

03 Julio - septiembre de 2020

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



Tarifa postal reducida N.º 2017-107 4-72  
Servicios Postales Nacionales S.A.  
Vence 31 de diciembre de 2020 - ISSN 0121-5132

■ Dimensionamiento de piscinas de sedimentación en proyectos mineros a cielo abierto.

■ Estimación de la escorrentía superficial a nivel diario mediante el modelo GR4J. Recomendaciones para la calibración del modelo.

■ Planta de tratamiento de aguas residuales para una población de 2000 habitantes.

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

■ Propuesta de un sistema de tratamiento para aguas residuales, producto de actividades ganaderas.

■ Correlación entre el CBR de la subrasante y deflexiones medidas con FWD en Colombia.

■ Caracterización de la variabilidad espacial de la resistencia al corte no drenada del depósito lacustre A, ubicado en la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

■ Influencia de la longitud de traslapo en la capacidad a flexión de muros de mampostería reforzados internamente con barras de GFRP, ante cargas fuera del plano.

■ Arquitectura para el análisis de grandes cantidades de datos en tiempo real, aplicado a criptomonedas.



REVISTA DE LA ESCUELA COLOMBIANA DE

Ingeniería

119

## CONSEJO DIRECTIVO DE LA ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA

**PRESIDENTE** RICARDO RINCÓN HERNÁNDEZ

**VOCALES** GERMÁN EDUARDO ACERO RIVEROS  
SANDRA XIMENA CAMPAGNOLI MARTÍNEZ  
ÁLVARO ANTONIO GONZÁLEZ FLÉTCHER  
ARMANDO PALOMINO INFANTE  
RICARDO QUINTANA SIGHINOLFI  
ROBERTO RÍOS MARTÍNEZ  
JAIRO ALBERTO ROMERO ROJAS  
RICARDO SALAZAR FERRO  
HENRY MORENO MOSQUERA  
(representante de los profesores)  
GINA NATHALIA LEÓN ACOSTA  
(representante de los estudiantes)

**RECTOR** HÉCTOR ALFONSO RODRÍGUEZ DÍAZ

**SECRETARIO** RICARDO ALFREDO LÓPEZ CUALLA

## REVISTA DE LA ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA

**DIRECTOR** JAIRO ALBERTO ROMERO ROJAS

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

**DIRECCIÓN EDITORIAL** CRISTINA SALAZAR PERDOMO

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

**DIRECCIÓN COMERCIAL** EDITORIAL ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA

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

AUTOPISTA NORTE AK 45 # 205-59  
TEL.: (57-1) 668 3600, EXT. 533  
[revista@escuelaing.edu.co](mailto: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

### Sueño o utopía

*Jairo Alberto Romero Rojas*

## 7-10

### Dimensionamiento de piscinas de sedimentación en proyectos mineros a cielo abierto.

#### Metodología

*Alfonso Rodríguez Díaz - Andrés H. Otálora Carmona - Romeo Ramos Quintero*

En este artículo se presentan los resultados de la investigación realizada por el Centro de Estudios Hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería, cuyo objetivo es el dimensionamiento de piscinas de sedimentación del material transportado por la escorrentía proveniente de botaderos construidos como zonas de acopio de material residual, generado por actividades mineras a cielo abierto.

## 11-13

### Estimación de la escorrentía superficial a nivel diario mediante el modelo GR4J.

#### Recomendaciones para la calibración del modelo

*Alfonso Rodríguez Díaz - Andrés H. Otálora Carmona - Romeo Ramos Quintero*

A lo largo de este artículo se presentan los resultados de la investigación realizada por el Centro de Estudios Hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería, cuyo objetivo es la estimación de una serie de caudales medios diarios en las cuencas que drena la zona minera en el sur del departamento del Cesar, utilizando el modelo agregado GR4J.

## 15-20

### Planta de tratamiento de aguas residuales para una población de 2000 habitantes

*Olga Lorena Piedra - Jairo Alberto Romero Rojas*

En este artículo se presenta el diseño conceptual de una planta de tratamiento de aguas residuales para poblaciones inferiores o iguales a 2000 habitantes que cumple con la normativa aplicable para vertimiento, así como con la posibilidad de reúso del efluente para fines agrícolas.

## 21-25

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

*Miguel Ángel Betancur Cruz - Jairo Alberto Romero Rojas*

En este artículo se describe, se hace el diagnóstico hidráulico y se presenta el rendimiento operacional de una planta de tratamiento de agua potable (PTAP), con base en el análisis de sus componentes y de los resultados obtenidos en la caracterización fisicoquímica y microbiológica del agua cruda y tratada.

## 27-31

### Propuesta de un sistema de tratamiento para aguas residuales, producto de actividades ganaderas

*Jojanna Carolina Luque López - Jairo Alberto Romero Rojas*

En este artículo se presenta el diseño de un sistema de tratamiento de las aguas residuales de una finca dedicada a la producción lechera en el municipio de Une (Cundinamarca).

## 33-45

### Correlaciones entre el CBR de la subrasante y deflexiones medidas con FWD en Colombia

*Ingrid Adriana Rodríguez Torres - Fernando Estrada Sánchez*

El presente estudio tiene como propósito buscar correlaciones entre el CBR de la subrasante y las deflexiones medidas con FWD, para diferentes tipos de suelo (finos, arenas y gravas).

Para esto se contó con información simultánea de datos de CBR sobre muestras inalteradas y muestras compactadas en laboratorio, propiedades del suelo y medidas de deflexiones en varios proyectos viales desarrollados en Colombia.

## **47-55**

### **Caracterización de la variabilidad espacial de la resistencia al corte no drenada del depósito lacustre A, ubicado en la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito**

*Lina Astrid Díaz Méndez - Álvaro Manrique Muñoz - Lina Ximena Garzón Ávila*

La presente investigación se basa en la incorporación de la teoría de los campos aleatorios, con el objeto de caracterizar la variabilidad espacial mediante el cálculo de los valores de la media, la varianza y la escala de fluctuación. Se realiza el estudio para valores de la resistencia al corte no drenada (Cu), tomando información registrada en CPT a profundidades de 42,5 m, 30,92 m y 20,66 m, respectivamente, en el depósito lacustre A, localizado en la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

## **57-64**

### **Influencia de la longitud de traslapo en la capacidad a flexión de muros de mampostería reforzados internamente con barras de GFRP, ante cargas fuera del plano**

*Jairo Arley Urbina Gómez - Nancy Torres Castellanos*

Se planteó un programa experimental para evaluar la capacidad ante cargas fuera del plano de muros de mampostería reforzados internamente con barras traslapadas de polímeros reforzados con fibra de vidrio (GFRP, por su sigla en inglés) longitudinales, con el objeto de evaluar la influencia de la longitud de traslapo, siguiendo el protocolo de diseño evaluado en anteriores investigaciones para determinar la capacidad teórica de dichos muros, tomando como base los requisitos especificados en el ACI 440.1R-15 y el TMS 402-16.

## **65-75**

### **Arquitecturas para el análisis de grandes cantidades de datos en tiempo real, aplicado a criptomonedas**

*Juan Pablo Arévalo Merchán*

En este artículo se estudia el estado del arte de las arquitecturas de sistemas para el análisis en tiempo real de big data en el contexto de las criptomonedas. Se presentan primero lambda y kappa, dos arquitecturas de referencia para el análisis en tiempo real en sistemas big data, y luego se exploran varios trabajos en los que se describen las arquitecturas de los sistemas de análisis en tiempo real para criptomonedas.

## **77 / ALCANCE Y POLÍTICAS**

# Editorial

## Sueño o utopía

**JAIRO ALBERTO ROMERO ROJAS**

Profesor titular de la Escuela Colombiana de Ingeniería

[jairo.romero@escuelaing.edu.co](mailto:jairo.romero@escuelaing.edu.co)

La alta tasa de urbanización de Bogotá, junto a sus problemas de movilización e insuficiente infraestructura vial y hospitalaria, además del sentimiento permanente de inseguridad, hacen evidente la carencia de administraciones municipales apropiadas para la ciudad en los últimos años.

A esto se suma la vulnerabilidad de la sociedad ante los desórdenes producidos por manifestaciones, paros y protestas, con violación de los derechos básicos para un normal desempeño laboral y social.

Todo lo anterior, unido a la evidente necesidad de desarrollar un lugar seguro, gozable, viable económicamente, con abastecimiento completo de agua potable, con tratamiento y disposición de aguas residuales y residuos sólidos sostenibles, alimentos, energía eléctrica, vivienda, educación, seguridad social y capacidad de atención médica suficiente, hace pensar que para enfrentar mejor el reto de satisfacer todas esas necesidades

sería conveniente dirigir el desarrollo urbano hacia otro sitio, es decir, trasladar la capital de la república a un nuevo emplazamiento.

El traslado permitiría explotar las grandes ventajas de llevar a cabo un planeamiento cuidadoso de una ciudad inteligente, lo que aseguraría la plena satisfacción de todos los servicios públicos y de seguridad, infraestructura que ofrecería un transporte pleno de vehículos, motocicletas, bicicletas y peatones, recreación y esparcimiento.

Identificar el nuevo escenario capitalino, así como conseguir la inversión requerida para construir y desarrollar esa ciudad inteligente, con criterio de efectividad de costo, costo mínimo, relación óptima costo-beneficio, y lograr maximizar la protección ambiental, son los retos para realizar un proyecto que puede sonar como sueño o utopía, pero que es el verdadero enfoque hacia la consecución de un desarrollo sostenible y benéfico.



# Dimensionamiento de piscinas de sedimentación en proyectos mineros a cielo abierto. Metodología

## Sedimentation pools sizing in open pit mining projects. Methodology

ALFONSO RODRÍGUEZ DÍAZ<sup>1</sup> - ANDRÉS H. OTÁLORA CARMONA<sup>2</sup> - ROMEO RAMOS QUINTERO<sup>3</sup>

1. Profesor Titular de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
2. Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Recursos Hidráulicos y Medioambiente de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
3. Drummond Ltd., Bogotá, Colombia.

alfonso.rodriguez@escuelaing.edu.co - andres.otalora@escuelaing.edu.co - RRamos@drummondLtd.com

Recibido: 20/03/2020 Aceptado: 31/03/2020

Disponibile en [http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones\\_revista](http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista)  
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

### Resumen

En este artículo se presentan los resultados de la investigación realizada por el Centro de Estudios Hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería, cuyo objetivo es el dimensionamiento de piscinas de sedimentación del material transportado por la escorrentía proveniente de botaderos construidos como zonas de acopio de material residual, generado por actividades mineras a cielo abierto.

En la metodología propuesta se consideran la evaluación y estimación de caudales medios, máximos y mínimos de escorrentía en un punto de entrega, en un punto de vertimiento, el dimensionamiento de la piscina de sedimentación y el diseño de la estructura de descarga hacia las corrientes receptoras.

**Palabras claves:** piscinas de sedimentación, escombreras, minería a cielo abierto, manejo de escorrentía.

### Abstract

This article presents the results of the research performed by the Center for Hydraulic Studies of Escuela Colombiana de Ingeniería whose objective is the sizing of sedimentation pools of the material transported by the runoff coming from dumps built as material stocks, generated by open pit mining activities.

The proposed methodology considers the evaluation and modifications of the maximum flow and minimum flow at a delivery point, at a discharge point, the sizing of the sedimentation pool, and the design of the discharge structure towards the receiving currents.

**Keywords:** sedimentation pools, slagheaps, open pit mining, runoff management.

## INTRODUCCIÓN

La escorrentía que se genera en las escombreras o botaderos ubicados en las zonas de explotación minera a cielo abierto se debe descargar previamente en una piscina de sedimentación, con el propósito de retener los sólidos transportados por la escorrentía proveniente de esas superficies. Debido a que la disposición final de esta escorrentía son cuerpos de agua o corrientes naturales, es necesario controlar la carga de sólidos que llegan al cauce. Una piscina de sedimentación debe asegurar que la escorrentía vertida cumple los requerimientos exigidos, relacionados con el volumen de sedimentos transportados.

La función primordial de las piscinas de sedimentación será retener las aguas por un periodo de tiempo suficientemente largo, que permita su clarificación. Esto se logra al decantar los sólidos que arrastran en suspensión y posibilitar el almacenamiento de esos materiales hasta que se realice la limpieza de dicha estructura. Una piscina de sedimentación es, básicamente, un depósito sencillo para embalsar agua, que posee poca profundidad (por lo general, entre 1 y 4 m), que se puede excavar en tierra o conformar con diques, buscando que su base y sus paredes estén hechas con materiales de baja permeabilidad.

Una de las variables que se deben tener en cuenta para el diseño de las piscinas es el volumen de agua, lo cual condiciona el tiempo de retención y el proceso de sedimentación. El volumen y, por tanto, las dimensiones de la piscina son función del volumen del caudal proveniente de los botaderos, la morfología y superficie de los botaderos, la intensidad de la lluvia y el porcentaje de retención de los sólidos que se necesite.

Como punto de partida de este trabajo se han tomado como referencia las recomendaciones presentadas por varios autores, los que proponen que el volumen de la piscina debe permitir el almacenamiento del volumen de escorrentía generada por un evento de lluvia con una recurrencia de 10 años y con una duración de 24 horas.

De la misma manera, los puntos de vertimiento de las piscinas se deben definir con base en la localización de los botaderos, el manejo particular de la escorrentía y la ubicación de los cuerpos de agua más cercanos donde se hará el vertimiento.

## CRITERIO DE DISEÑO

Los criterios de diseño han considerado diferentes metodologías que tienen en cuenta la información disponible, el amortiguamiento de los caudales de entrada, las características de los sedimentos transportados y su sedimentación, el volumen de almacenamiento, el área disponible y las características de las estructuras de descarga.

En el caso particular de la evaluación hidrológica para el dimensionamiento del volumen de las piscinas, se ha definido como lluvia de diseño una lluvia particular que considera el tiempo de retención en el almacenamiento.

Las condiciones hidráulicas tienen en cuenta condiciones de flujo no permanente con el propósito de evaluar el almacenamiento temporal y el amortiguamiento de los caudales con los cuales se diseñan las estructuras de descarga. Considerando las condiciones del vertimiento hacia cuerpos naturales, se debe definir una batería de alcantarillas que puede constar de una o más hileras de baterías.

## CRITERIOS HIDROLÓGICOS PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE LA PISCINA

Los principales criterios de diseño para la evaluación hidrológica de las superficies de los botaderos tienen en cuenta la frecuencia del evento de lluvia considerado y su duración.

En general, para este tipo de sistemas no existe un solo criterio que permita establecer un periodo de retorno. En la mayoría de los casos, el periodo de retorno está asociado con el tipo de estructura hidráulica y el riesgo asociado a esta y con los valores tomados de las experiencias.

En el caso particular de las obras asociadas con un sistema de acopio de material, el tiempo de operación del botadero es un referente importante para la determinación del periodo de retorno. También resulta importante considerar, de acuerdo con la superficie y los volúmenes finalmente acopiados, la magnitud de los caudales máximos de entrada y de salida y el volumen de la piscina de retención. Para establecer los criterios hidrológicos se han tomado en cuenta las siguientes variables, las cuales se detallan en el artículo principal.

- Periodo de retorno.
- Curvas intensidad, duración y frecuencia.
- Tiempo de concentración.
- Tiempo de retardo.
- Lluvia de diseño.
- Infiltración inicial.
- Escorrentía superficial.

## CRITERIOS HIDRÁULICOS

Para el dimensionamiento de las piscinas de sedimentación es necesario establecer criterios hidráulicos que permitan el diseño de las tuberías para la descarga de la escorrentía desde la piscina hacia la corriente receptora. A continuación se resumen las variables hidráulicas y otras consideraciones para la definición y el diseño de estructuras hidráulicas de descarga en estas piscinas:

### Volumen de las piscinas

El volumen de la piscina debe permitir el almacenamiento del volumen de escorrentía generada por un evento de lluvia con una recurrencia de 10 años y con una duración de 24 horas, para que el mantenimiento de la piscina no se convierta en un proceso muy frecuente. Para la estimación del hidrograma de salida de la cuenca (hidrograma de entrada a la piscina) y el volumen producido por la lluvia de 10 años de recurrencia y 24 horas de duración, se recomienda utilizar el modelo HEC-HMS.

### Altura de la piscina

Esta altura dependerá de las particularidades del sedimento de la zona de explotación minera y de la configuración del botadero. Se sugiere utilizar profundidades de sedimentación entre 3 a 5 m, teniendo en cuenta las características medias del sedimento. Esta profundidad deberá permitir almacenar en su totalidad el volumen de escorrentía.

Área superficial de las piscinas. Se debe estimar el área superficial de la piscina con base en la profundidad y tomando como referencia el volumen de escorrentía producido por el evento de lluvia establecido.

### Dimensiones de la piscina

Para la determinación de la longitud (L) y el ancho (B) de las piscinas, se recomienda que la relación entre L/B sea cercana a 4.0, relación que de acuerdo con la experiencia asegura procesos adecuados de sedimentación. Adicionalmente, de acuerdo con la experiencia la relación L/H debería estar entre 5 y 9. De no ser así, se requiere hacer un proceso de tanteo para cumplir estas relaciones.

### Revisión de la longitud mínima para la sedimentación

Con el propósito de verificar que las longitudes de las piscinas son adecuadas para permitir la depositación del material transportado por la escorrentía superficial proveniente de los botaderos, se sugiere estimar la longitud necesaria para remover el 100 % de las partículas con diámetros superiores o iguales al D50, de la curva granulométrica disponible. Si se desea mayor sedimentación, es posible utilizar el D75. Con base en el diámetro de las partículas, las propiedades del fluido y las propiedades del suelo, se puede estimar la velocidad de caída del material sedimentable en la piscina (Vs).

### Número de alcantarillas del sistema de descarga de la piscina de sedimentación

Las características del sistema de descarga pueden exigir dos filas de tuberías: una inferior y una superior. Para calcular el número de alcantarillas inferiores necesarias para la descarga de la piscina de sedimentación al cuerpo receptor, se ha establecido que las tuberías deben permitir la descarga de un evento de lluvia máxima con una recurrencia de cinco años y una duración de 24 horas, de tal manera que la lámina de agua no sobrepase el 0,936 del diámetro de la tubería.

Para completar el diseño del sistema de descarga de la piscina, este sistema debe descargar el hidrograma laminado correspondiente a un evento de 10 años de periodo de retorno y una duración de 24 horas. Como ya se realizó el diseño de las alcantarillas inferiores, se supone que la lámina de agua se encuentra muy cerca de la cota clave de estas tuberías.

## CONCLUSIONES

Se elaboró una metodología general para el dimensionamiento de piscinas de sedimentación que permitirán el tratamiento de la escorrentía proveniente de botaderos en zonas de explotación minera a cielo abierto.

Se recomienda complementar esta metodología con modelos o sistemas de información geográfica que integren la información, para que de esta manera sea fácil realizar múltiples escenarios con múltiples variables.

Se probó con éxito esta metodología con botaderos localizados en zonas mineras ubicadas en el sur del departamento del Cesar (Colombia).

