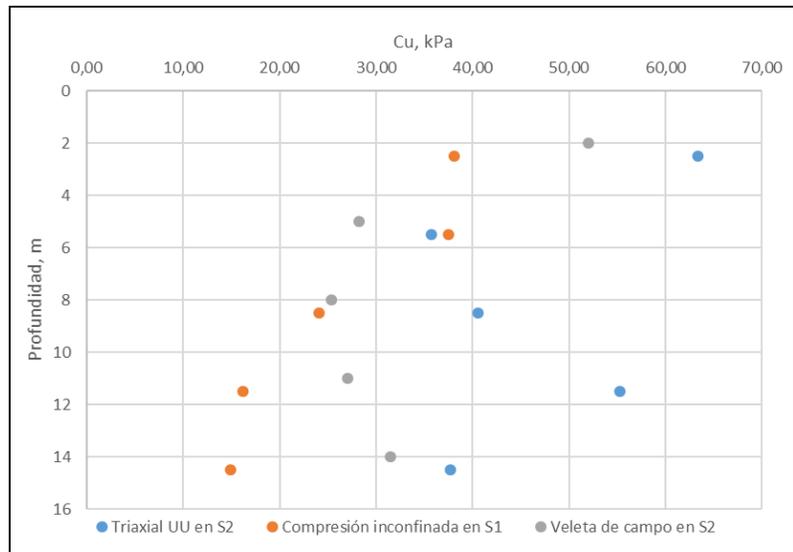


Figura 15. Resistencia al corte en los sondeos S2 y S3 mediante el ensayo de compresión inconfiada, el ensayo triaxial UU y el ensayo de veleta de campo en el sitio de investigación 2 (Fontibón).

Fuente: Elaboración propia.

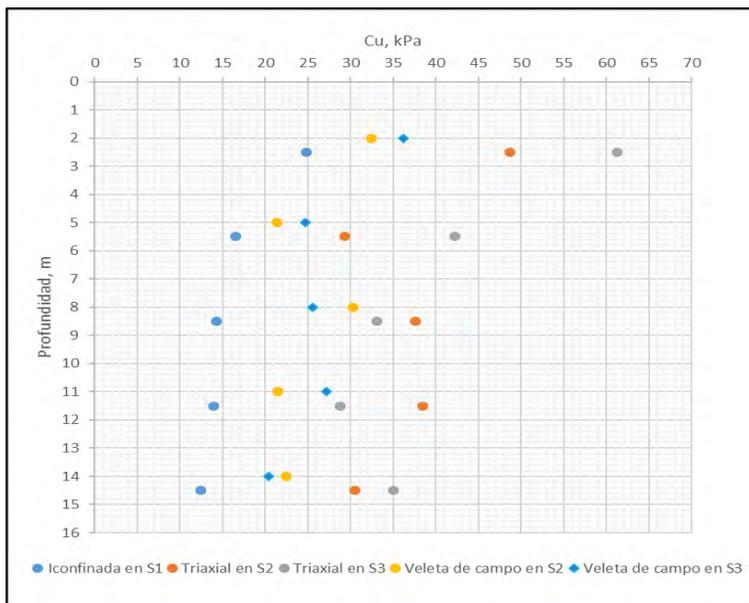
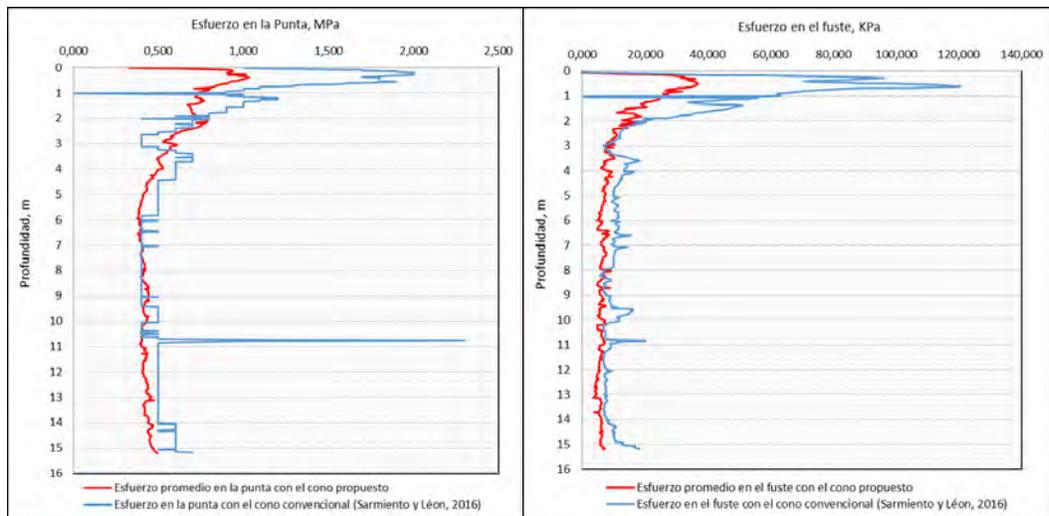


Figura 16. Resistencia en la punta (a) y fricción en el fuste (b) con el cono propuesto y con el cono convencional en el sitio de investigación 1 (Escuela).

Fuente: Elaboración propia.



Es posible que la disminución de la presión en la punta y la fricción en el fuste del cono propuesto con respecto al cono convencional se deba a que el diámetro no es el mismo, siendo el diámetro del cono convencional de 35,7 mm y del cono propuesto, de 60 mm.

Tumay y Sandven (2000) señalan en la investigación desarrollada de penetración de cono miniatura en arcillas, que el piezocono miniatura de 2 cm² (15,9 mm de diámetro), registró un 11 % más de resistencia en comparación con el estándar de 10 cm² (35,7 mm de diámetro).

La reducción de la presión en la punta y fricción en el fuste entre el cono propuesto y el piezocono convencional se encuentra en promedio en el 17 %.

En el comportamiento de variación del esfuerzo promedio en la punta con respecto a la profundidad obtenido con el cono propuesto en el sitio de investigación 2 (Fontibón), se identificaron dos sectores; en el sector 1 se observa un incremento del “qc”, obteniendo un valor máximo de 1,81 MPa, y en el sector 2 se mantiene el “qc” entre una presión máxima y otra mínima de 0,37 MPa y 0,34 MPa, respectivamente (figura 17a) y tabla 4).

En el comportamiento de variación de fricción promedio en el fuste en relación con la profundidad obtenida con el cono propuesto en el sitio de investigación 2 (Fontibón), se identificaron dos sectores; en el sector 1 se observa un incremento de la fricción en el fuste “fs”, obteniendo un valor máximo de 87,15 kPa, y en el sector 2 se mantiene la fricción en el fuste “fs” entre una presión máxima y otra mínima de 10,69 kPa y 5,36 kPa, en ese orden (figura 17b) y tabla 4).

Tabla 4

Resistencia en la punta “qc” y fricción en el fuste “fs” del cono propuesto en el sitio de investigación 2 (Fontibón)

Resistencia en la punta “qc”, MPa			
Sector	Profundidad, m	Máximo	Mínimo
1	0 - 1,5	1,81	0,19
2	1,5 - 15	0,37	0,34
Fricción en el fuste “fs”, kPa			
Sector	Profundidad, m	Máximo	Mínimo
1	0 - 2,2	87,15	2,37
2	2,2 - 15	10,69	5,36

Fuente: Elaboración propia.

El parámetro geotécnico que hay que analizar corresponde al factor del cono “N_{kt}”, el cual se determina haciendo uso de las ecuaciones indicadas a continuación (tabla 5).

Tabla 5

Resumen de los parámetros que hay que evaluar

Ítem	Parámetro geotécnico	Ecuación	Autor
1	Resistencia al corte no drenado (Su)	$S_u = \frac{q_t - \sigma_{vo}}{N_{kt}}$	Kulhawy and Mayne (1990) para suelos finos
2	Parámetro de cono	$N_{kt} = 10,5 + 7 \log (Fr)$	Gregg Drilling & Testing (2010)
3	Relación de fricción normalizada	$F_r = \frac{f_s}{q_t - \sigma_v} * 100$	Gregg Drilling & Testing (2010)
4	Parámetro de cono	$N_{kt} = 13,4 + 6,65LL$	Larsson y Mulabdic (1991)

Fuente: Elaboración propia.