Esta metodología es dinámica, general y básica, la cual depende fundamentalmente de la calidad de la información de entrada, proveniente de los registros hidrológicos en la zona de estudio y de los datos del tipo de suelo en la cuenca.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Chow, V. T. (1994). *Hidrología aplicada*. Bogotá, D.C.: Editorial McGraw-Hill.
- Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito (2015). Estudio hidrológico proyecto La Loma, Drummond Ltd.
- Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito (2012). Informe de consultoría para la evaluación de estudios hidrológicos e hidráulicos en las cuencas en estado natural que conforman el área minera del centro del Cesar. Caudales máximos y mínimos. Bogotá, D.C.
- Instituto Nacional de Vías (Invías) (2009). *Manual de drenaje para carreteras*. Bogotá, D.C.: Invías y Ministerio del Transporte.
- Kennedy, B. A., Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (US) (1990). *Surface mining book*. Cap. 5. Planning and Design of Surface Mines.
- López Cualla, R. (2004). *Elementos de diseño de acueductos y alcantarillados* (2ª ed.). Bogotá, D.C.: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- US Army Corps of Engineers (2010). Hydrologic Modeling System HEC-HMS. *Quick Start Guide*.

# Estimación de la escorrentía superficial a nivel diario mediante el modelo GR4J. Recomendaciones para la calibración del modelo

## Daily runoff estimates through the GR4J model. Suggestions for model calibration

ALFONSO RODRÍGUEZ DÍAZ<sup>1</sup> - ANDRÉS H. OTÁLORA CARMONA<sup>2</sup> - ROMEO RAMOS QUINTERO<sup>3</sup>

1. Profesor Titular de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
2. Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Recursos Hidráulicos y Medioambiente de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
3. Drummond Ltd., Bogotá, Colombia.

alfonso.rodriguez@escuelaing.edu.co - andres.otalora@escuelaing.edu.co - RRamos@drummondLtd.com

Recibido: 20/03/2020 Aceptado: 31/03/2020

Disponible en [http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones\\_revista](http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista)  
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

### Resumen

A lo largo de este artículo se presentan los resultados de la investigación realizada por el Centro de Estudios Hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería, cuyo objetivo es la estimación de una serie de caudales medios diarios en las cuencas que drenan la zona minera en el sur del departamento del Cesar, utilizando el modelo agregado GR4J. Para la utilización de esta metodología fue necesario definir en este trabajo recomendaciones para la calibración de las principales variables del modelo GR4J, X1, X2, X3 y X4, variables que dependen de diferentes características del suelo.

El modelo GR4J estima la escorrentía diaria en una cuenca a partir de la elaboración de un balance subsuperficial a partir de una serie diaria de precipitación y una serie diaria de evapotranspiración real. En razón de que el modelo GR4J se desarrolló en Francia, la aplicación de este modelo en Colombia se debe analizar principalmente en la estimación de sus variables.

Para la calibración de las variables del modelo se tomó como referencia una pequeña cuenca instrumentada que drena a un punto a la entrada de una piscina de sedimentación localizada en la zona minera de Drummond, en el sur del Cesar.

La cuenca dispone de registros de precipitación diaria de varios años y de registros de caudales diarios. Adicionalmente, a partir de

los registros diarios de escorrentía en la piscina de sedimentación y los resultados obtenidos con el modelo GR4J, se calibraron las variables del modelo mediante una función objetivo que permite minimizar el error al comparar los valores calculados con los valores observados.

**Palabras claves:** caudal medio diario, lluvia diaria, modelo lluvia-escorrentía, escorrentía superficial, modelo agregado GR4J.

### Abstract

This article presents the results of the research made by the Center for Hydraulic Studies of the Escuela Colombiana de Ingeniería to estimate the average daily flow in the basins that drains the mining area in the South of Cesar, applying the aggregate GR4J model.

The proposed methodology considers the calibration of the main variables of the GR4J model, X1, X2, X3, and X4, variables that depend on different soil characteristics. The GR4J model estimates the daily runoff in a basin from the elaboration of a subsurface balance from a daily series of precipitation and a daily series of real evapotranspiration. Since the GR4J model was developed in France, the application of this model in Colombia should be reviewed.

For the calibration of the model variables, a small, instrumented basin was taken as a reference which drains at a point at the entrance of a

sedimentation pool located in the Drummond mining area in southern Cesar. The basin has records of both daily rainfall for several years and daily flow. From the daily records of runoff in the sedimentation pool and the results of the GR4J model, the variables were calibrated from the modeling difference adjusting the results.

**Keywords:** average daily flow, daily rainfall, rainfall-runoff model, surface runoff, aggregate GR4J model.

## INTRODUCCIÓN

Generalmente, para la estimación del caudal medio en una cuenca hidrográfica se debe hacer un balance hidrológico a largo plazo, considerando registros anuales de precipitación y de evapotranspiración. Por tanto, se presume que las demás variables hidrológicas no tienen influencia en el balance final (caudal medio), ya que se supone que el agua que entra debido a estas otras variables es igual al agua que sale en el intervalo de tiempo (anual).

En el caso del presente trabajo, debido a las particularidades del proyecto, era necesario estimar el caudal medio diario en las cuencas que drenaban a uno de los tajos de una zona minera, con el fin de determinar la tasa de llenado y la elevación de la lámina de agua a nivel diario.

A causa del intervalo de tiempo tan pequeño (un día) que se debe considerar para estimar este caudal medio, la influencia de otras variables hidrológicas, como la infiltración y el flujo subsuperficial, se requiere estudiar con más detalle estas variables hidrológicas.

La revisión de las referencias bibliográficas en las que se proponen modelos para la estimación de la escorrentía superficial diaria (caudal medio diario) permitió establecer que el modelo agregado GR4J se puede utilizar en Colombia, particularmente en las cuencas antrópicas definidas en las áreas generadas por minera a cielo abierto, en tanto exista información de campo para la calibración de sus variables.

Se concluyó que este modelo se puede usar debido principalmente a que considera diferentes parámetros que tienen en cuenta la caracterización del suelo y que se pueden calibrar si se dispone de registros históricos de precipitación, evapotranspiración y escorrentía diaria.

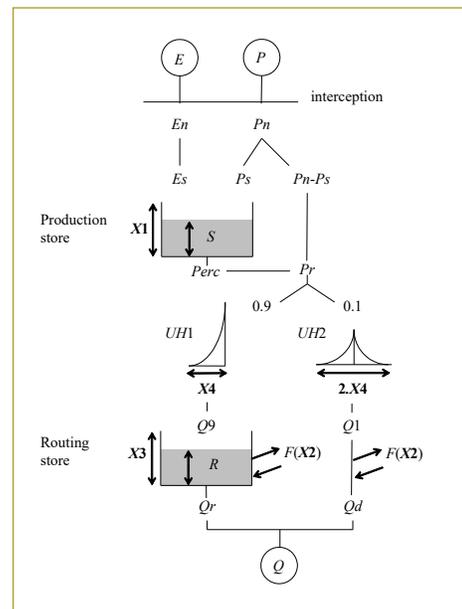
## MODELO LLUVIA-ESCORRENTÍA DIARIA GR4J

El GR4J es un modelo lluvia-escorrentía agregado de cuatro parámetros y resolución diaria (Perrin et al., 2003), que se desarrolló como una alternativa a los modelos tradicionales a largo plazo.

Tal como ya se mencionó, este modelo depende sobre todo de la precipitación, de la evapotranspiración potencial en la cuenca y del tipo de suelo.

En términos generales, la metodología del modelo GR4J utiliza el concepto de retención entre dos tanques que simulan el comportamiento de la capacidad de retención del subsuelo y su capacidad de transmisibilidad; por tanto, el caudal medio diario obtenido con esta metodología es función de la fracción de la precipitación neta diaria entre tanques.

A continuación se presenta un diagrama en el cual se explica conceptualmente esta metodología (figura 1).



**Figura 1.** Descripción del modelo lluvia-escorrentía GR4J (Perrin et al., 2003).

La precipitación y la evapotranspiración potencial se denotarán como  $P$  y  $E$ , respectivamente.  $P$  se calcula según los registros de las estaciones más cercanas, empleando un método de interpolación espacial, en este caso con los polígonos de Thiessen.  $E$  puede ser un valor promedio diario a largo plazo (Barco et al., 2000; Chávez y Jaramillo, 1999), estimado con función definida en función de la temperatura.

Todas las cantidades (entradas, salidas, variables internas) están expresadas en milímetros (mm), motivo por el cual los volúmenes de agua se deben dividir por el área de la cuenca cuando sea necesario.

Tal como se puede ver, las etapas para la estimación del caudal medio diario en el modelo GR4J es función de cuatro variables: X1, X2, X3 y X4.

X1 Capacidad máxima del tanque de producción [mm].

X2 Coeficiente de intercambio de aguas subterráneas [mm].

X3 Capacidad máxima para el tránsito en canales [mm].

X4 Tiempo base del hidrograma unitario UH1 [días].

### CALIBRACIÓN DEL MODELO GR4J. ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS X1, X2, X3 Y X4

Tal como ya se mencionó, para la implementación del modelo GR4J en Colombia, particularmente en las cuencas antrópicas generadas en zonas mineras, para la estimación del caudal medio diario, hay que calibrar los principales parámetros que intervienen en el modelo: X1, X2, X3 y X4. Esta calibración se hace a partir de registros históricos de datos de escorrentía diaria.

Para el desarrollo de esta calibración se tomaron los registros de precipitación diaria de una estación pluviométrica y de los registros diarios de escorrentía de una pequeña cuenca instrumentada, que drena a una piscina de sedimentación en la zona minera de Drummond en el sur del Cesar.

Para obtener los parámetros definitivos se realizaron varias modelaciones, empleando los resultados del modelo GR4J (alimentado con los registros de precipitación y evaporación potencial diaria), y se contrastaron con los valores de escorrentía diaria registrados en la cuenca en unidades de milímetros.

A partir del proceso de optimización se obtuvieron los parámetros X1 a X4, minimizando la diferencia absoluta entre la escorrentía estimada con el modelo y la escorrentía diaria registrada en la cuenca.

Se utilizaron como valores semilla los resultados obtenidos de la calibración hecha en una cuenca cercana. Durante el proceso de calibración fue necesario acotar los valores máximos y mínimos que podían adoptar los parámetros (X1, X2, X3, X4), con el propósito de obtener valores lógicos

Finalmente, los parámetros de calibración se ajustaron a partir de los valores de la elevación diaria de la lámina de agua registrados en uno de los tajos alimentados por una cuenca similar. Dicho procedimiento se llevó a cabo considerando todas las entradas y salidas en el tajo. Este último proceso se describe en detalle en otra investigación.

### CONCLUSIONES

1. Para la transformación de la lluvia en escorrentía a nivel diario es posible utilizar el GR4J si se cuenta con valores diarios de precipitación, evapotranspiración y escorrentía.
2. La calibración del modelo ha sido posible gracias a la información de la escorrentía recopilada en la cuenca de drenaje de la zona minera y cuyo caudal es aforado diariamente en una piscina y de acuerdo con la información suministrada
3. Adicionalmente en este estudio se ha utilizado para la calibración del modelo GR4J los registros del llenado actual del tajo, asumiendo constantes los caudales de agua subterránea.
4. Por su sencillez, el modelo GR4J no considera de manera explícita las condiciones de flujo no estacionario, derivadas principalmente de los procesos realizados una vez que el agua se infiltra o percola. Es decir, se ha usado un modelo agregado (puntual) y permanente.

### REFERENCIAS

- Carvajal, L. F. y Roldán, E. (2006). Calibración del modelo lluvia-escorrentía agregado GR4J. Aplicación: cuenca del río Aburrá. Universidad Nacional de Colombia<sup>4</sup>.
- Chow, V. T. (1994). *Hidrología aplicada*. Bogotá, D.C.: Editorial McGraw-Hill.
- Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito (2015-2020). Estudio hidrológico proyecto La Loma, Drummond Ltd.<sup>2</sup>.
- Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito (2012). Informe de consultoría para la evaluación de estudios hidrológicos e hidráulicos en las cuencas en estado natural que conforman el área minera del centro del Cesar. Caudales máximos y mínimos. Bogotá, D.C.<sup>3</sup>.
- Kennedy, B., Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (US) (1990). *Surface Mining Book*. Cap. 5. Planning and Design of Surface Mines<sup>1</sup>.

ACREDITACIÓN  
INSTITUCIONAL  
DE ALTA CALIDAD

Renovación Resolución MIDEPLAN 1002710  
del 19 de marzo de 2019

## Nuevos programas

- **Carrera profesional** en Ingeniería Estadística
- **Maestría** en Ciencia de Datos
- **Maestría** en Ciencias Actuariales
- **Maestría** en Informática
- **Especialización** en Gestión Integrada de la Seguridad y Salud en el Trabajo, Calidad y Medio Ambiente

## Preuniversitario

## Maestría en Ingeniería Civil - Nuevos énfasis

- **Construcción**
- **Evaluación, Reparación y Rehabilitación Estructural**
- **Seguridad Vial y Prevención de Accidentes de Tránsito**

12

Programas de pregrado

9

Programas de especialización

10

Programas de maestría

1

Doctorado en Ingeniería

+100

Programas de educación continuada

**Inscripciones abiertas**

Mayor información:

[www.escuelaing.edu.co](http://www.escuelaing.edu.co)



57(1) 668 3600



300 823 5420

Ak. 45.º 205-59 (autopista Norte) Bogotá, D.C.

Línea Nacional Gratuita: 01 8000 112668



Escuelaing



Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Personería Jurídica 086 del 19 de enero de 1973

VIGILADA MINEDUCACIÓN

# Planta de tratamiento de aguas residuales para una población de 2000 habitantes

## Wastewater treatment plant for a population of 2000 inhabitants

**OLGA LORENA PIEDRA<sup>1</sup> - JAIRO ALBERTO ROMERO ROJAS<sup>2</sup>**

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

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

olga.piedra@mail.escuelaing.edu.co - jairo.romero@escuelaing.edu.co

Recibido: 28/03/2020 Aceptado: 10/04/2020

Disponible en [http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones\\_revista](http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista)  
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

### Resumen

En este artículo se presenta el diseño conceptual de una planta de tratamiento de aguas residuales para poblaciones inferiores o iguales a 2000 habitantes que cumple con la normativa aplicable para vertimiento, así como con la posibilidad de reúso del efluente para fines agrícolas<sup>(1)</sup>.

**Palabras claves:** tratamiento, aguas residuales, pequeñas PTAR.

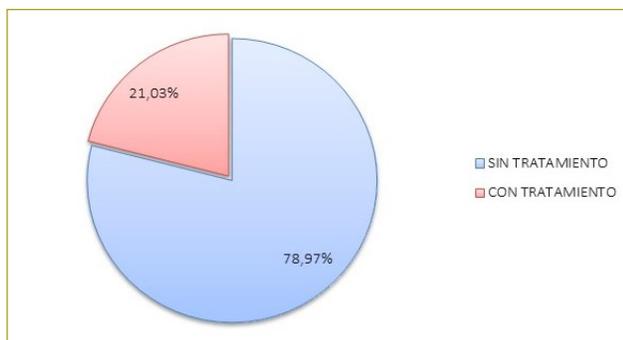
### Abstract

This article presents the design of a wastewater treatment plant for a population of 2000 inhabitants for complying with the requirements for disposal or reuse of the effluent<sup>(1)</sup>.

**Keywords:** treatment, wastewater, small WWTP.

## INTRODUCCIÓN

El departamento de Cundinamarca tiene 116 municipios en total. En 98 de ellos se han registrado 580 vertimientos, de los cuales 458 se encuentran sin tratamiento alguno. En los 18 municipios faltantes no existe información reportada (CAR, 2017). El 79 % de los vertimientos registrados no se ha atendido (figura 1).



**Figura 1.** Vertimientos con tratamiento y sin él en Cundinamarca.

**Fuente:** Consolidado de sistemas de tratamiento de aguas residuales en jurisdicción de la CAR (CAR, 2017).

Además, se encontraron 122 vertimientos que tienen algún tipo de tratamiento, pero solamente el 53 % de ellos se encuentran en operación (figura 2).

La necesidad de destinar recursos al tratamiento de aguas residuales es una prioridad, por lo que se justifica proponer una solución para poblaciones de hasta 2000 habitantes con parámetros de diseño convencionales.

## RESULTADOS

La norma aplicable a vertimientos cuya descarga se entrega al río Bogotá, clasificación VI, cuenca media de la CAR, se resume a renglón seguido (tabla 1).

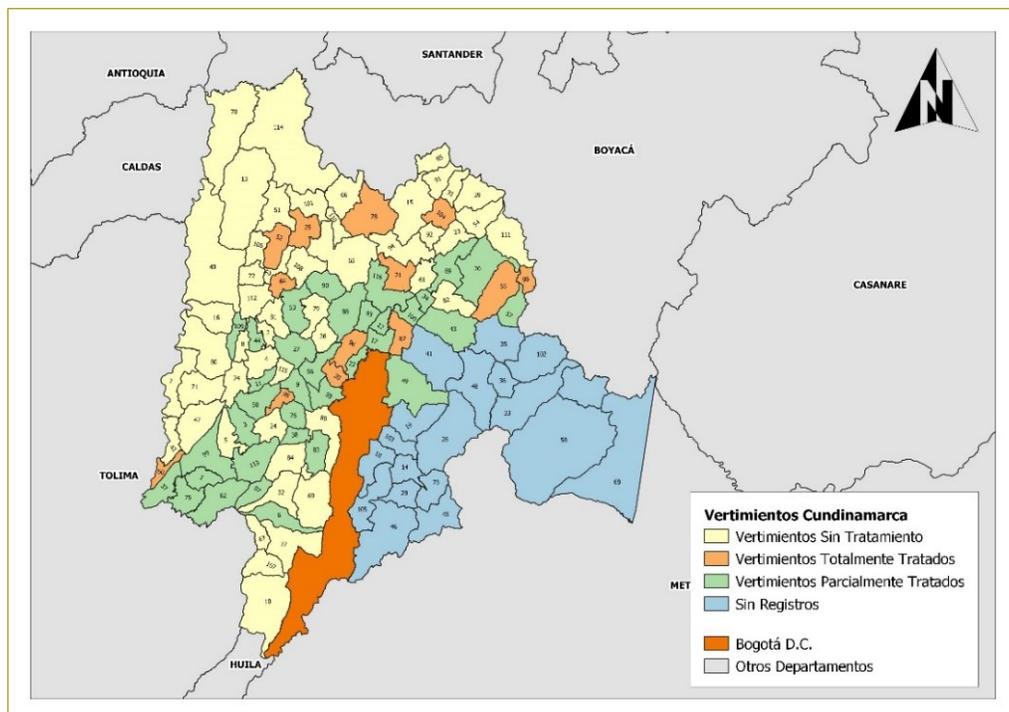
**Tabla 1**

Parámetros para control de vertimientos en Cundinamarca

Parámetro	Expresado como	Valor más restrictivo
DBO	mg/L	50
Coliformes totales	NMP/100 mL	20.000
Nitritos	mg/L	10
Sólidos suspendidos	mg/L	40

**Fuente:** Acuerdo CAR 043 de 2006.

Los parámetros de diseño para una población inferior o igual a 2000 habitantes se presentan a continuación (tabla 2), mientras que las eficiencias requeridas se pueden observar más adelante (tabla 3).