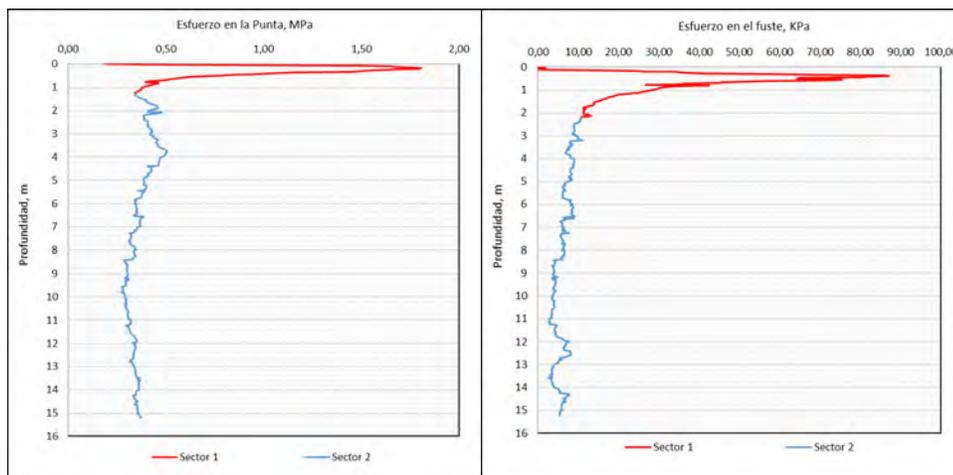


Figura 17. Sectores 1 y 2 de la resistencia promedio en la punta a) y la fricción promedio en el fuste. b) obtenidos con el cono propuesto en el sitio de investigación 2 (Fontibón).

Fuente: Elaboración propia.

En el cono propuesto no se registra la presión de poros; por lo tanto, en la ecuación (1) la resistencia del cono corregida se toma como la resistencia del cono “ $q_t = q_c$ ”.

Donde:

$$S_u = \frac{q_t - \sigma_v}{N_{kt}} \quad (1)$$

S_u = resistencia al corte no drenada.

q_t = resistencia del cono corregida.

σ_v = esfuerzo vertical total.

N_{kt} = parámetro del cono.

Al despejar el factor de cono “ N_{kt} ” de la ecuación (1) se obtiene la ecuación (2), donde la resistencia del cono “ q_c ” se registra en campo mediante el cono propuesto; la resistencia al corte no drenada “ S_u ” se obtiene por medio de muestras “inalteradas”, ejecutando en laboratorio el ensayo triaxial no consolidado no drenado o el ensayo de compresión inconfiada, o mediante el ensayo de campo de corte con veleta.

$$N_{kt} = \frac{q_c - \sigma_v}{s_u} \quad (2)$$

Así mismo, se determinó el factor del cono “ N_{kt} ” empleando la ecuación (3), desarrollada por Gregg Drilling & Testing (2010), a partir de la relación de fricción “ F_r ” (ecuación (4)), la cual se establece con el esfuerzo de fricción en el fuste “ f_s ”, la presión en la punta “ q_c ” registrada con el cono propuesto y el esfuerzo vertical.

$$N_{kt} = 10,5 + 7 \log (F_r) \quad (3)$$

$$F_r = \frac{f_s}{q_c - \sigma_v} * 100 \quad (4)$$

Además, se halló el parámetro del cono “ N_{kt} ” a partir de la ecuación propuesta por Larsson y Mulabdic (1991) (ecuación (5)), a partir del límite líquido.

$$N_{kt} = 13,4 + 6,65LL \quad (5)$$

Más adelante se resumen los parámetros del cono promedio “ N_{kt} promedio”, obtenidos para el sitio de investigación 1 (Escuela) y para el sitio de investigación 2 (Fontibón), mediante las cinco metodologías desarrolladas, las cuales se identifican en las tablas como A, B, C, D y E (tablas 6 y 7. Ver descripción de cada literal en la parte inferior de las tablas).

Tabla 6

Resumen del parámetro del cono “ N_{kt} ”, obtenido por diferentes métodos en el sitio de investigación 1 (Escuela)

Método para obtener el parámetro N_{kt}	A	B	C	D	E
N_{kt} promedio	13,56	7,27	12,18	12,79	23,31
Máximo	15,94	9,39	13,45	13,60	25,89
Mínimo	8,24	4,65	10,13	11,97	19,21
Desviación estándar	3,36	1,89	1,46	0,64	2,26
Parámetro del cono obtenido a partir de:					
(A): La resistencia al corte no drenada obtenida mediante el ensayo de compresión inconfiada en el sondeo S1					
(B): La resistencia al corte no drenada obtenida mediante el ensayo triaxial UU en el sondeo S2					
(C): La resistencia al corte no drenada obtenida mediante el ensayo de veleta de campo en el sondeo S2					
(D): La relación de fricción (Fr)					
(E): El límite líquido de los sondeos S1 y S2					