**Figura 2.** Estado del tratamiento de vertimientos en Cundinamarca.

**Fuente:** Consolidado de sistemas de tratamiento de aguas residuales en jurisdicción de la CAR (CAR, 2017).

**Tabla 2**  
Parámetros de diseño para una población inferior o igual a 2000 habitantes

Parámetro	Valor	Unidad	Referencia
Población	2000	Hab.	Diseño
Carga de DBO	50	g/hab./d	RAS 2017
Carga de SST	50	g/hab./d	RAS 2017
NH <sub>3</sub> -N	8,4	g/hab./d	RAS 2017
NTK	12	g/hab./d	RAS 2017
Coliformes totales	200.000.000.000	Nº /hab./d	RAS 2017
Temperatura	18	°C	Diseño
Q (m <sup>3</sup> /d)	238	m <sup>3</sup> /d	RAS 2017
Q diseño	2,75	L/s	RAS 2017
Carga orgánica	100	kg DBO/d	Diseño
DBO	420	mg/L	DBO afluente
SST	420	mg/L	SST afluente
NH <sub>3</sub> -N	70	mg/L	Diseño
NTK	100	mg/L	Diseño
Coliformes totales	168.067.226	NMP/100mL	RAS 2017
Dotación	140	L/hab./d	RAS 2017
Factor de retorno	0,85	-	RAS 2017

**Tabla 3**  
Eficiencias requeridas

Parámetro	Agua cruda	Resolución 043 (CAR, 2015)	Eficiencia requerida
DBO	420 mg/L	50 mg/L	88 %
SS	420 mg/L	40 mg/L	91 %
Nitritos (NO <sub>2</sub> -)	N/R	10 mg/L	N/A
NTK	100,84 mg/L	N/R	N/A
Coliformes fecales	1,68 × 10 <sup>8</sup> NMP/100 mL	20.000 NMP/100 mL	99,99 %

## ALTERNATIVAS DE DISEÑO

**Alternativa 1.** Incluye una laguna primaria facultativa, seguida de una de maduración. La primaria para remoción de DBO y SST, y la de maduración para remoción de coliformes residuales del tratamiento primario.

Rejilla				
A.R. Cruda	Canaleta Parshall	Laguna Facultativa	Laguna de Maduración	Disposición
AGUA RESIDUAL CRUDA AFLUENTE Q = 238 m <sup>3</sup> /d Co = 100 kgDBO/d DBO = 420 mg/L SST = 420 mg/L CF = 1,68x10 <sup>8</sup> NMP/100mL	AFLUENTE Q = 238 m <sup>3</sup> /d Co = 100 kgDBO/d DBO = 420 mg/L SST = 420 mg/L CF = 1,68x10 <sup>8</sup> NMP/100mL	TRATAMIENTO PRIMARIO Q = 238 m <sup>3</sup> /d Co = 25 kgDBO/d DBO = 105 mg/L SST = 105 mg/L CF = 2,3x10 <sup>8</sup> NMP/100mL	TRATAMIENTO SECUNDARIO Q = 238 m <sup>3</sup> /d Co = 5,5 kgDBO/d DBO = 23 mg/L SST = 11 mg/L CF = 19.240 NMP/100mL	

**Alternativa 2.** Incluye una laguna anaerobia, seguida de una laguna facultativa y de una laguna de maduración.

Rejilla					
A.R. Cruda	Canaleta Parshall	Laguna Anaerobia	Laguna Facultativa	Laguna de Maduración	Disposición
AGUA RESIDUAL CRUDA AFLUENTE Q = 238 m <sup>3</sup> /d Co = 100 kgDBO/d DBO = 420 mg/L SST = 420 mg/L CF = 1,68x10 <sup>8</sup> NMP/100mL		TRATAMIENTO PRIMARIO Q = 238 m <sup>3</sup> /d Co = 40 kgDBO/d DBO = 168 mg/L SST = 189 mg/L CF = 1,2x10 <sup>7</sup> NMP/100mL	TRATAMIENTO SECUNDARIO Q = 238 m <sup>3</sup> /d Co = 6 kgDBO/d DBO = 25 mg/L SST = 57 mg/L CF = 4,4x10 <sup>5</sup> NMP/100mL	TRATAMIENTO TERCIARIO Q = 238 m <sup>3</sup> /d Co = 1,4 kgDBO/d DBO = 6 mg/L SST = 6 mg/L CF = 1,8 x10 <sup>4</sup> NMP/100mL	

**Alternativa 3.** Incluye un tanque Imhoff, seguido de una laguna facultativa y de una laguna de maduración para el tratamiento de los coliformes residuales.

Rejilla					
A.R. Cruda	Canaleta Parshall	Tanque Imhoff	Laguna Facultativa	Laguna de Maduración	Disposición
AGUA RESIDUAL CRUDA AFLUENTE Q = 238 m <sup>3</sup> /d Co = 100 kgDBO/d DBO = 420 mg/L SST = 420 mg/L CF = 1,68x10 <sup>8</sup> NMP/100mL		TRATAMIENTO PRIMARIO Q = 238 m <sup>3</sup> /d Co = 60 kgDBO/d DBO = 252 mg/L SST = 168 mg/L CF = 8,4x10 <sup>7</sup> NMP/100mL	TRATAMIENTO SECUNDARIO Q = 238 m <sup>3</sup> /d Co = 6 kgDBO/d DBO = 25 mg/L SST = 42 mg/L CF = 1,2x10 <sup>5</sup> NMP/100mL	TRATAMIENTO TERCIARIO Q = 238 m <sup>3</sup> /d Co = 2 kgDBO/d DBO = 8 mg/L SST = 4 mg/L CF = 19.291 NMP/100mL	

Lechos de secado

A renglón seguido se muestran el comparativo de dimensiones de las tres alternativas (tabla 4) y el de sus eficiencias (tabla 5).

Dimensión	UN	Alternativa		
		1	2	3
Tratamiento		L. facultativa	L. anaerobia	T. Imhoff
Alto efectivo	m	2,5	3	5,1
Borde libre	m	0,8	0,5	0,3
Unidades	#	1	1	1
Ancho	m	35	10	4,3
Largo	m	75	24	5
Tratamiento		L. maduración	L. facultativa	L. facultativa
Alto efectivo	m	2	2	2
Borde libre	m	0,5	0,8	0,1
Unidades	#	1	1	1
Ancho	m	50	20	35
Largo	m	110	60	85
Tratamiento			L. maduración	L. maduración
Alto efectivo	m		1,5	1,5
Borde libre	m		0,8	0,8
Unidades	#		1	1
Ancho	m		20	35
Largo	m		75	115
Área total	m <sup>2</sup>	8.125	2.940	7.022
Volumen total	m <sup>3</sup>	17.563	5.370	12.098

**Tabla 4.** Comparativo de dimensiones

Tabla 5  
Comparativo de eficiencias

Parámetro	Unidad	Afluente	Alternativa 1		Alternativa 2		Alternativa 3	
			Eficiencia	Efluente	Eficiencia	Efluente	Eficiencia	Efluente
CO	kgDBO/d	100	95 %	6	99 %	1	99 %	2
DBO	mg/L	420	95 %	23	99 %	6	99 %	8
SST	mg/L	420	97 %	11	99 %	6	99 %	4
CT	NMP/100 mL	168.067.227	100 %	19.240	100 %	17.388	100 %	19.291

En la tabla siguiente (tabla 6) se incluye la matriz de selección de la alternativa de diseño, con base en la factibilidad, aplicabilidad, confiabilidad, costo, características del efluente, procesamiento y producción de lodos, así como la sostenibilidad social de cada una de ellas. Como se observa en la matriz de selección, la alternativa 2 es la más recomendable.

## CONCLUSIONES

La alternativa recomendada genera una solución óptima para el cumplimiento de la norma colombiana para

vertimiento de las aguas residuales de una población inferior o igual a 2000 habitantes, con una carga de 100 kg DBO/d y un caudal de 238 m<sup>3</sup>/d.

Esta alternativa consiste en una serie de lagunas: laguna primaria anaerobia, laguna secundaria facultativa y laguna terciaria de maduración. El sistema de tratamiento seleccionado permite:

- Menor costo constructivo y de operación.
- Extracción de lodos con mínimo esfuerzo operativo y con plazos extensos.
- Mínima área de terreno por utilizar.

Tabla 6  
Matriz de selección de alternativa de diseño

Variable	Peso	Alternativa 1			Alternativa 2			Alternativa 3		
		Laguna facultativa + Laguna de maduración			Laguna anaerobia + laguna facultativa + laguna de maduración			Tanque Imhoff + laguna facultativa + laguna de maduración		
		Descripción	Calificación	Ponderación	Descripción	Calificación	Ponderación	Descripción	Calificación	Ponderación
Factibilidad	10%	Ejecutable	100	10	Ejecutable	100	10	Ejecutable	100	10
Aplicabilidad	10%	Restricciones parciales de grandes áreas requeridas.	0	0	Restricciones parciales de clima, área y olores.	100	10	Restricciones sobre olores y manejo de lodos.	100	10
Confiabilidad	15 %	Tolerancia a altas cargas orgánicas. Cumple todos los requisitos técnicos.	100	15	Tolerancia a altas cargas orgánicas. Cumple todos los requisitos técnicos.	100	15	No soporta caudales extremos, pero cumple con los requisitos técnicos.	50	7,5
Costo	30 %	Mayor costo.	0	0	Menor costo.	100	30	Mayor costo.	0	0
Características del efluente	15 %	Cumple.	100	15	Cumple.	100	15	Cumple.	100	15
Procesamiento y producción de lodos	10%	Periodo de desenlode mayor de diez años	100	10	Periodo de desenlode de seis años	50	5	Requiere postratamiento y manejo semestral de extracción de lodos.	0	0
Sostenibilidad social	10 %	No tienen percepción favorable	0	0	No tienen percepción favorable	0	0	Percepción medianamente favorable	50	5
Totales	100%			50			85			47,5

- No requerir personal especializado para su operación y mantenimiento.
- Construcción sencilla, que no reviste complejidad alguna.
- Posibilidad de reúso del efluente para riego agrícola.
- Tiempos cortos de ejecución.
- Cumplir con la norma exigida.
- Tener la capacidad de soportar cargas extremas.

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

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

MIGUEL ÁNGEL BETANCUR CRUZ<sup>1</sup> - JAIRO ALBERTO ROMERO ROJAS<sup>2</sup>

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

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

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

Recibido: 31/03/2020 Aceptado: 14/04/2020

Disponible en [http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones\\_revista](http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista)  
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

### Resumen

En este artículo se describe, se hace el diagnóstico hidráulico y se presenta el rendimiento operacional de una planta de tratamiento de agua potable (PTAP), con base en el análisis de sus componentes y de los resultados obtenidos en la caracterización fisicoquímica y microbiológica del agua cruda y tratada<sup>(1)</sup>.

**Palabras claves:** tratamiento de aguas, agua potable.

### Abstract

This article shows the description, hydraulic diagnosis and results of the operation of the WTP, according with the analysis of its components and the results of the physico-chemical characterization of untreated and treated water<sup>(1)</sup>.

**Keywords:** water treatment, drinking water.

## INTRODUCCIÓN

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

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

## METODOLOGÍA

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

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

Se hizo el diagnóstico hidráulico de cada componente para los caudales de diseño proyectados: 50 y 75 L/s, de acuerdo con los lineamientos establecidos en el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico, RAS 2000<sup>(3)</sup>; en el título C del Reglamento de Agua Potable y Saneamiento Básico, RAS 2010<sup>(4)</sup>, y en la Resolución 0330 de 2017<sup>(5)</sup>. Para determinar la eficiencia del sistema se analizaron color, turbiedad, hierro, *E. coli* y coliformes totales, comparados con los límites permisibles establecidos en la Resolución 2115 de 2017, expedida por el Ministerio de Protección Social<sup>(6)</sup>.

## RESULTADOS

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

**Tabla 1**  
Diagnóstico de la cámara de quietamiento

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

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

**Tabla 2**  
Diagnóstico de mezcla rápida (canaleta Parshall)

Parámetro	Unidad	Valor	Referencia <sup>(3,4,5)</sup>	Cumplimiento
Velocidad en la garganta, Q = 50 L/s	m/s	0,42	>2	No
Velocidad del efluente, Q = 50 L/s	m/s	0,62	>0,75	No
Número de Froude, Q = 50 L/s		3,39	1,7-2,5 o 4,5-9	No
Relación $h_p/W$ , Q = 50 L/s		0,58	0,4-0,8	Sí
Tiempo de retención, Q = 50 L/s	s	1,53	<1	No

**Tabla 2 (cont.)**  
Diagnóstico de mezcla rápida (canaleta Parshall)

Parámetro	Unidad	Valor	Referencia <sup>(3,4,5)</sup>	Cumplimiento
Gradiente de velocidad, Q = 50 L/s	s <sup>-1</sup>	996	1,000-2,000	Sí
Relación $h_p/W$ , Q = 75 L/s		0,76	0,4-0,8	Sí
Velocidad en la garganta, Q = 75 L/s	m/s	0,48	>2	No
Velocidad del efluente, Q = 75 L/s	m/s	0,68	>0,75	No
Número de Froude, Q = 75 L/s		2,86	1,7-2,5 o 4,5-9	No
Tiempo de retención, Q = 75 L/s	s	1,35	<1	No
Gradiente de velocidad, Q = 75 L/s	s <sup>-1</sup>	1.049	1,000 - 2,000	Sí

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

**Tabla 3**  
Diagnóstico floculador Alabama, Q = 50 L/s

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

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

**Tabla 4**  
Diagnóstico floculador Alabama, Q = 75 L/s

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

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

**Tabla 5**  
Diagnóstico del sedimentador

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

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

**Tabla 6**  
Diagnóstico de filtros

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

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

**Tabla 7**  
Eficiencia de la PTAP

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

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

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el estudio realizado se recomienda construir una nueva cámara de aquietamiento, con una compuerta con tubería de desagüe y vertedero de control para caudal de excesos.

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

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

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

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

## REFERENCIAS

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



# Propuesta de un sistema de tratamiento para aguas residuales, producto de actividades ganaderas

## Proposal for a wastewater treatment system for livestock activities

JOJANA CAROLINA LUQUE LÓPEZ<sup>1</sup> - JAIRO ALBERTO ROMERO ROJAS<sup>2</sup>

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

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

jojana.luque@mail.escuelaing.edu.co - jairo.romero@escuelaing.edu.co

Recibido: 12/04/2020 Aceptado: 24/04/2020

Disponible en [http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones\\_revista](http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista)  
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

### Resumen

En este artículo se presenta el diseño de un sistema de tratamiento de las aguas residuales de una finca dedicada a la producción lechera en el municipio de Une (Cundinamarca)<sup>(1)</sup>.

**Palabras claves:** aguas residuales, producción lechera, actividades ganaderas, tratamiento.

### Abstract

This article presents the design of a wastewater treatment system resulting from milk production of a farm in the municipality of Une (Cundinamarca).

**Keywords:** wastewater, milk production, livestock activities, treatment.

## INTRODUCCIÓN

Se analizan los parámetros físicos de las aguas residuales, resultado de la actividad lechera en una finca situada en Une (Cundinamarca), que se ha dedicado a la producción de ganado por más de 70 años. Se realiza además la caracterización del agua residual de la finca lechera mediante ensayos físico-químicos en relación con el pH, la demanda química de oxígeno, la demanda bioquímica de oxígeno, sólidos totales, sólidos sedimentables, sólidos suspendidos totales, grasas y aceites, y se presenta también una solución factible para el tratamiento y la disposición del agua residual.

## ANTECEDENTES

El sistema ganadero contribuye por medio de dos vías a la contaminación de los recursos hídricos: como fuentes puntuales, aguas de los establos, y como fuentes no puntuales o difusas por el arrastre de estiércol dejado en los campos, lo que trae consigo malos olores, proliferación de moscas, efectos estéticos y la alteración de las propiedades del agua<sup>(2)</sup>. El agua residual generada en la ganadería se caracteriza por contener altas concentraciones de materia orgánica, sólidos suspendidos, nitrógeno y fósforo; de igual manera, presenta una demanda química de oxígeno (DQO) considerable<sup>(3)</sup>.

En varios estudios se ha demostrado que los volúmenes promedio de estiércol fresco generados cada día son 22 kg/bovino de engorde, 38 kg/vaca seca y 68 kg/vaca lactante<sup>(4)</sup>, produciendo un impacto ambiental en el aire con la generación de gases de efecto invernadero, en el agua con la eutrofización de los cuerpos de agua y en el suelo con una sobrecarga de nutrientes variable, según la especie pecuaria, el sistema de alimentación y el manejo del estiércol en las fincas.

**Tabla 1**  
Cargas contaminantes de aguas residuales de la zona de ordeño<sup>(3)</sup>

Parámetros	Colombia	Cuba
pH	7,59	8
DQO (mg/L)	3368	4825
P total (mg/L)	24	27
NTK (mg/L)	99	316
SST (mg/L)	2686	2219
DBO (mg/L)	1022	.....

La caracterización de aguas residuales de fincas ganaderas bovinas, resultantes del proceso productivo en la zona de ordeño, se relaciona a continuación (tabla 1).

## METODOLOGÍA

Se desarrollaron actividades de campo orientadas a identificar las condiciones de la zona y a la toma de muestras para caracterizar mediante ensayos de laboratorio. Paralelamente, se hizo una revisión bibliográfica que permitió formular la propuesta del diseño conceptual del sistema de tratamiento de aguas residuales, en cumplimiento de la normativa vigente.

## RESULTADOS

El lugar de estudio es un predio rural, ubicado dentro del municipio de Une (Cundinamarca), en la vereda denominada La Combura. Lleva como nombre Finca Trinidad y Santa Elena, con una extensión de 42 hectáreas para trabajo agrícola y pecuario. La producción de leche cuenta con un hato lechero de 22 vacas de ordeño promedio durante el año.

El proceso de preordeño, ordeño y posordeño produce 1,09 m<sup>3</sup>/d de agua residual (figura 1), los cuales son vertidos por un sifón que desemboca zanja abajo por un potrero donde se cultivan papa, cilantro, zanahoria o maíz, sin ningún tipo de tratamiento.

### Caracterización del agua residual

Se tomaron cinco muestras para análisis, como se muestra a renglón seguido (tabla 2).

Como se observa, los valores de pH varían en un rango de 6,5 a 9 unidades; el promedio del pH tiene un valor de 7,24, que se encuentra dentro del rango de la Resolución 1207 de 2014 para el uso de aguas residuales tratadas.

La DQO promedio es de 1897 mg O<sub>2</sub>/L, superando el límite admisible de la Resolución 0631 de 2015 para vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales.

La DBO<sub>5</sub> promedio es de 2415 mg/L, que refleja concentraciones considerables y alejadas del límite admisible de la Resolución 0631 de 2015.

Los valores indican agua residual biodegradable, con valores de DBO superiores a los de la DQO.