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7

Resumen del parámetro del cono “Nkt”, obtenido por diferentes métodos en el sitio de investigación 2 (Fontibón)

Método para obtener el parámetro N_{kt}	A	B	C	D	E
N_{kt} promedio	14,52	6,41	9,66	12,07	25,64
Máximo	17,59	8,07	13,13	14,38	27,71
Mínimo	12,89	5,36	7,27	9,84	22,24
Desviación estándar	1,93	1,16	2,34	1,75	1,98
Parámetro del cono obtenido a partir de:					
(A): La resistencia al corte no drenada obtenida mediante el ensayo de compresión inconfiada en el sondeo S1					
(B): La resistencia al corte no drenada obtenida mediante el ensayo triaxial UU en los sondeos S2 y S3					
(C): La resistencia al corte no drenada obtenida mediante el ensayo de veleta de campo en los sondeos S2 y S3					
(D): La relación de fricción (Fr) para las penetraciones con el cono propuesto CPTp1, CPTp2 y CPTp3					
(E): El límite líquido de los sondeos S1, S2 y S3					

Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

De los parámetros del cono “Nkt”, obtenidos en el sitio de investigación 1 (Escuela) (figura 18), se puede decir lo siguiente:

- El menor valor del parámetro del cono “Nkt” se obtiene a partir de la resistencia al corte no drenada por medio del ensayo triaxial UU, el cual corresponde a 7,27.
- Los parámetros promedios del cono “Nkt promedio” obtenidos a partir de las resistencias al corte no drenada “Su” y la relación de fricción “Fr” se encuentran en un rango de 7.27 a 13.56.
- El valor del parámetro del cono “Nkt” que tome en el rango de 7.27 a 13.56 depende del tipo de ensayo que se use para evaluar la resistencia al corte no drenado, o si se usa la relación de fricción.
- El parámetro del cono promedio “Nkt promedio” es de 11,45, el cual se encuentra dentro del rango de 10 a 18 que corresponde a las magnitudes en las que puede llegar a variar el “Nkt” para el cono convencional (Robertson & Cabal, 2010).
- El valor del parámetro del cono “Nkt” que tome en el rango de 6,41 a 14,52 depende del tipo de ensayo que se utilice para evaluar la resistencia al corte no drenado, o si se usa la relación de fricción.
- El parámetro del cono promedio “Nkt promedio” es de 10,66, el cual se encuentra dentro del rango de 10 a 18 que corresponde a las magnitudes en las que puede llegar a variar el “Nkt” para el cono convencional (Robertson & Cabal, 2010).

- El parámetro del cono determinado a partir del límite líquido “LL” es de 23,31, el cual se aleja considerablemente de los obtenidos por medio de la resistencia al corte no drenada “Su” y la relación de fricción “Fr”; dicho comportamiento se debe, muy probablemente, a que Larsson y Mulabdic (1991) desarrollaron la ecuación (5) para arcillas blandas de Suecia, y no ha sido correlacionada para las arcillas blandas de Bogotá; por tal razón, se descartó y no se tuvo en cuenta en el análisis.

A partir de los parámetros del cono “Nkt” hallados con el cono propuesto y los límites líquidos “LL” determinados en el sitio de investigación 1 (Escuela), se estableció la siguiente ecuación de correlación, en la cual se ingresa el límite líquido “LL” en tanto por uno.