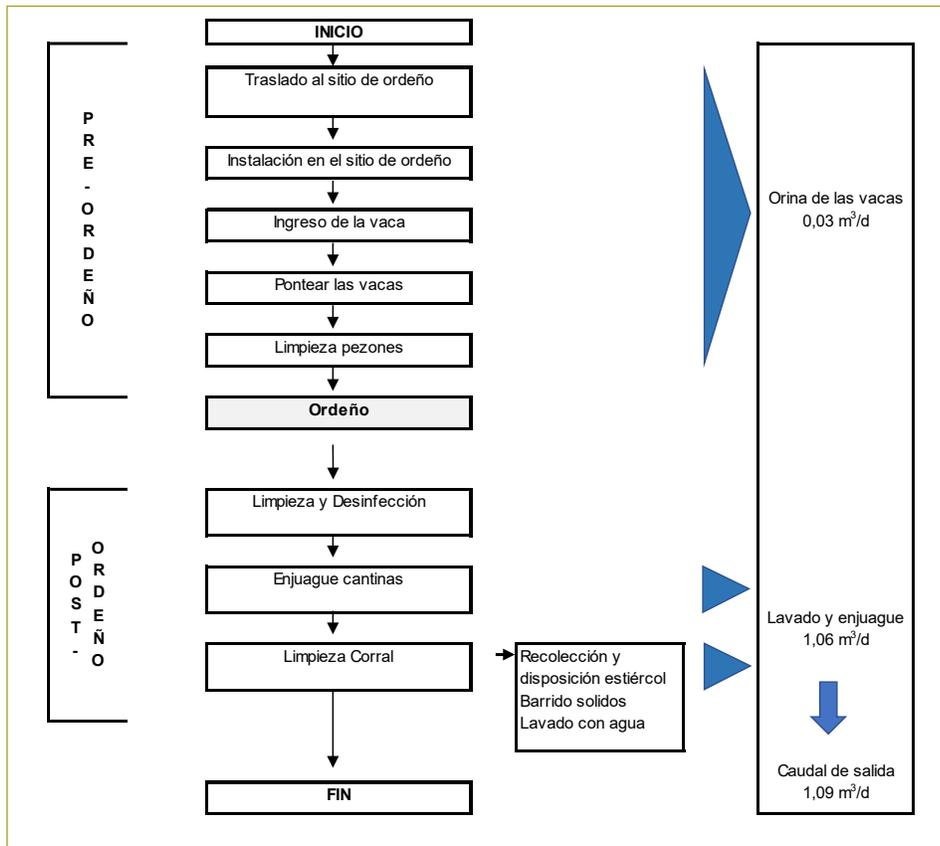


Figura 1. Balance de caudales del proceso de ordeño<sup>(1)</sup>.

Tabla 2  
Caracterización del agua residual<sup>(1)</sup>

Parámetro	Unidades	M1	M2	M3	M4	M5	Promedio
pH	Unidades de pH	7,36	8,52	7,05	6,8	6,62	7,27
DQO	mg O <sub>2</sub> /L	3521	1864	1408	1450	1243	1897
DBO <sub>5</sub>	mg/L	4906	1509	1132	2642	1887	2415
ST	mg/L	7326	5982	3248	2042	3200	4360
STV	mg/L	3700	3608	1574	1554	2582	2604
STF	mg/L	3626	2374	1674	488	618	1756
SSED	mL/L	100	52	15	8	34	42
SST	mg/L	1794	3111	1740	315	664	1525
SSV	mg/L	1044	2044	1370	46	482	997
SSF	mg/L	750	1067	370	269	182	528
Grasas y aceites	mg/L	1,02	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01
Alcalinidad	mg/L – CaCO <sub>3</sub>	290	360	300	120	290	272

El valor promedio de ST es de 4360 mg/L, el de STV es de 2604 mg/L y el de STF es de 1746 mg/L; la normativa no registra un valor límite permisible de estos parámetros. Los valores de los STV son superiores a los de los STF, lo que demuestra la alta concentración orgánica del agua residual.

Los valores de SSED varían en un rango de 8 a 100 mL/L, con promedio de 42 mL/L; esto sobrepasa la Resolución 0631 de 2015, ya que el límite admisible es de 5 mL/L. Es una variación representativa posiblemente del inadecuado proceso de limpieza del corral antes del lavado.

Los valores de SST varían en un rango de 315 a 3111 mg/L, con promedio de 1525 mg/L; esto sobrepasa la Resolución 0631 de 2015, ya que el límite admisible es de 150 mg/L e indica una cantidad elevada de materia suspendida.

Como se puede observar, los valores de grasas y aceites son en promedio de 1,01 mg/L, límite admisible en la Resolución 0631 de 2015, que es de 20 mg/L.

Los resultados de la muestra 1 presentan una mayor variación con respecto a las demás muestras, lo cual se puede generar por el número de vacas en el hato de ordeño, puesto que el día de la muestra 1 había 25 vacas y el resto de los días se encontraban 22 vacas en promedio.

Los parámetros de referencia para el diseño del tratamiento de las aguas residuales son la DQO, la DBO<sub>5</sub>, los SST y los SSED que superan la norma para vertimiento. Por tanto, la PTAR debe proveer remociones del 90 % en promedio en DBO<sub>5</sub>, SST y SSED.

### Sistema de tratamiento

Teniendo en cuenta que no existe alcantarillado sanitario y que el caudal diario es de solamente 1,09 m<sup>3</sup>/d, se considera como opción de tratamiento un sistema integrado por tanque séptico y disposición final sobre el suelo, mediante un lecho de percolación (figuras 2 y 3).

- Se adopta un tanque séptico de 3,0 m de longitud, 1,0 m de ancho y 2 m de profundidad, con un volumen de 6 m<sup>3</sup>.
- El tiempo de retención será de seis días y el periodo de desenlode de un año.
- En razón de que se requiere eficiencia de remoción del 90 %, se acompaña el tanque séptico de un filtro anaerobio, al final del tanque séptico.
- El lecho filtrante estará constituido por un lecho de grava, con un volumen de 0,4 m<sup>3</sup> por cada 1 m<sup>3</sup>/d de aguas residuales que va a tratar.
- El filtro anaerobio cuenta con una eficiencia de remoción del 80 % en DQO y DBO<sub>5</sub> y del 70 % en SST.

Se hace un ensayo de permeabilidad para determinar la tasa de percolación del suelo, la cual es del tipo de marga limosa, marga arcillosa limosa, arena fina y arena margosa. Se adopta una tasa de aplicación de 32 L/d m<sup>2</sup>, por ser una zona con pendiente menor del 10 % y con mayor permeabilidad<sup>(5)</sup>.

Se requiere un área de aplicación de 34,06 m<sup>2</sup>, adoptando tres líneas de tubería de 0,10 m de diámetro, en un lecho de percolación de 5 m de ancho y 7 m de longitud, con pendiente de 0,5 % (figura 3).

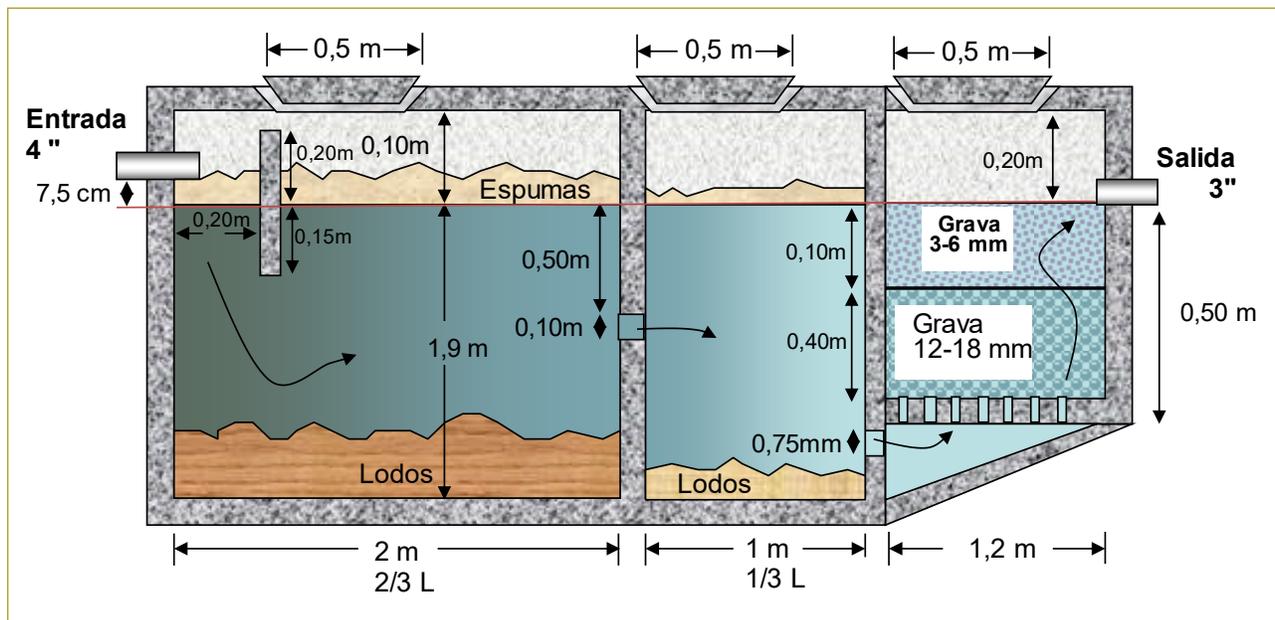


Figura 2. Esquema de un tanque séptico.

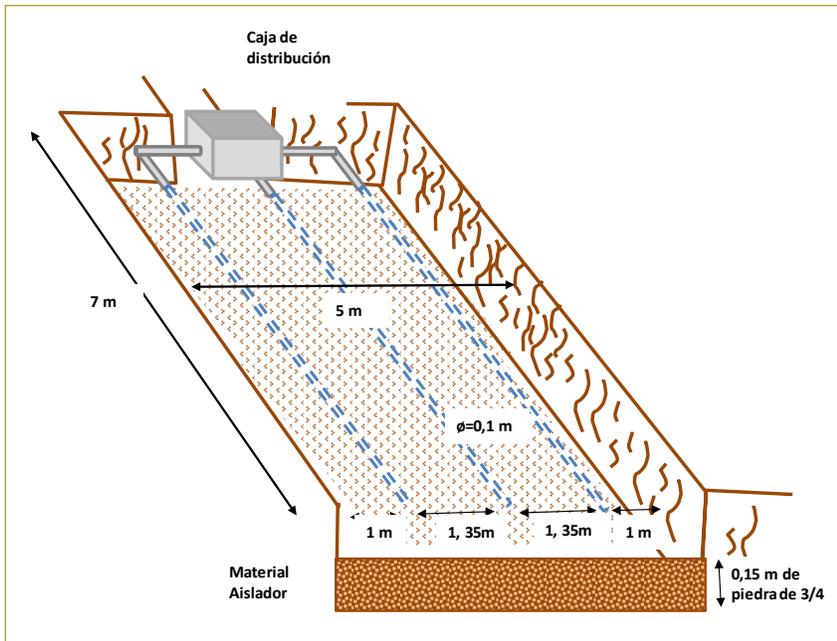


Figura 3. Esquema de un lecho de infiltración.

## CONCLUSIONES

- La caracterización del agua indica los siguientes valores promedio: pH de 7,2, DQO de 1892 mg O<sub>2</sub>/L, DBO<sub>5</sub> de 2415 mg/L, ST de 4360 mg/L, SSED de 42 mL/L, SST de 1525 mg/L y grasas y aceites de 1,01 mg/L.
- Los parámetros de referencia para el diseño del tratamiento de las aguas residuales son la DQO, la DBO<sub>5</sub>, los SST y los SSED que superan la norma para vertimiento. Por tanto, la PTAR debe proveer remociones del 90 % en promedio en DBO<sub>5</sub>, SST y SSED.
- La PTAR propuesta: tanque séptico con filtro anaerobio, seguido de un lecho de infiltración como medio de aplicación al suelo del agua residual tratada. Cumple la normativa de la Resolución 1207 de 2014 y de la Resolución 0631 de 2015.

## REFERENCIAS

- Luque, J. (2019). *Propuesta de un sistema de tratamiento para aguas residuales, producto de actividades ganaderas* (trabajo de grado para la maestría en Ingeniería Civil, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá).
- Escobar, J. (2002). *Recursos naturales e infraestructura: la contaminación de los ríos y sus efectos en las áreas costeras y el mar*. Santiago de Chile: Naciones Unidas-Cepal-Eclac.
- Loaiza, Y. A., & Osorio, A. L. (2009). *Gestión del agua en el sector de la ganadería bovina en la cuenca río La Vieja, departamentos de Quindío y Risaralda* (tesis de pregrado, Universidad Tecnológica de Pereira).
- Pinos R., J., García L., J., Peña A., L. et al. (2012). Impactos y regulaciones ambientales del estiércol generado por los sistemas ganaderos de algunos países de América. *Agrociencia*, 46, 4, 359-370.
- Romero, J. (1999). *Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño*. Bogotá, D.C.: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.



# Correlaciones entre el CBR de la subrasante y deflexiones medidas con FWD en Colombia

## Correlations between subgrade CBR and measured deflections with FWD in Colombia

ÍNGRID ADRIANA RODRÍGUEZ TORRES<sup>1</sup> - FERNANDO ESTRADA SÁNCHEZ<sup>2</sup>

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

2. Ingeniero civil. Profesor de cátedra.

ingrid.rodriguez@mail.escuelaing.edu.co - fernando.estrada@escuelaing.edu.co

Recibido: 15/04/2020 Aceptado: 30/04/2020

Disponible en [http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones\\_revista](http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista)

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

### Resumen

El presente estudio tiene como propósito buscar correlaciones entre el CBR de la subrasante y las deflexiones medidas con FWD, para diferentes tipos de suelo (finos, arenas y gravas). Para esto se contó con información simultánea de datos de CBR sobre muestras inalteradas y muestras compactadas en laboratorio, propiedades del suelo y medidas de deflexiones en varios proyectos viales desarrollados en Colombia. Para analizar la información disponible se emplearon gráficas de dispersión simple, con el propósito de observar la tendencia de los datos de las propiedades del suelo y deflexiones ubicadas a una distancia  $r$  del centro de aplicación de carga, con los datos de CBR de muestras inalteradas y compactadas en laboratorio. Las propiedades analizadas del suelo fueron límites de Atterberg, granulometría, humedad natural del suelo y módulo determinado mediante las metodologías AASHTO y método directo.

Una vez analizadas las variables que mejor se correlacionaron con el CBR para cada tipo de suelo, se aplicó un modelo lineal generalizado (MLG) para determinar el valor de CBR a partir de mediciones de deflectometría y parámetros índices del suelo.

Con base en los modelos desarrollados se puede indicar que, para los suelos finos, existe una buena correlación entre el CBR en condiciones de humedad natural y la deflexión ( $dr$ ), medida en el sensor ubicado a una distancia  $r$  y la humedad natural. Para el caso de los suelos arenosos, el CBR de muestras compactadas en laboratorio se correlaciona bien con la deflexión ( $dr$ ) y la distancia ( $r$ ). Por último, para los suelos tipo grava, con una correlación más baja, el CBR de muestras compactadas

en laboratorio se relaciona mejor con la deflexión ( $dr$ ), la distancia ( $r$ ) y el porcentaje de finos. Adicionalmente, se obtiene que la relación del CBR con los parámetros físicos, como LL, LP, IP, % gravas, % arenas y % finos, presenta una gran dispersión. Esta baja homogeneidad indica que no existe una correlación directa de cada parámetro con el CBR y que se pueden requerir análisis multivariados o correlaciones múltiples para llegar a una buena correlación.

**Palabras claves:** FWD (deflectómetro de impacto), subrasante, módulo resiliente, CBR (*California Bearing Ratio*).

### Abstract

This study is aimed at developing correlations between the CBR of the subgrade and the deflections measured with FWD for different types of soil (fines, sands, and gravels). Data related to simultaneous values of CBR, soil properties and deflection measurements on undisturbed samples and samples compacted in the laboratory for different road projects carried out in Colombia.

Simple scatterplots were used for analyzing the database and assessing the trends between the soil properties and deflections located at a distance  $r$  from the load application center, and values of CBR from undisturbed and compacted samples in the laboratory. The assessed properties of soil were Atterberg limits, granulometry, natural soil humidity, and module determined by AASHTO and direct methods. After analyzing the variables showing the best fit with the CBR for each type of soil, a generalized linear model was applied to determine

the value of CBR from deflectometry measurements and soil index parameters.

The results of the developed models for fine soils demonstrated a good correlation between the CBR in conditions of natural humidity and the deflection ( $dr$ ) measured in the sensor located at a distance  $r$  and the natural humidity. In the case of sandy soils, the CBR of samples compacted in the laboratory showed a good correlation with the deflections  $dr$  and the distance  $r$ . For gravel-type soils, the CBR of samples compacted in the laboratory is better correlated to the deflection  $dr$ , the distance  $r$ , and the percentage of fines; however, the correlation is lower than that for fine and sandy soils. The relationship between the CBR and the physical parameters such as LL, LP, PI, and percentages of gravel, sand and fine, evidenced a high dispersion. This low homogeneity indicates that there is no direct correlation between each parameter and CBR, and that a multivariate analysis or multiple correlations is required to attain a good correlation.

**Keywords:** FWD (Falling Weight Deflectometer), subgrade, resilient module, CBR (California Bearing Ratio).

## INTRODUCCIÓN

Las metodologías actuales para el diseño y la rehabilitación de pavimentos flexibles, como la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO, 1993) y Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide (MEPDG), involucran dentro de sus parámetros de diseño el módulo resiliente de la subrasante, MR. La complejidad de los procedimientos de las pruebas de laboratorio (tiempo, costo, disponibilidad) ha incitado a las agencias de carreteras en el ámbito internacional a explorar otros métodos de prueba, principalmente pruebas de campo (*in situ*), como mediciones de deflectometría (FWD) para determinar el módulo de la subrasante por retrocálculo y mediante fórmulas empíricas relacionadas con otros ensayos básicos de capacidad de soporte, como el CBR (*California Bearing Ratio*).

Los estudios de deflectometría con equipos de medida dinámica (carga vibratoria sinusoidal o impacto) se pueden emplear para determinar los módulos de las capas del pavimento y de la subrasante a partir de las mediciones de deflexión. Los procedimientos más utilizados para predecirlos son el retrocálculo, el cálculo directo y las ecuaciones de regresión.

La relación entre el ensayo de relación de soporte de California (CBR) y el módulo resiliente, para suelos de subrasante, se ha estudiado extensamente en el pasado (Heukelom & Klomp, 1962; Green & Hall, 1975; Lister, 1987); el CBR es el ensayo para determinar la capacidad de soporte de la subrasante más usado en el país. Tanto

en Colombia, como en otras partes del mundo, se acepta estimar el módulo resiliente de diseño a partir de los ensayos de CBR.

La *Guía AASHTO* permite el uso tanto de ensayos de laboratorio como el módulo retrocalculado a partir de pruebas *in situ*, pero reconoce que los módulos determinados en ambos procedimientos no son iguales.