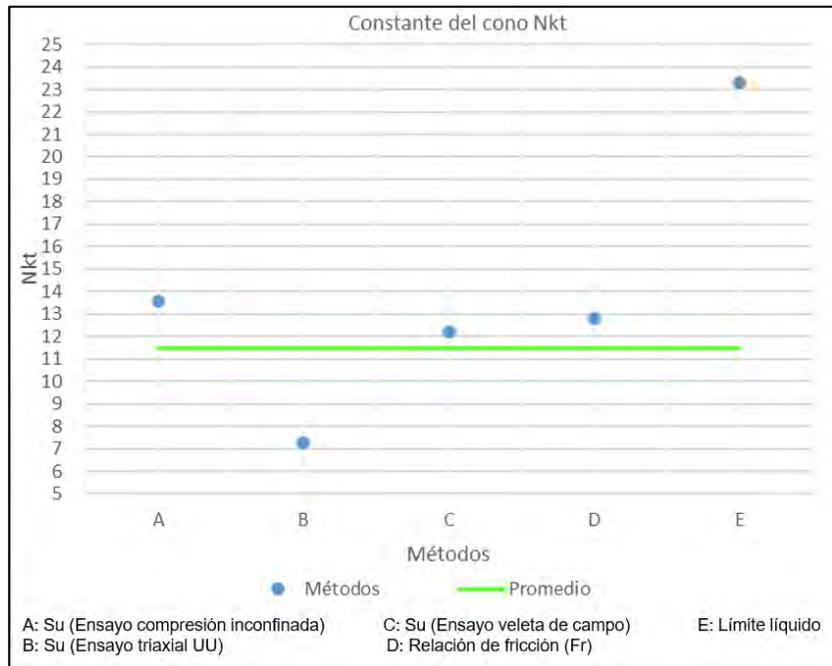
$$N_{kt} = 19,42 - 5,02LL \quad (6)$$

El coeficiente de determinación promedio “R²” y el coeficiente de correlación de Pearson promedio “r”, obtenidos para la ecuación anterior, presentan magnitudes de 0,17 y 0,27, en ese orden, lo que indica que la dependencia lineal entre el límite líquido y el “Nkt” es baja.

A partir de los parámetros del cono “Nkt” hallados con el cono propuesto y los índices de plasticidad “IP” determinados en el sitio de investigación 1 (Escuela), se estableció la siguiente ecuación de correlación, en la cual se ingresa el índice de plasticidad en tanto por uno.

Figura 18. Parámetro del cono promedio “Nkt promedio” obtenido por los métodos A, B, C, D y E, en el sitio de investigación 1 (Escuela).

Fuente: Elaboración propia.



$$N_{kt} = 17,25 - 5,69IP \quad (7)$$

El coeficiente de determinación promedio “R²” y el coeficiente de correlación de Pearson promedio “r”, obtenidos para la ecuación anterior, presentan magnitudes de 0,18 y 0,25, respectivamente, lo que indica que la dependencia lineal entre el índice de plasticidad y el “Nkt” es baja.

De los parámetros del cono “Nkt” obtenidos en el sitio de investigación 2 (Fontibón) (figura 19), se puede decir lo siguiente:

- El menor parámetro del cono “Nkt” se obtiene a partir de la resistencia al corte no drenada por medio del ensayo triaxial UU, el cual corresponde a 6,41.

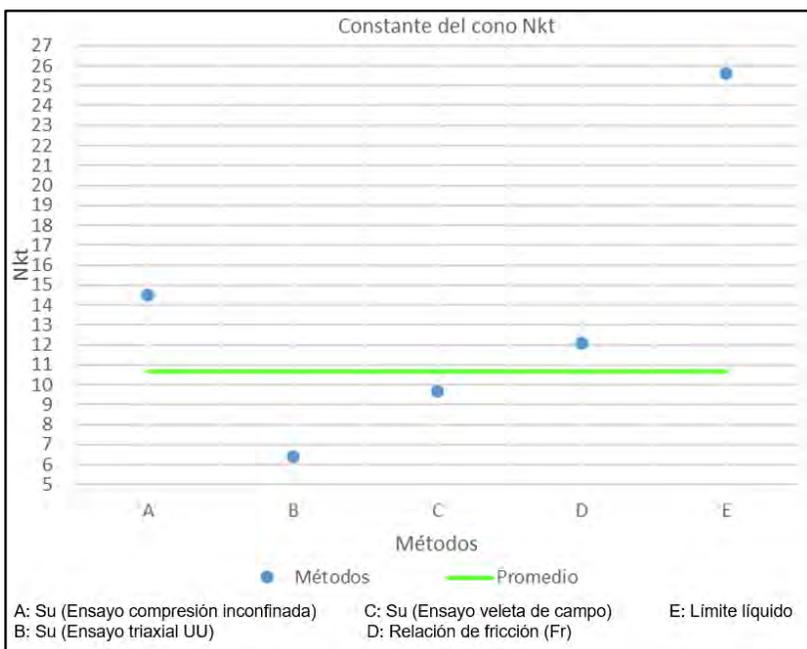


Figura 19. Parámetros del cono promedio “Nkt promedio” obtenidos por los métodos A, B, C, D y E, en el sitio de investigación 2 (Fontibón).

Fuente: Elaboración propia.