Existen muchos factores que pueden llevar a la discrepancia entre el módulo del laboratorio y módulos retrocalculados; una de las razones es la dificultad de obtener muestras representativas de campo, debido a la variabilidad o heterogeneidad inherente a los materiales de la capa de subrasante.

En Colombia, las normas vigentes permiten emplear correlaciones a partir de la relación de soporte de California (CBR) para la determinación del módulo resiliente de la subrasante por medio de ecuaciones empíricas, como la descrita por Heukelom & Klomp (1962).

Cuando se utilizan ecuaciones de correlación, surgen múltiples incertidumbres. Una de ellas es que el ensayo de CBR es una medida empírica indirecta de la resistencia al corte y de la rigidez del material en condiciones no drenadas que se mide bajo una carga monotónica, y en un pavimento, la carga es cíclica. Además, los niveles de esfuerzo en un pavimento son mucho más bajos que aquellos que se generan en la muestra cuando se hace el ensayo de CBR.

En ese sentido, para el caso colombiano, donde hay variedad de composición y tipos de suelos, escoger arbitrariamente una ecuación empírica puede conducir a diseños de estructuras sub o sobredimensionadas (Rondón & Reyes, 2007).

Una opción, que puede proporcionar datos de módulos determinados con información medida *in situ*, es a través de mediciones de deflexiones empleando el equipo deflectómetro de impacto (FWD, por su sigla en inglés), cuya relación con el valor de CBR no se ha estudiado ampliamente en Colombia; sin embargo, a escala mundial se ha tratado de correlacionar el CBR con la respuesta a las cargas (deflectometría), con resultados variables. La deflectometría (respuesta del pavimento a las cargas) es, teóricamente, la mejor manera de determinar las propiedades mecánicas de los materiales de las capas que conforman la estructura del pavimento.

En el país se dispone de una gran cantidad de información de proyectos viales, en los cuales hay

información simultánea de deflectometría y de CBR. Aprovechar esa información para tratar de encontrar correlaciones propias entre CBR y deflectometría se considera de la mayor utilidad para la ingeniería de pavimentos en el país.

Basados en la *Guía MEPDG* (NCHRP, 2004), se tienen tres métodos claves para obtener el MR de la subrasante:

- Pruebas de módulo de resiliencia a carga repetida en laboratorio.
- Análisis o retrocálculo mediante deflectómetro de impacto (FWD).
- Correlaciones con otras propiedades físicas de los materiales.

Hoy en día, las pruebas de FWD son un método de evaluación de pavimento de rutina, y los resultados de las pruebas desempeñan un papel integral en la determinación de las propiedades estructurales de las capas *in situ* (FHWA, 2017). Basados en lo indicado en MEPDG, existe la necesidad apremiante de hacer una revisión exhaustiva del estado actual de la técnica y el estado de la práctica de pruebas de FWD, retrocálculo e interpretación, para proporcionar así una guía de mejores prácticas sobre cómo evaluar de manera efectiva estructuras de pavimento existentes y llevar a cabo un análisis mecanicista en el proceso de evaluación y rehabilitación de pavimentos (FHWA, 2017). Además, estos métodos se han sistematizado en gran medida y se pueden realizar en forma rápida y económica.

Con este trabajo de investigación se busca contribuir al análisis de resultados de ensayos *in situ* y ensayos de laboratorio, así como determinar una correlación para caracterizar los materiales de subrasante, fundados en datos medidos en proyectos viales en Colombia.

## MODELOS DE PREDICCIÓN DISPONIBLES ENTRE EL CBR Y FWD

Tres modelos basados en la deflexión son comúnmente utilizados en Australia (Chai et al., 2013). Estos modelos los desarrollaron Jameson (1993), Roberts et al. (2006) y el Departamento de Transporte y Carreteras Principales de Queensland (Queensland Department of Main Roads, QDMR, 1992). Jameson creó la siguiente relación para predecir el CBR de la subrasante a partir

del análisis de una amplia gama de pavimentos viales en Hong Kong.

$$\text{CBR}_{\text{Subgrade}} = 1836(D_{900})^{-1,018} \quad (1)$$

Donde:

$D_0$ : deflexión a 700 kPa (micrones).

CBR: capacidad de soporte de la subrasante (%).

$D_{900}$ : deflexión a 900 mm desde el centro de la placa de carga (micrones).

A su vez, Roberts et al. (2006) demostraron que la resistencia del material de la capa de subrasante de un pavimento está relacionada con el comportamiento de las franjas exteriores del cuenco de deflexión, en gran medida independiente de la forma de la parte interna del cuenco. Los datos de deflexión estructural se obtuvieron de pruebas de FWD a 700 kPa como carga de impacto. La relación se muestra en la siguiente ecuación:

$$\text{CBR}_{\text{Subgrade}} = 850(D_{900})^{-1} \quad (2)$$

Donde:

$D_0$ : deflexión a 700 kPa (micrones).

CBR: capacidad de soporte de la subrasante (%).

$D_{900}$ : deflexión a 900 mm desde el centro de la placa de carga (micrones).

El tercer modelo basado en la desviación se desarrolló en el QDMR. La respuesta de la subrasante se refleja en  $D_{900}$  y es relativamente independiente de la estructura del pavimento subyacente. Para pavimentos no ligados, asfalto grueso o capas rígidas, se ha encontrado que la deflexión  $D_{900}$  refleja una respuesta de la subrasante que, esencialmente, no se ve afectada por la estructura del pavimento subyacente y que se utilizó para estimar el CBR de subrasante al momento de la prueba (QDMR, 1992). Esta relación se muestra en la siguiente ecuación:

$$\text{CBR}_{\text{Subgrade}} = 0,5996(D_{900})^{-1,4543} \quad (3)$$

Donde:

CBR: capacidad de soporte de la subrasante (%).

$D_{900}$ : deflexión a 900 mm desde el centro de la placa de carga (mm).

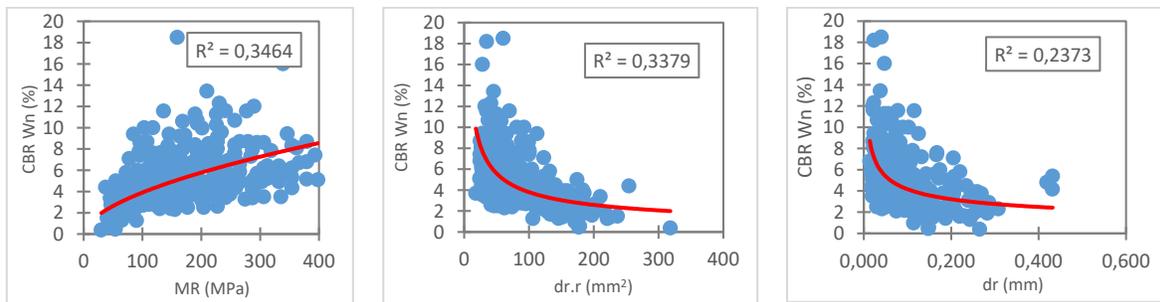
**BASE DE DATOS**

La base de datos estudiada contempla 501 puntos, en los que se tienen datos de FWD y ensayos de laboratorio producto de exploraciones geotécnicas. Dicha base está compuesta por 338 datos para suelos finos (CBR muestras inalteradas, humedad natural), 80 datos para suelos arenosos (37 CBR muestras inalteradas, humedad natural, y 43 CBR muestras compactadas en laboratorio, en inmersión) y 83 para los tipo grava (CBR muestras compactadas en laboratorio, en inmersión), correspondiente a proyectos viales ejecutados en Colombia entre los años 2010 y 2019.

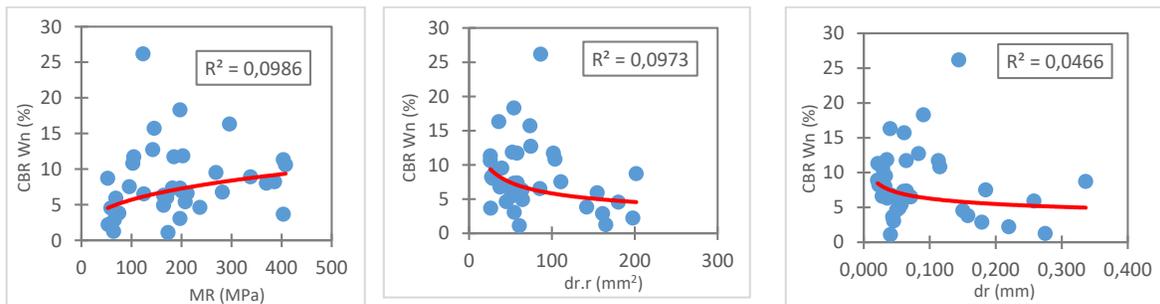
**DESARROLLO DEL MODELO PROPUESTO**

Lo primero fue evaluar la relación entre el CBR y los resultados obtenidos del estudio de deflectometría, los módulos logrados por la metodología AASHTO-93 (MR, MPa), deflexión ( $dr$ , mm) y distancia del sensor de la deflexión empleada ( $r$ , mm).

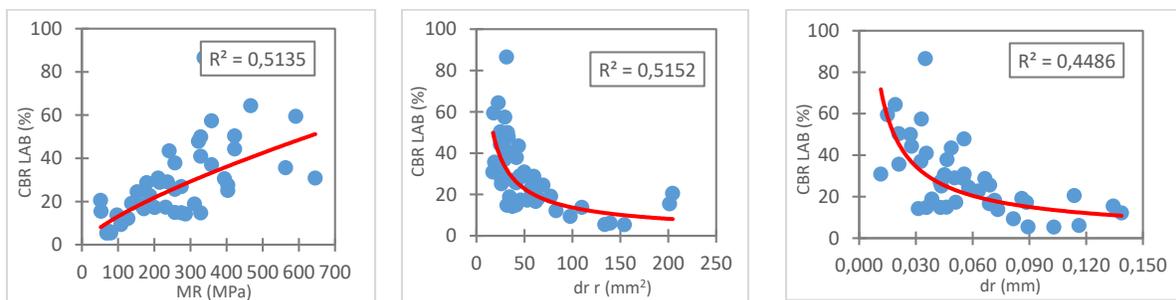
De acuerdo con los resultados del análisis de tendencia entre las relaciones del CBR y el MR, deflexión ( $dr$ ) y ubicación del sensor empleado ( $r$ ) (figuras 1 a 4), se observa que existe una gran dispersión (excepto para los suelos arenosos y para el CBR de muestras compactadas en laboratorio), donde se tiene una correlación aceptable



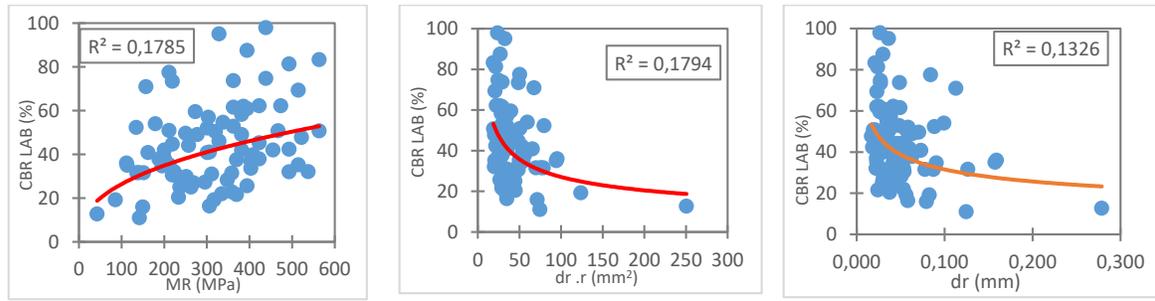
**Figura 1.** Gráfica de dispersión CBR M.inalterada humedad natural vs. MR,  $dr \times r$  y  $dr$ , suelos finos.



**Figura 2.** Gráfica de dispersión CBR M.inalterada humedad natural vs. MR,  $dr \times r$  y  $dr$ , suelos arenosos.



**Figura 3.** Gráfica de dispersión CBR M.compactada en laboratorio, inmersión vs. MR,  $dr \times r$  y  $dr$ , suelos arenosos.



**Figura 4.** Gráfica de dispersión CBR M.compactada en laboratorio, inmersión vs. MR,  $dr \times r$  y  $dr$ , suelos tipo grava.

evaluada a partir del  $R^2$ , la cual puede disminuir si se involucra otra variable del comportamiento del suelo.

De las regresiones simples, de tipo potencial, se obtienen correlaciones pobres y muy pobres, evaluadas a partir del coeficiente de determinación ( $R^2$  menor que 0,40), excepto para los suelos arenosos y para la relación con el CBR compactado en laboratorio.

Por tanto, se hace un análisis de varianza (*Analysis of Variance*, Anova), el cual prueba la hipótesis de que las medias de dos o más variables son iguales. La hipótesis nula establece que todas las medias de las variables son iguales, mientras que la hipótesis alternativa establece que al menos una es diferente.

Para determinar si alguna de las diferencias entre las medias es estadísticamente significativa, se compara el valor  $p$  con el nivel de significancia para evaluar la hipótesis nula. Por lo general, un nivel de significancia (denotado como  $\alpha$  o alfa) de 0,05 funciona adecuadamente. Un nivel de significancia de 0,05 indica un riesgo de 5 %, lo que permite concluir que existe una diferencia cuando no hay una diferencia real.

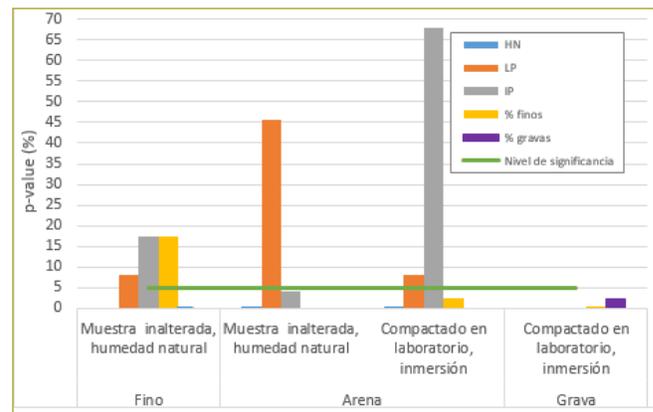
**Valor  $p \leq \alpha$ :** Las diferencias entre algunas de las medias son estadísticamente significativas.

Si el valor  $p$  es inferior o igual al nivel de significancia, se rechaza la hipótesis nula y se concluye que no todas las medias de población son iguales.

**Valor  $p > \alpha$ :** Las diferencias entre las medias no son estadísticamente significativas. Si el valor  $p$  es mayor que el nivel de significancia, no se cuenta con suficiente evidencia para rechazar la hipótesis de que las medias de población son todas iguales.

En consecuencia, con ayuda de la herramienta estadística Rstudio y el análisis Anova, se analizan algunas de las propiedades del suelo en relación con el CBR para cada tipo de suelo.

A continuación, los resultados obtenidos:



**Figura 5.** Gráfica de valores  $p$  vs. nivel de significancia. Análisis Anova.

Como se puede observar (figura 5), la variable HN tiene un nivel de significancia alta frente a los valores de CBR para los suelos finos y arenas; para los suelos tipo grava, las variables % finos y % gravas evaluadas tienen gran significancia frente a los valores de CBR. Por el contrario, en las variables LL e IP los valores de  $p$  son bastante altos, muy por encima del valor de significancia adoptado de 5 %, según las hipótesis planteadas.

Los resultados del análisis Anova permiten indicar que las variables que tienen mayor influencia adicional a los datos de deflectometría en el análisis del CBR son la humedad natural y el porcentaje de finos del suelo.

## ANÁLISIS ESTADÍSTICOS PARA LA DETERMINACIÓN DE CORRELACIONES ENTRE CBR Y FWD

Con el fin de mejorar las correlaciones simples presentadas, se aplica un modelo lineal generalizado (MLG) para caracterizar el valor del CBR a partir de mediciones de deflectometría y posibles parámetros índice de suelo, utilizando un enfoque estadístico. Este modelo de regresión está dado por la siguiente función:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon \tag{4}$$

$$\frac{1}{f(y)} = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon \tag{5}$$

Donde:

$\beta_0$ : ordenada al origen.

$\beta_1$ : pendiente.

$\varepsilon$ : componente aleatorio de error.

$x$ : variable independiente o predictora.

$y$ : variable dependiente o de respuesta.

Específicamente para esta investigación, se empleó el paquete estadístico R y RStudio, que es un *software* de libre uso y distribución bajo licencia pública general de GNU, para programar análisis estadístico y gráfico. R lo crearon en 1993 Robert Gentleman y Ross Ihaka, del Departamento de Estadística de la Universidad de Auckland (Nueva Zelanda), y desde 1997 se desarrolla con aportes de diversas partes del mundo y la coordinación del equipo principal de desarrollo de R (R Core Team Development) (R Project). De los modelos que se van a proponer, se hace el siguiente análisis:

- Examinar análisis de diagramas de dispersión entre la variable dependiente y las variables independientes para hallar posibles correlaciones lineales. La importancia de las correlaciones lineales entre dos de las variables se mide utilizando el coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ).
- Detectar cualquier multicolinealidad (posibles correlaciones entre variables independientes).
- Identificar problemas de heterocedasticidad (varianza de error desigual).

La prueba  $t$  se utilizó para examinar la importancia de cada una de las variables independientes empleadas en el modelo. Un valor  $p$  inferior a 0,05 indica que, a un nivel de confianza del 95 %, la variable independiente es significativa para explicar la variación de la variable dependiente. Adicionalmente, se validaron los modelos a partir del análisis de residuales y residuales en función de valores ajustados.

A renglón seguido se muestran los resultados del análisis de regresión para los suelos finos, arenosos y tipo gravas, correlacionando el CBR (tablas 1 a 3):

**Tabla 1**  
Resultados del análisis del modelo, suelos finos CBR muestra inalterada, humedad natural (CBR Wn)

Modelo	Variable	Coeficientes	Error estándar	Valor $t$	Pr ( $>  t $ )	rsq ( $R^2$ )	Normalidad de residuos			Autocorrelación de los residuos	
							Shapiro-Wilk	Kolmogorov-Smirnov	Observación	Durbin-Watson	Observación
							Valor $p$			Valor $p$	
1	Intercepto	0,1186	0,006073	19,53	< 2e-16	0,41	0,4264	0,7258	Los datos siguen una distribución normal	0,666	Los datos de la muestra son independientes.
	$dr \times r \times HN$	0,00004087	0,000003442	11,87	< 2e-16						
	$\frac{1}{f(x)} = 0,1186 + 0,00004087 dr * r * HN$ $CBR_{Wn} = \frac{1}{0,1186 + 0,00004087 * dr * r * HN}$										
Donde: CBR Wn: capacidad de soporte de la subrasante (%), muestra inalterada en condiciones de humedad natural. dr: deflexión medida a la distancia $r$ (mm). r: distancia del sensor $r$ (mm). HN: humedad natural (%).											
2	Intercepto	0,1327	0,008848	16,003	< 2e-16	0,47	0,1034	0,2937	Los datos siguen una distribución normal	0,542	Los datos de la muestra son independientes.
	$dr \times r \times HN$	0,0000413	0,000003692	11,185	< 2e-16						
	wPI	-0,000669	0,0004194	-1,596	0,111						
$\frac{1}{f(x)} = 0,1327 + 0,0000413 * dr * r * HN - 0,00043194 wPI$ $CBR_{Wn} = \frac{1}{0,1327 + 0,0000413 * dr * r * HN - 0,00043194 wPI}$											
Donde: CBR Wn: capacidad de soporte de la subrasante (%), muestra inalterada en condiciones de humedad natural. dr: deflexión medida a la distancia $r$ (mm). r: distancia del sensor $r$ (mm). HN: humedad natural (%). w: % que pasa el tamiz (0,075 mm). PI: índice de plasticidad (%).											