- Los parámetros promedios del cono “Nkt promedio”, obtenidos a partir de las resistencias al corte no drenada “Su” y la relación de fricción “Fr”, se encuentran en un rango de 6,41 a 14,52.
- El parámetro del cono determinado a partir del límite líquido “LL” es de 25,41, el cual se aleja considerablemente de los obtenidos por medio de la resistencia al corte no drenada “Su” y la relación de fricción “Fr”; dicho comportamiento se debe muy probablemente a que Larsson y Mulabdic (1991) desarrollaron la ecuación (5) para arcillas blandas de Suecia, y no ha sido correlacionada para las arcillas blandas de Bogotá; por tal razón, se descartó y no se tuvo en cuenta en el análisis.

En general, el valor del parámetro del cono “Nkt” depende del tipo de ensayo que se utilice para evaluar la resistencia al corte no drenada.

A partir de los parámetros del cono “Nkt” hallados con el cono propuesto y los límites líquidos “LL”, determinados en el sitio de investigación 2 (Fontibón), se estableció la siguiente ecuación de correlación, en la cual se ingresa el límite líquido “LL” en tanto por uno.

$$N_{kt} = 20,67 - 8,66LL \quad (8)$$

El coeficiente de determinación promedio “R²” y el coeficiente de correlación de Pearson promedio “r”, obtenidos para la ecuación anterior, presentan magnitudes de 0,88 y 0,94, en ese orden, lo que indica que existe una dependencia lineal entre el límite líquido y el “Nkt”, la cual es buena.

A partir de los parámetros del cono “Nkt” hallados con el cono propuesto y los índices de plasticidad “IP”, determinados en el sitio de investigación 2 (Fontibón), se estableció la siguiente ecuación de correlación, en la cual se ingresa el índice de plasticidad en tanto por uno.

$$N_{kt} = 19,74 - 7,29IP \quad (9)$$

El coeficiente de determinación promedio “R²” y el coeficiente de correlación de Pearson promedio “r”, obtenidos para la ecuación anterior, presentan magnitudes de 0,88 y 0,94, respectivamente, lo que indica que existe

una dependencia lineal entre el índice de plasticidad y el “Nkt”, la cual es buena.

Teniendo en cuenta que la presión en la punta y la fricción en el fuste registradas con el cono propuesto para el sitio de investigación 1 (Escuela) y el sitio de investigación 2 (Fontibón) fueron adecuadas, se recomienda rediseñar el cono propuesto, incluyendo el registro de la presión de poros.

La adquisición de los sensores de presión hidráulica en Colombia se vio limitada debido a la baja disponibilidad comercial de transductores de tamaño reducido, por lo que se recomienda contactar a proveedores internacionales que ofrezcan sensores tipo miniatura, con rangos de presión altos, con el objeto de reducir el tamaño del cono propuesto.

Se recomienda rediseñar el cono propuesto a las dimensiones indicadas en la norma ASTM D-5778-12, “Standard test method for performing electronic friction cone and piezocone penetration testing of soils”, con el fin de estandarizar el cono con los sensores hidráulicos.

Se aconseja establecer más sitios de investigación para los suelos lacustres de la sabana de Bogotá indicados en el Decreto 523 de 2010, “Microzonificación sísmica de Bogotá”, incluyendo el sitio de investigación 1 (Escuela), con el objeto de verificar las ecuaciones de correlación del parámetro del cono con respecto al límite líquido y al índice de plasticidad, tomando en cuenta que el coeficiente de determinación promedio “R²” y el coeficiente de correlación de Pearson “r” calculado para dichas ecuaciones fue bajo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Kulhawy, F. H., & Mayne, P. H. (1990). *Manual on estimating soil properties for foundation design*. Report EL-6800 Electric Power Research Institute (EPRI).
- Larson, R., & Mulabdic, M. (1991). *Piezocone*. Linkoping: Swedish Geotechnical Institute.
- Robertson, P., & Cabal, K. (2010). *Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering*. California: Gregg Drilling and Testing.
- Tumay, M., & Sandven, R. (2000). *Continuous intrusion miniature piezocone penetration test in quick soil deposits*. Norway: International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering.
- Vertek (2015). *Which is best for your application*. USA: VertekCPT.

REVISTA DE LA ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA

Alcance y política

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

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

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

También admite artículos de las siguientes tipologías:

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

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

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

Requisitos para la publicación de artículos

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

Scope and policy

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

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

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

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

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

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

Ruling for publication

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



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

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

.....

www.4-72.com.co



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

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

.....

www.4-72.com.co