**Tabla 2**  
Resultados del análisis del modelo, suelos arenosos CBR muestra compactada en laboratorio (CBR Lab)

Modelo	Variable	Coeficientes	Error estándar	Valor t	Pr (>  t )	rsq (R <sup>2</sup> )	Normalidad de residuos			Autocorrelación de los residuos	
							Shapiro-Wilk	Kolmogorov-Smirnov	Observación	Durbin-Watson	Observación
							Valor p			Valor p	
1	Intercepto	0,0125363	0,0048433	2,588	1,33E-02	0,45	0,08384	0,827	Los datos siguen una distribución normal	0,168	Los datos de la muestra son independientes.
	$dr \times r$	0,0005092	0,0001145	4,446	6,53E-05						
$\frac{1}{f(x)} = 0,0125363 + 0,0005092 * dr * r \quad CBR_{LAB} = \frac{1}{0,0125363 * 0,0005092 * dr * r}$ <p>Donde: CBR Lab: capacidad de soporte de la subrasante (%), compactado en laboratorio, inmersión. <math>dr</math>: deflexión medida a la distancia <math>r</math> (mm). <math>r</math>: distancia del sensor <math>r</math> (mm).</p>											
2	Intercepto	0,02064	3,08E-03	6,70	4,33E-08	0,47-	0,5524	0,3874	Los datos siguen una distribución normal	0	Los datos de la muestra no son independientes.
	$dr \times r \times HN$	0,00003704	7,54E-06	4,911	1,49E-05						

**Tabla 3**  
Resultados del análisis del modelo, suelos tipo grava CBR muestra compactada en laboratorio (CBR Lab)

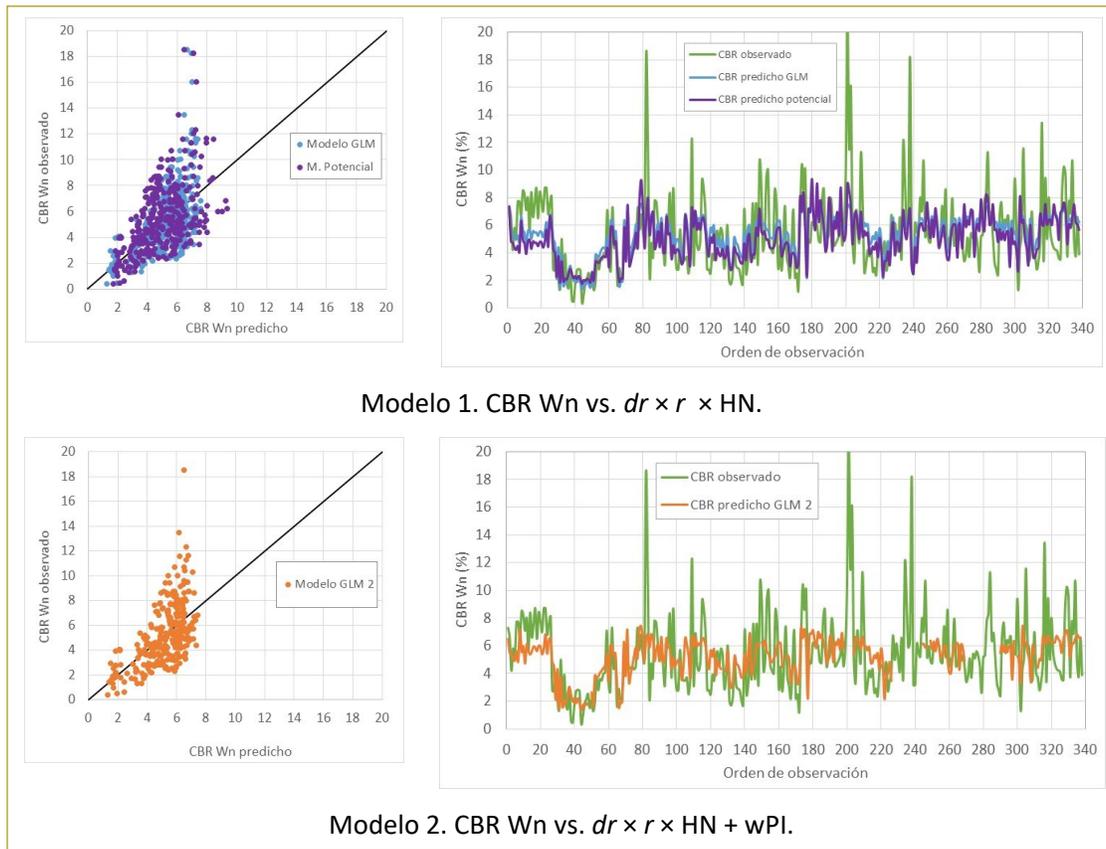
Modelo	Variable	Coeficientes	Error estándar	Valor t	Pr (>  t )	rsq (R <sup>2</sup> )	Normalidad de residuos			Autocorrelación de los residuos	
							Shapiro-Wilk	Kolmogorov-Smirnov	Observación	Durbin-Watson	Observación
							Valor p			Valor p	
1	Intercepto	0,0167611	0,0014827	11,305	2,00E-16	0,23	0,484	0,4464	Los datos siguen una distribución normal	0	Los datos de la muestra
	$dr \times r \times \% \text{ finos}$	0,0009627	0,0002179	4,418	3,06E-05						
$\frac{1}{f(x)} = 0,0167611 + 0,0009627 * dr * r * \% \text{ finos} \quad CBR_{LAB} = \frac{1}{0,0167611 + 0,0009627 * dr * r * \% \text{ finos}}$ <p>Donde: CBR Lab: capacidad de soporte de la subrasante (%), compactado en laboratorio, en inmersión. <math>dr</math>: deflexión medida a la distancia <math>r</math> (mm). <math>r</math>: distancia del sensor <math>r</math> (mm). % finos: porcentaje de finos.</p>											
2	Intercepto	0,0094791	0,0026011	3,644	4,75E-04	0,27	0,4237	0,3764	Los datos siguen una distribución normal	0	Los datos de la muestra son dependientes
	$dr \times r$	0,0001647	0,0000517	3,186	2,06E-03						
	% finos	0,045615	0,0144726	3,152	2,28E-03						
$\frac{1}{f(x)} = 0,0094791 + 0,0001647 * dr * r + 0,0456152 \% \text{ finos} \quad CBR_{LAB} = \frac{1}{0,0094791 + 0,0001647 * dr * r + 0,0456152 \% \text{ finos}}$ <p>Donde: CBR Lab: capacidad de soporte de la subrasante (%), compactado en laboratorio, en inmersión. <math>dr</math>: deflexión medida a la distancia <math>r</math> (mm). <math>r</math>: distancia del sensor <math>r</math> (mm). % finos: porcentaje de finos.</p> <p><b>Basados en la prueba de Durbin, para los dos modelos, se considera que los datos están correlacionados o presentan cierta dependencia, lo que indicaría que la aproximación de los valores predichos no es válida, ya que se incumple la condición de independencia.</b></p>											

### 1. Discusión de resultados

Los siguientes gráficos se generaron para analizar la aproximación de los modelos desarrollados de mejor ajuste, entre los valores observados y los predichos (figuras 6, 7 y 8), según los modelos mostrados en el numeral 5 y lo presentado en el análisis de Anova para las variables de los parámetros del suelo, empleando la deflexión ( $dr$ ) y la distancia del sensor ( $r$ ) que se establecen en la metodología AASHTO-93.

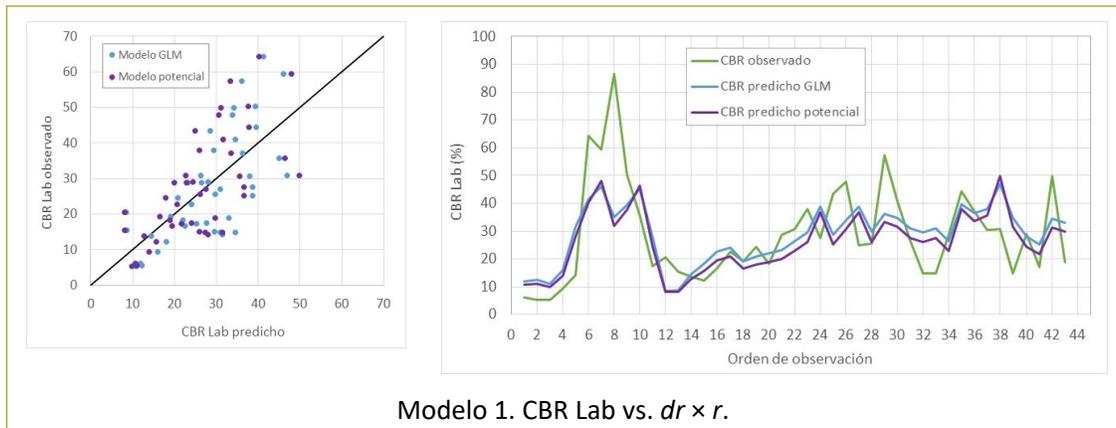
Para el caso de la correlación entre el CBR muestra inalterada en condiciones de humedad natural de los suelos arenosos, todos los modelos analizados tienen una deficiencia en la predicción; por tanto, se descarta plantear una correlación para estas condiciones de CBR en suelos arenosos.

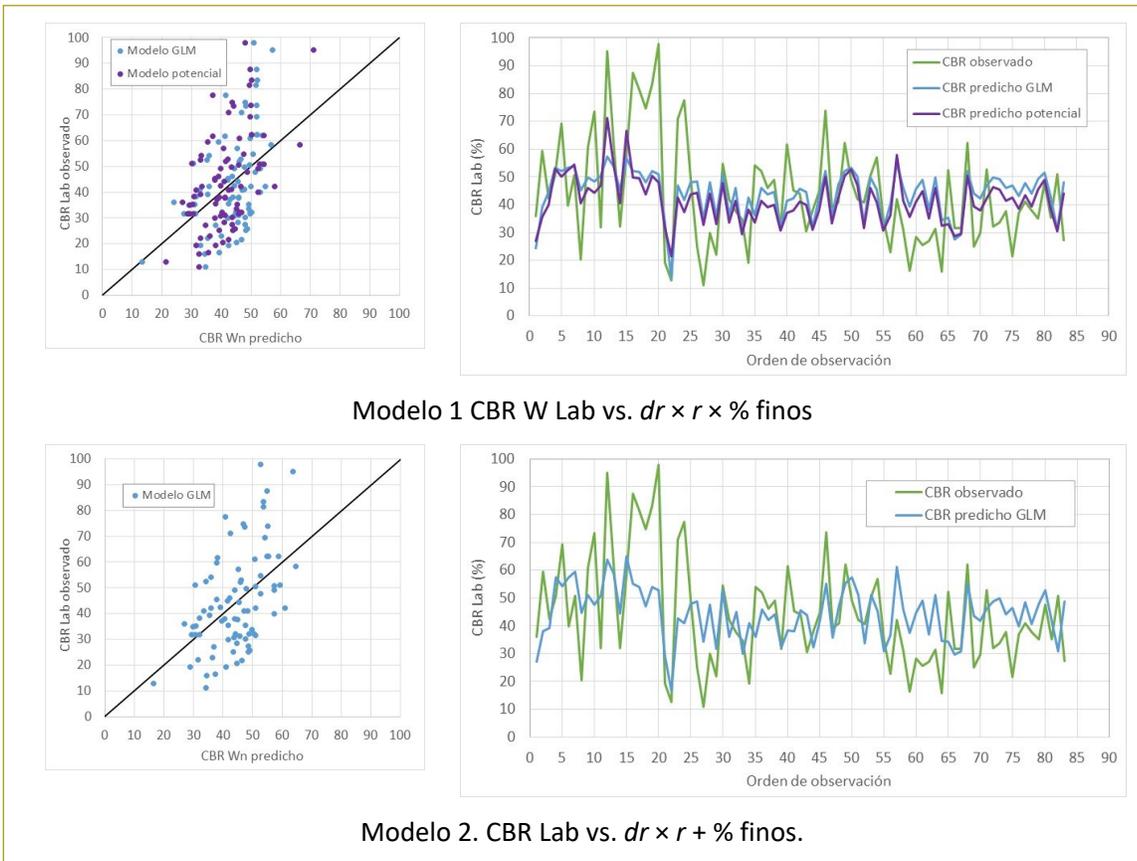
En el caso de los suelos tipo grava, la predicción de los valores del CBR de muestras compactadas en laboratorio presenta cierta dependencia de los residuos, por lo que se debe analizar este efecto en los valores predichos.



**Figura 6.** Comparación entre el valor de CBR Wn observado y el CBR Wn predicho, suelos finos.

**Figura 7.** Comparación entre el valor de CBR LAB observado y el CBR LAB predicho, suelo arenoso.





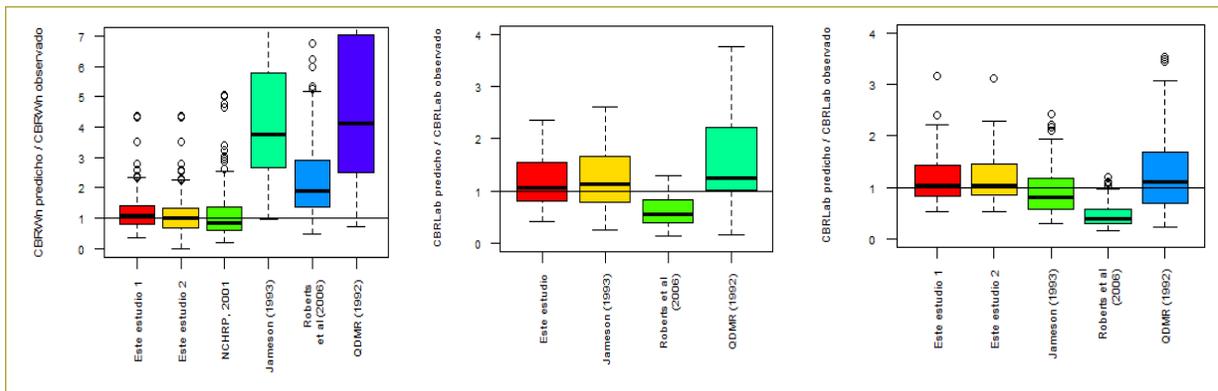
**Figura 8.** Comparación entre el valor de CBR LAB observado y el CBR LAB predicho, suelo tipo grava.

**2. Comparación entre los modelos propuestos y otras correlaciones**

Para hacer la comparación entre los modelos propuestos para cada tipo de suelo y los modelos disponibles de correlación entre FWD, CBR y algunas propiedades del suelo, mencionados anteriormente, se analizó el cociente entre el CBR predicho y el observado. A renglón seguido se ilustran los diagramas

de cajas y bigotes; en el eje Y se presenta el cociente mencionado y en el eje X, los modelos analizados (figura 9).

Este gráfico de cajas y bigotes es bastante útil para visualizar la distribución de los datos obtenidos. Allí se presenta información sobre los cuartiles de la distribución, valores atípicos y valores extremos de la variable evaluada (el CBR, en este caso).



**Figura 9.** Comparativo de modelos propuestos con otras correlaciones, suelos finos, arenosos y gravas.

Para suelos finos, en el modelo de la NCHRP 2001, el cual vincula las variables  $\text{pasa } \# 200$  y el IP, la media de la relación  $\text{CBR}_{\text{Wn}} \text{ predicho} / \text{CBR}_{\text{Wn}} \text{ observado}$  es de 0,85. Para el modelo de Jameson es de 3,76, en Roberts et al. es de 1,90 y en el de QDMR es de 4.1; estos tres modelos correlacionan el CBR con la deflexión  $D_{900}$ . Los resultados de los modelos propuestos en este estudio (1 y 2) presentan las medias más cercanas a 1 (1,07 modelo 1 y 0,98 modelo 2); por consiguiente, entre los modelos comparados, los parámetros calculados con los modelos de este estudio son los que más se acercan a los parámetros observados. El valor 1 en el eje Y representa la igualdad entre el CBR predicho y el observado.

La diferencia de la media con los cuartiles 1 y 3 ( $Q_1$  y  $Q_3$ ) representa la desviación estándar y, a su vez, indica qué tan dispersos están los datos con respecto a la media. En la figura anterior (figura 9) se observa que la desviación estándar de los modelos propuestos 1 y 2 es de 0,34 para ambos casos y la desviación estándar del modelo (NCHRP, 2001) es de 0,52; para el resto de los modelos comparados, la desviación estándar es superior a 0,55. Se puede apreciar que las mayores desviaciones se presentan para valores de CBR mayores.

Para el caso de los suelos arenosos, el modelo propuesto en este estudio correlaciona el CBR compactado en laboratorio; para la relación entre el  $\text{CBRLab predicho} / \text{CBRLab observado}$ , la media del modelo de Jameson es de 1,12, la de Roberts et al. de 0,55 y la de QDMR de 1,24, que correlacionan el CBR con la deflexión  $D_{900}$ . Los resultados del modelo propuesto en este estudio presentan la media más cercana a 1 (1,06); por tanto, entre los modelos comparados, los parámetros calculados con el modelo de este estudio son los que más se acercan a los parámetros registrados, seguido del modelo de Jameson y, por último, los dos restantes.

De acuerdo con lo anterior, en el modelo de Roberts et al. los valores predichos son muy inferiores a los CBR observados; por el contrario, en el modelo de QDMR, la predicción del CBR es mucho mayor que los valores de CBR observados.

Se puede apreciar que la desviación estándar del modelo propuesto es de 0,33 y que la desviación estándar del modelo de Jameson es de 0,53, modelo este último que es el que más se asemeja a los datos de CBR observados de los modelos australianos (figura 9).

Por último, para los suelos tipo grava, al igual que para los demás suelos, los resultados de los modelos propuestos en este estudio (1 y 2) presentan la media más cercana a 1 (1,04 y 1,03 respectivamente); por tanto, entre los modelos comparados, los parámetros calculados con el modelo de este estudio son los que más se acercan a los parámetros observados, seguidos del modelo de QDMR y, por último, los dos restantes.

La desviación estándar de los modelos propuestos 1 y 2 es de 0,40 para ambos casos. La del modelo QDMR es de 0,57, en tanto que para los modelos de Jameson y Roberts et al. son de 0,38 y 0,19, respectivamente; para este último, los valores de CBR predichos son mucho más bajos que los observados.

### 3. Modelos propuestos

A continuación se presentan las ecuaciones que permiten estimar de una mejor manera el valor del CBR de muestras inalteradas en condiciones de humedad natural y compactadas en laboratorio al 95 % de la densidad máxima, en inmersión, con base en el análisis hecho de regresiones, análisis estadístico como el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), coeficiente de correlación ( $r$ ), normalidad de residuos, independencia entre los residuos y homocedasticidad (igualdad de varianzas), de menor importancia que los demás parámetros analizados, por el tipo de regresión empleada, esto es, la regresión lineal generalizada.

#### 3.1 Suelos finos (arcillas y limos), CBR muestra inalterada humedad natural

*Modelo MLG*

$$\text{CBR}_{\text{Wn}} = \frac{1}{0,1186 + 0,000041 * dr * r * \text{HN}} \quad (6)$$

$$R^2 = 0,41, r = 0,64$$

Donde:

$dr$ : deflexión medida a la distancia  $r$  (mm).

$r$ : distancia del sensor  $r$  (mm).

HN: humedad natural (%).

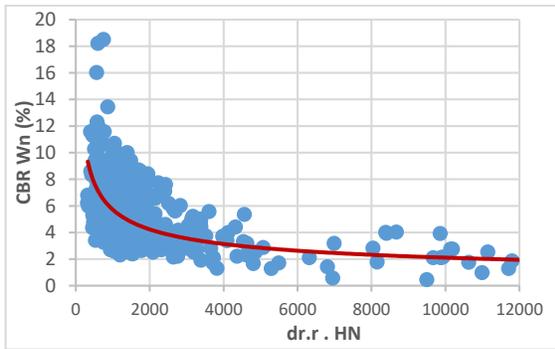


Figura 10. Modelo GLM propuesto, suelos finos.

*Modelo potencial*

$$\text{CBR}_{W_n} = 114,14 \times (\text{dr} \times r \times \text{HN})^{-0,433} \quad (7)$$

$$R^2 = 0,42, r = 0,65$$

Donde:

$dr$ : deflexión medida a la distancia  $r$  (mm).

$r$ : distancia del sensor  $r$  (mm).

HN: humedad natural (%).

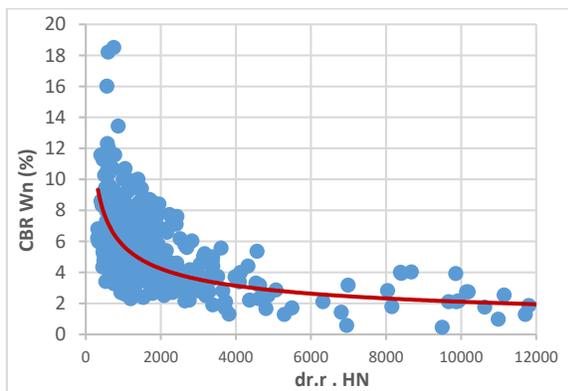


Figura 11. Modelo potencial propuesto, suelos finos.

Al comparar los modelos de tipo potencial, entre CBR vs.  $dr \times r$  y CBR vs.  $dr \times r \times \text{HN}$  (vinculando la variable HN), se logra una mejor correlación evaluada a partir del coeficiente de determinación, pasando de un  $R^2$  de 0,35 a un  $R^2$  de 0,42.

### 3.2 Suelos arenosos, CBR muestras compactadas en laboratorio, inmersión

*Modelo MLG*

$$\text{CBR}_{\text{LAB}} = \frac{1}{0,0125 + 0,00051 \times \text{dr} \times r} \quad (8)$$

$$R^2 = 0,52, r = 0,72$$

Donde:

$dr$ : deflexión medida a la distancia  $r$  (mm).

$r$ : distancia del sensor  $r$  (mm).

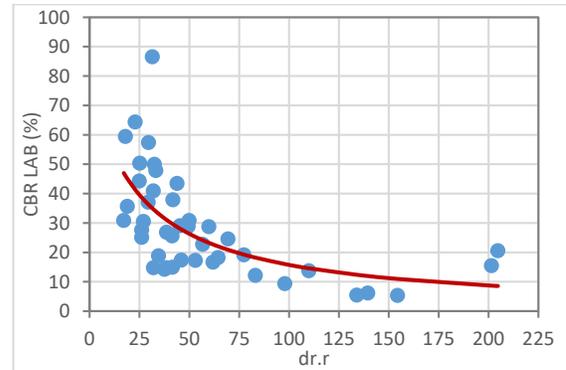


Figura 12. Modelo GLM propuesto, suelos arenosos.

*Modelo potencial*

$$\text{CBR}_{\text{LAB}} = 401,09 \times (\text{dr} \times r)^{-0,733} \quad (9)$$

$$R^2 = 0,52, r = 0,72$$

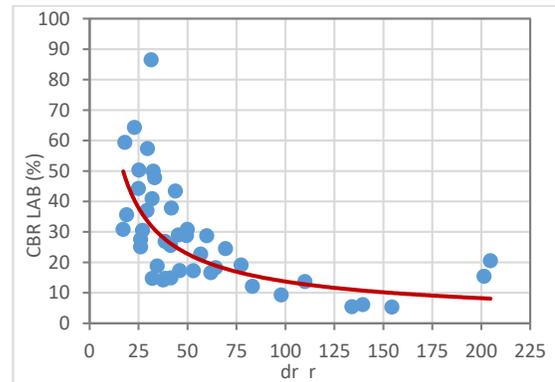


Figura 13. Modelo potencial propuesto, suelos arenosos.

Para los suelos arenosos con CBR de muestras compactadas en laboratorio en inmersión, la mejor correlación se presenta para la relación entre el CBR vs.  $dr \times r$ , con un  $R^2$  de 0,52.

### 3.3 Suelos tipo grava, CBR muestras compactadas en laboratorio, inmersión

*Modelo MLG*

$$\text{CBR}_{\text{LAB}} = \frac{1}{0,0095 + 0,00016 \times \text{dr} \times r + 0,04562 \% \text{ finos}} \quad (10)$$

$$R^2 = 0,27, r = 0,52$$

Donde:

- $dr$ : deflexión medida a la distancia  $r$  (mm).  
 $r$ : distancia del sensor  $r$  (mm).  
 % finos: porcentaje de finos del suelo (mm).

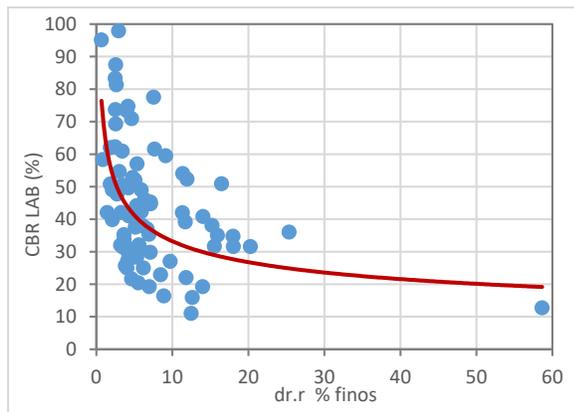
*Modelo potencial*

$$\text{CBR}_{\text{LAB}} = 67,962 \times (\text{dr} \times r \times \% \text{ finos})^{-0,311} \quad (11)$$

$$R^2 = 0,27, r = 0,52$$

Donde:

- $dr$ : deflexión medida a la distancia  $r$  (mm).  
 $r$ : distancia del sensor  $r$  (mm).  
 % finos: porcentaje de finos del suelo (mm).



**Figura 14.** Modelo potencial propuesto, suelos arenosos.

En los suelos tipo grava, la mejor correlación entre CBR y la deflectometría se consigue al vincular la variable % finos, pasando de un  $R^2$  de 0,17 (CBR vs.  $dr \times r$ ) a un  $R^2$  de 0,27 (CBR vs.  $dr \times r \times \% \text{ finos}$ ).

## CONCLUSIONES

En esta investigación se contó con una base de datos de 501 puntos, en la que se tiene información simultánea de deflectometría y CBR de muestras inalteradas y suelos compactados en laboratorio. Del total, 338 datos involucran suelos finos; 80, suelos arenosos, y 83, suelos tipo grava.

En cuanto al análisis del CBR, se agruparon los resultados por tipo de suelo, clasificándolos en suelos finos (arcillas y limos) con CBR de muestra inalterada

y humedad natural, suelos arenosos y suelos tipo grava, con CBR de muestras compactadas en laboratorio al 95 % de la densidad máxima, en inmersión.

Con la información disponible de los ensayos de laboratorio, se elaboraron gráficas de dispersión entre el CBR y las propiedades relacionadas con la gradación y límites de consistencia, con la finalidad de poder hacer un análisis dimensional para los parámetros de mayor incidencia. Como resultado de esto, se obtiene que la relación del CBR con los parámetros físicos, como LL, LP, IP, % gravas, % arenas y % finos, no es de tipo lineal, y presenta una gran dispersión en la nube de puntos analizados, lo que indica que, por sí solos, no tienen una correlación significativa con el CBR y se pueden requerir análisis multivariantes o correlaciones múltiples para llegar a una buena correlación (Rivera Mena, 2013; Araújo Navarro, 2014).

Se analizaron las ecuaciones disponibles para estimar el CBR a partir de las deflexiones medidas a diferentes distancias del centro de aplicación de la carga. Para los suelos tipo arena y grava, una de las tres ecuaciones presentadas tiene mejor correlación con la base de datos: para los suelos arenosos, la ecuación 1 (Jameson); para los suelos tipo grava, la ecuación 3 (QDMR); para el caso de los suelos finos, ninguna de las ecuaciones se ajusta a la base de datos. Todas estas ecuaciones se correlacionan entre el CBR y la deflexión a 900 mm del centro de aplicación de carga.

Las correlaciones directas obtenidas entre valores de deflexión y CBR son pobres, según el coeficiente de determinación ( $R^2$ ); por tanto, se buscó mejorar las correlaciones (disminuir la dispersión) introduciendo otros parámetros del suelo en éstas, analizadas a partir del Anova y correlaciones. Se encontró que la humedad natural y el porcentaje de finos mejoran los indicadores estadísticos de correlación; sin embargo, para efectos prácticos, la dispersión de datos no disminuyó significativamente.

Se plantean los modelos determinados con los parámetros  $dr$  y  $r$  establecidos por la metodología AASHTO-93, debido a que en los modelos estudiados con los parámetros del método directo ( $dr$  y  $r_{50}$ ) para las arenas y gravas, los resultados de análisis estadístico indican resultados deficientes, estudiados a partir del  $R^2$  y el análisis de dependencia de los residuos.

Se hallaron las correlaciones para obtener el CBR de muestra inalterada en humedad natural de suelos

finos a partir de la deflexión ubicada al sensor a la distancia ( $r$ ), distancia ( $r$ ) y humedad natural, obteniendo un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) igual a 0,42 y coeficiente de correlación de 0,65. Para el CBR de muestras compactadas en laboratorio en inmersión de suelos arenosos, se correlacionó con las variables de la deflexión ( $dr$ ) y distancias del sensor ( $r$ ), alcanzando un  $R^2$  de 0,52 y coeficiente de correlación ( $r$ ) de 0,72. Por último, para los suelos tipo grava se correlacionó el CBR de muestras compactadas en laboratorio en inmersión con la deflexión ( $dr$ ) y porcentaje de finos de suelo.

Los resultados obtenidos de las correlaciones recomendadas en la presente investigación pueden llegar a ser muy útiles para el ingeniero de pavimentos, tanto en el diseño de pavimentos nuevos como en estudios de rehabilitación de pavimentos existentes, debido a que los análisis estadísticos muestran que hay una fuerte relación entre el CBR y los resultados de las evaluaciones deflectométricas (módulos, deflexiones); aunque la dispersión obtenida es alta, la variabilidad conseguida está dentro de la variación reportada en otras correlaciones, como la de la Shell, Uzan, NCHRP y Heukelom.

Se considera de gran importancia poder estudiar correlaciones de ensayos de módulos triaxiales con valores de CBR a condiciones típicas de los proyectos viales que se realizan en Colombia, para diferentes tipos de suelos, así como también comprobar la validez de las fórmulas de correlación que tradicionalmente se emplean en los diseños de pavimento nuevo y estudios de rehabilitación de pavimentos existentes.

Finalmente, dada la dispersión de valores en las correlaciones obtenidas, se requiere fortalecer los trabajos de medición directa de los módulos resilientes de la subrasante, por deflectometría en pavimentos existentes y mediante ensayos de laboratorio en el caso de pavi-

mentos nuevos, al igual que promover la investigación en el país de relaciones entre módulos resilientes de laboratorio y módulos resilientes de deflectometría.

Vale la pena anotar que el trabajo de investigación se ha desarrollado con una amplia base de datos, de muchos tipos de suelos y muchas condiciones. Por eso la dispersión de las correlaciones puede ser mayor que la reportada por otros autores.

## REFERENCIAS

- AASHTO (1993). *AASHTO Guide for design of pavement structures 1993*. Washington, D.C.
- Araújo Navarro, W. (2014). *Ecuaciones de correlación del CBR con propiedades índice de suelos para la ciudad de Piura*.
- Chai, G. W., Argadiba, S., Stephenson, G., Condric, I., Oh, E. Y., & Manoharan, S. P. (2013). Prediction of subgrade CBR using FWD for thin bituminous pavements. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 6(4), 280-286. [https://doi.org/10.6135/ijprt.org.tw/2013.6\(4\).280](https://doi.org/10.6135/ijprt.org.tw/2013.6(4).280).
- FHWA (2017). *Using falling weight deflectometer data with mechanistic-Empirical design and analysis* (March 2017). NO. FHWA-HRT-16-010.
- Heukelom, W., & Klomp, A. J. G. (1962). *Dynamic testing as a means of controlling pavements during and after construction*. NCHRP (2001). *Guide for mechanistic-Empirical design correlation of CBR values with soil index* (March).
- NCHRP (2004). *Guide for mechanistic - Empirical design of new and rehabilitated pavement structures* (March, 2004). Illinois: ARA, Inc., ERES Consultants Division 505 West University Avenue. Champaign, Illinois, 61820.
- Rivera Mena, W. A. (2013). *Correlación del valor de soporte de California (CBR) con la resistencia a la compresión confinada y la plasticidad del suelo*.
- Rondón, H., & Reyes, F. (2007). Metodologías de diseño de pavimentos flexibles: tendencias, alcances y limitaciones (Design methodologies of flexible pavements: tendencies, reaches and limitations). *Design*, 17, 41-65.
- Shell International Petroleum Company (1978). *Shell pavement design manual* (1978th ed.). Londres.
- Uzan, J. (1985). Characterization of granular material. *Transp. Res. Rec.* 1022 (1), 52-59.



# Caracterización de la variabilidad espacial de la resistencia al corte no drenada del depósito lacustre A, ubicado en la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Characterization of the spatial variability of the undrained shear strength of the lacustrine deposit A, located in the Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

LINA ASTRID DÍAZ MÉNDEZ<sup>1</sup> - ÁLVARO MANRIQUE MUÑOZ<sup>2</sup> -  
LINA XIMENA GARZÓN ÁVILA<sup>3</sup>

1. Ingeniera civil, magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Geotecnia, de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

2. Ingeniero civil, magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Geotecnia, de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

3. Doctora en Ingeniería de la Universidad de los Andes, profesora del Centro de Estudios Geotécnicos.

lina.diaz@mail.escuelaing.edu.co - alvaro.manrique@mail.escuelaing.edu.co - lina.garzon@escuelaing.edu.co

Recibido: 17/04/2020 Aceptado: 03/05/2020

Disponible en [http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones\\_revista](http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista)

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

## Resumen

La presente investigación se basa en la incorporación de la teoría de los campos aleatorios, con el objeto de caracterizar la variabilidad espacial mediante el cálculo de los valores de la media, la varianza y la escala de fluctuación. Se realiza el estudio para valores de la resistencia al corte no drenada ( $C_u$ ), tomando información registrada en CPT a profundidades de 42,5 m, 30,92 m y 20,66 m, respectivamente, en el depósito lacustre A, localizado en la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Se encontró que el depósito presenta valores de media de 32,76 KPa, desviación estándar de 15,58 KPa y escalas de fluctuación de hasta 67,32 mm.

**Palabras claves:** escala de fluctuación, media, varianza, función de autocorrelación.

## Abstract

This paper presents the incorporation of the random fields theory to characterize the spatial variability using values of the standard deviation and the scale of fluctuation, the study was carried for values of the undrained shear strength ( $C_u$ ) taking information from CPT's at depths of 42.5 m, 30.92 m and 20.66 m, respectively, in lacustrine deposit A, located at Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. The deposit was found to have mean values of up to 32.76 KPa, standard deviation 15.58 KPa and fluctuation scales of up to 67.32 mm.

**Keywords:** fluctuation scale, mean, variance, autocorrelation function.

## INTRODUCCIÓN

La incertidumbre en geotecnia, derivada por la variabilidad espacial de las propiedades del suelo, es uno de los principales problemas a los que se enfrenta el ingeniero a la hora de diseñar estructuras. La investigación de la caracterización de los depósitos de suelo mediante el empleo de enfoques determinísticos subestima esta incertidumbre. Vanmarcker, en las primeras aproximaciones hechas en este campo, se analizó la variabilidad del suelo y se incorporó la estadística espaciotemporal a los análisis geotécnicos [1].

Una manera de abordar el efecto de la variabilidad espacial del suelo es mediante el uso de la metodología de campos aleatorios, la cual consiste en un conjunto de valores asociados a un espacio unidimensional o multidimensional [2]. Se dice que los valores en un campo aleatorio por lo general están correlacionados espacialmente si los valores adyacentes de la variable no difieren tanto, como los valores que se encuentran más separados [3].

De acuerdo con diferentes estudios [4], las propiedades físicas y mecánicas pueden verse influenciadas por la variabilidad espacial, incluso en estratos con estructura aparentemente homogénea, afectando entre otras la estabilidad de un talud y la capacidad portante de una cimentación.

En Colombia, específicamente en geotecnia, son pocos los estudios en los que se aborda la variabilidad espacial de la resistencia al corte no drenado, medida por su escala de fluctuación; sin embargo, existen estudios que modelan físicamente la incertidumbre [5]. En agronomía, geología y minería, se aborda la variabilidad utilizando herramientas geoestadísticas para determinar la calidad de los suelos (fertilidad) y las reservas de yacimientos. Teniendo en cuenta lo anterior, cobra especial atención contar con una caracterización para un depósito como el lacustre A, el cual puede presentar espesores de hasta 600 metros.

Validar la escala de fluctuación para un parámetro de resistencia en un depósito como el lacustre A de la sabana de Bogotá es, de por sí, toda una incógnita. Los estudios efectuados en Australia [6] y Missouri [7] tratan con espesores de depósitos que no superan los 5 m. Cobra importancia, entonces, desarrollar una investigación de este tipo, ya que en primer lugar se tienen pocos antecedentes en Colombia, y en segundo término, esto permitirá conocer cuál o cuáles pueden

ser las distancias de correlación y escalas de fluctuación para el depósito lacustre A.

En los resultados de la presente investigación se encontró que la escala de fluctuación para la resistencia al corte no drenado ( $C_u$ ) alcanza valores de hasta 67,32 mm, a su vez los rangos de valor medio oscilan entre 16 KPa y 51 KPa, y una desviación estándar de ???

En el presente estudio se estimó la variabilidad espacial de la resistencia al corte no drenado ( $C_u$ ) del depósito lacustre A, localizado en la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, haciendo uso de la teoría de campos aleatorios, y determinando la media, varianza y escala de fluctuación en los CPT disponibles, con el propósito de que en el futuro se incorpore esta metodología en los diseños basados en confiabilidad.

## TEORÍA DE CAMPOS ALEATORIOS PARA CARACTERIZAR LA VARIABILIDAD ESPACIAL

Un campo aleatorio se puede describir por su media, su varianza y la escala de fluctuación ( $\delta$ ), siendo esta última la distancia sobre la cual la variable en estudio presenta una fuerte correlación [8].

Si bien la media y la desviación estándar de los parámetros se determinan fácilmente, la escala de fluctuación requiere un perfil bien definido de suelo y herramientas estadísticas complejas, como las series tiempo y estructuras de correlación espacial para su estimación.

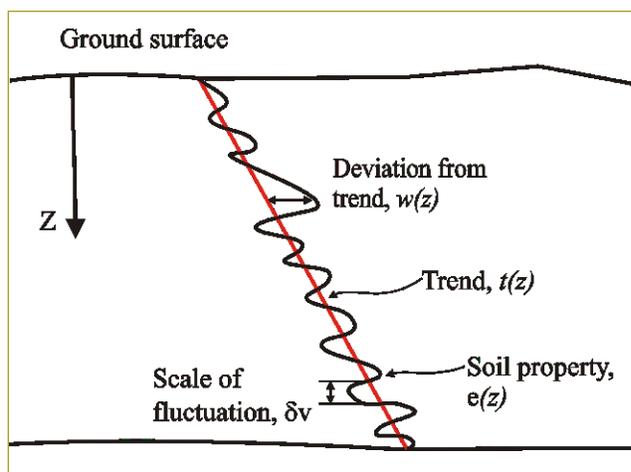


Figura 1. Variabilidad inherente del suelo [8].

En la figura anterior (figura 1) se puede observar un perfil típico de suelo que es espacialmente variable, el cual exhibe un componente de tendencia, un com-

ponente fluctuante y una escala vertical de fluctuación. Pequeños valores de la escala de fluctuación implican variaciones rápidas sobre la media, mientras que los valores grandes sugieren una propiedad que varía lentamente con respecto al promedio [1].

### Función de autocorrelación

La función de autocorrelación (ACF, por su sigla en inglés) ha sido la herramienta más utilizada para determinar la caracterización de la variabilidad espacial de los parámetros geotécnicos, y en la mayoría de los casos se empleó para datos a intervalos cercanos, regulares y fijos, por lo cual son válidos los obtenidos con CPTu [7].

El cálculo de funciones de autocorrelación puede tener diferentes enfoques e intereses, que dependen entre otras del grado de sesgo, la variabilidad del muestreo y la facilidad de uso y aplicación. Los métodos más comunes para su caracterización consisten en el método de los momentos, el método del enfoque de Bartlett, el método basado en el principio de máxima verosimilitud, la geoestadística, etc. No obstante, el método de momentos es el más común para estimar la función de correlación de la muestra de las propiedades del suelo [1].

Una forma clásica de describir funciones aleatorias a través de la función de autocorrelación es el coeficiente de correlación  $\rho(\Delta z)$ , en el que se establece la relación de los valores de una función aleatoria en la separación al rezago ( $k$ ).

$$x = z + e \quad (1)$$

Donde  $x$  es la medida en una ubicación dada,  $z$  es el componente de tendencia y  $e$  es el residual (desviación sobre la tendencia). Los residuos de la tendencia tienden a exhibir correlación espacial. El grado de correlación espacial entre los residuos puede expresarse a través de una función de autocovarianza [1].

$$C(k) = E[P(z_i) - t(z_i)] [P(z_j) - t(z_j)] \quad (2)$$

Donde ( $k$ ) es el vector de separación de la distancia  $i-j$ , ( $E$ ) es la esperanza,  $P(z_j)$  es el dato en la posición  $i$ , ( $t(z_j)$ ) es el valor de la tendencia en la posición ( $j$ ). La forma normalizada de la función de autocovarianza está dada por la función de autocorrelación.

$$\rho(k) = \frac{c(k)}{c(0)} \quad (3)$$

Donde  $c(0)$  es la función de autocovarianza a una distancia de separación cero, que no es más que los datos de la varianza.

No es posible evaluar ( $c(k)$ ) ni ( $\rho(k)$ ) con certeza, y solamente se pueden estimar para muestras obtenidas de una población significativa. Como resultado de lo anterior se evalúa la autocovarianza de la muestra en el rezago  $k$ , ( $c(k)$ ), y la autocorrelación de la muestra en el rezago  $k$  ( $r(k)$ ). La función de autocorrelación (ACF) es la gráfica de ( $r(k)$ ), para los  $k = 0, 1, 2, \dots, n$  rezagos, donde  $n$  es el número máximo de rezagos permitidos [6]. En general,  $n$  se toma como un cuarto del número total de puntos de datos en el análisis de series temporales en geotecnia [1]; más allá de este número de rezagos, los resultados son poco confiables.

La función de autocorrelación en el rezago  $k$  se evalúa con la siguiente expresión:

$$r_k = \frac{\frac{1}{(N-k-1)} \sum_{i=1}^{N-k} (X_i - \bar{X})(X_{i+k} - \bar{X})}{\frac{1}{(N-1)} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2} \quad (5)$$

Si no hay errores de medición o ruido en la función,  $r$  se vuelve igual a 1 a una distancia de cero rezagos [1]. Las funciones de autocorrelación se evalúan para datos estadísticamente homogéneos. Las características de autocorrelación para cualquiera que sea la propiedad investigada del suelo pueden analizarse con la distancia de autocorrelación o la escala de fluctuación, que es, teóricamente, igual al área bajo la función de correlación. La escala de fluctuación (o radio de correlación) para un campo aleatorio unidimensional se define por la ecuación [1]:

$$\delta = \int_0^{\infty} \rho(\tau) d\tau \quad (6)$$

En el análisis de series de tiempo, la técnica más utilizada para determinar la distancia de correlación se conoce como el límite de Bartlett (Lb), y que corresponde a dos errores estándar de las estimaciones [7], es decir, la distancia de rezago a la que los límites positivos de Bartlett superpuestos en el gráfico de la función de autocorrelación (ACF) cruzan la función [6].

$$Lb = \frac{1,96}{\sqrt{N}} \quad (4)$$

Donde  $N$  es el número total de datos analizados del tramo analizado.

Como se muestra en otros estudios [7], la escala de fluctuación ( $\delta$ ) se determina a partir de la distancia de autocorrelación medida en la intersección entre el límite de Bartlett con la ACF. Luego, ( $\delta$ ) se estima de acuerdo con el modelo que más se ajuste de la Tabla 1 [7].

**Tabla 1**

Funciones de autocorrelación teóricas usadas para determinar la escala de fluctuación ( $\delta$ ) [7]

Modelo N.º	Función de autocorrelación	Escala de fluctuación $\delta_y$
1	$\rho_{\Delta z} = \begin{cases} 1 - \frac{ \Delta z }{a} & \text{for }  \Delta z  \leq a, \\ 0 & \text{for }  \Delta z  \geq a \end{cases}$	a
2	$\rho_{\Delta z} = e^{- \Delta z /b}$	2b
3	$\rho_{\Delta z} = e^{-( \Delta z /c)^2}$	$\sqrt{\pi}c$
4	$\rho_{\Delta z} = e^{- \Delta z /d} \left( 1 + \frac{ \Delta z }{d} \right)$	4d

A pesar de ser un trabajo netamente espacial, es posible utilizar toda la teoría estadística para campos temporales; se tienen profundidades a una razón constante y en ellas se toma una medición de la variable respuesta; como este proceso solo se mueve en una sola dirección, en este caso la profundidad, es posible hacer un símil viendo la profundidad de las mediciones como medidas de tiempo, es decir, se reemplaza el dominio; esto permite que la variable de estudio sea un proceso estocástico, y facilita la aplicación de toda la teoría temporal a un contexto espacial, esto es, es un proceso complejo en el que se emplean técnicas estadísticas no convencionales en geotecnia.

### Estacionariedad

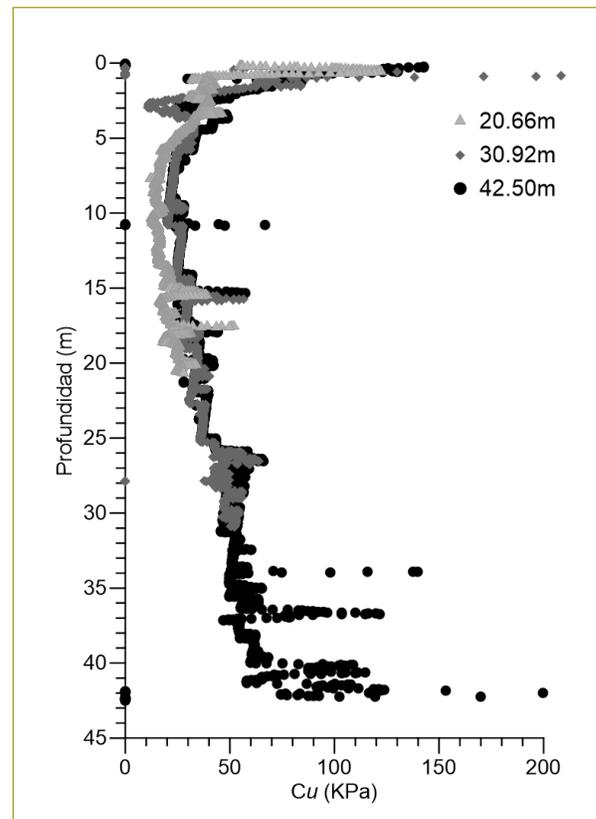
Los métodos comunes para la validación de la homogeneidad estadística se clasifican en pruebas paramétricas y pruebas no paramétricas. Las paramétricas requieren supuestos sobre la distribución de la población estudiada, por lo que deben cumplirse algunas condiciones previas [1]. En las pruebas no paramétricas no se hacen hipótesis sobre la distribución de los datos [9].

Teniendo en cuenta lo anterior, prevalece un enfoque basado en pruebas no paramétricas, puesto que su aplicación no se ve restringida por la distribución; no obstante, cuando no se cumple con los supuestos de las no paramétricas, es posible hacer uso de las paramétricas [3].

En la presente investigación se utilizó como prueba no paramétrica el Kendall test ( $\tau$ ) y, en caso de requerirse, se aplicó la prueba paramétrica Dickey-Fuller; en los dos casos se formuló un código en R para la validación de la homogeneidad estadística.

## RESULTADOS

Se analizaron los tres perfiles de CPT (figura 2). Éstos se discretizaron en sectores que presentaron homogeneidad estadística, se calcularon las funciones de autocorrelación, se estimaron las distancias de autocorrelación, se ajustaron a las funciones de modelo simple exponencial.



**Figura 2.** CPT analizados de profundidades 20,66 m, 30,92 m y 42,5 m.

En el total de los tres (3) CPT se identificaron 19 sectores que se evaluaron con la prueba no paramétrica Kendall test, encontrándose tres sectores que no cumplían (CPT 42,5 m en sectores 2 y 5; CPT 30,92, sector 1). Como alternativa para verificar la estacionariedad de estos tres sectores, se aplicó la prueba paramétrica Dickey - Fuller y se encontró que los dos sectores de CPT 42,5 m cumplían la hipótesis de nulidad de estacionariedad. El sector CPT 30,92 m finalmente no cumplió los requisitos de estacionariedad, por lo cual no se consideró como sector para analizar. Finalmente, son 18 sectores, aptos para continuar el análisis mediante estadística espaciotemporal y posterior estimación de la escala de fluctuación.

A continuación se presentan las funciones de autocorrelación encontradas en los diferentes sectores analizados.

Se presenta el resultado para el CPT 42,5 - sector 1 en la Figura 3 el sector discretizado y en la Figura 4 la función de autocorrelación encontrada .

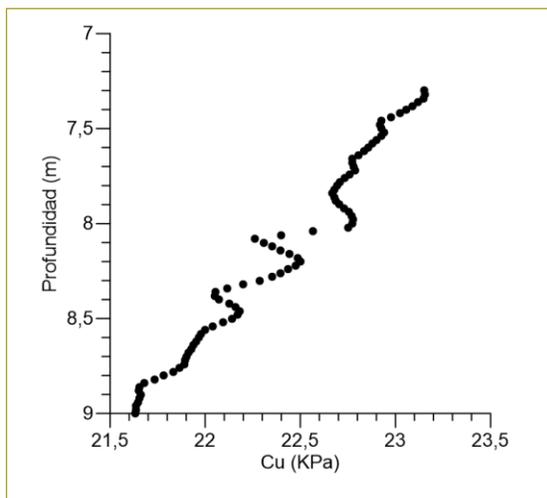


Figura 3. Se presenta CPT, 42,5 m, sector 1.

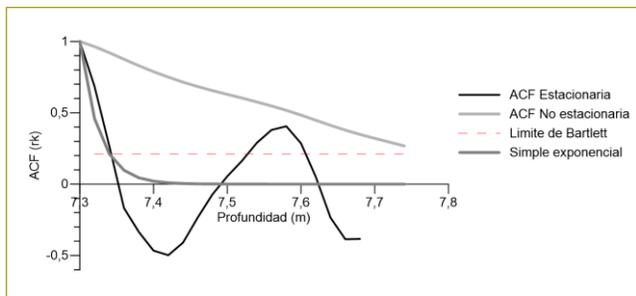


Figura 4. Se presenta función de autocorrelación CPT 42,5 m, sector 1.

Se presenta el resultado para el CPT 30,92 - sector 2 en la Figura 5 el sector discretizado y en la Figura 6 la función de autocorrelación encontrada.

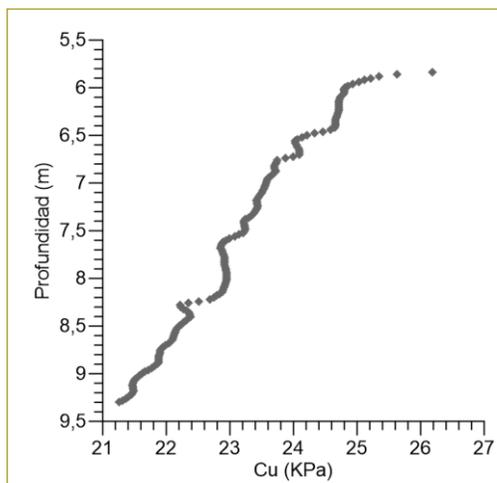


Figura 5. Se presenta CPT 30,92, sector 2.

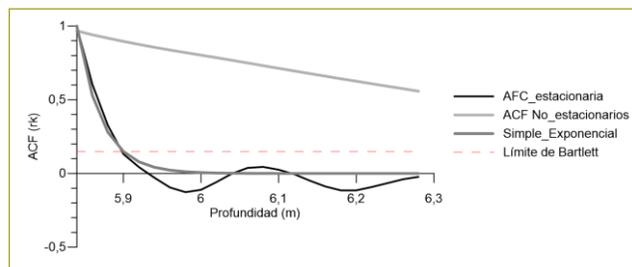


Figura 6. Se presenta función de autocorrelación CPT 30,92 m, sector 2.

Se presenta el resultado para el CPT 20,66 m, sector 2 en la Figura 7 el sector discretizado y en la Figura 8 la función de autocorrelación encontrada .

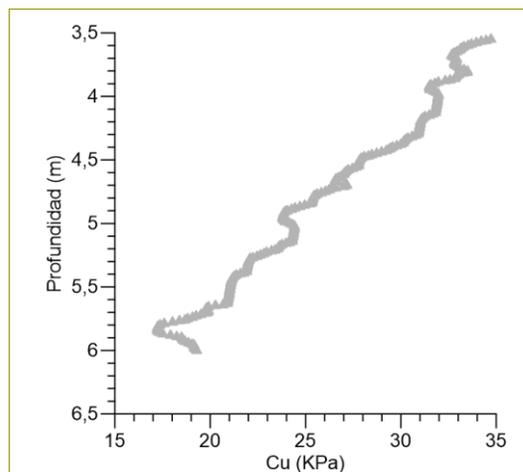
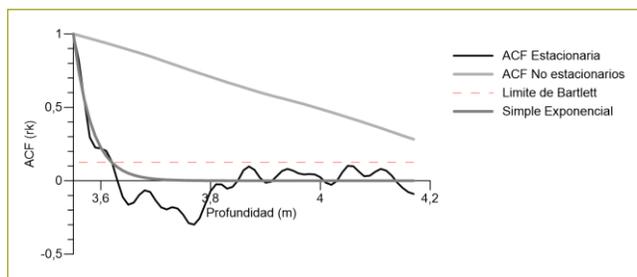


Figura 7. Se presenta CPT 20,66 m, sector 2.



**Figura 8.** Se presenta función de autocorrelación CPT 30,92 m, sector 2.

Se estiman las escalas de fluctuación y los resultados obtenidos se presentan en las siguientes tablas:

**Tabla 2**  
Resultados escala de fluctuación de CPT, 42,5 m

CPT3-42,50 m				$\delta$ (mm)
Sector	Inicial (m)	Final (m)	Longitud (m)	
1	7,3	9	1,7	51,47
2	10,98	14	3,02	43,50
3	18,44	19,64	1,2	57,87
4	23,76	24,98	1,22	57,53
5	32,54	33,52	0,98	46,76
6	3,10	41,84	38,74	25,71

**Tabla 3**  
Resultados escala de fluctuación de CPT, 30,92 m

CPT1, 30,92 m				$\delta$ (mm)
Sector	Inicial (m)	Final (m)	Longitud (m)	
1	3,72	4,84	1,12	
2	5,84	9,3	3,46	62,94
3	10,86	14,34	3,48	29,48
4	16,28	17,86	1,58	39,52
5	19,10	20,36	1,26	63,99
6	22,76	25,24	2,48	13,78
7	2,24	30,92	28,68	33,53

**Tabla 4**  
Resultados escala de fluctuación de CPT, 20,66 m

CPT2, 20,66 m				$\delta$ (mm)
Sector	Inicial (m)	Final (m)	Longitud (m)	
1	1,8	2,3	0,5	46,40
2	3,55	6	2,45	67,32
3	6,74	7,52	0,78	26,46
4	15,00	15,51	0,51	46,06
5	19,20	19,99	0,79	27,43
6	1,06	20,66	19,6	25,66

A continuación en las Tablas 5, Tabla 6 y Tabla 7 se presentan los resultados de la media y varianza de  $C_u$  que también son componentes y caracterizan el campo aleatorio:

**Tabla 5**  
Resultados media y varianza de CPT, 42,5 m

Sector	Media (KPa)	Varianza $KPa^2$ .	Desviación estándar (S)	Coefficiente de variación
1	22,40	0,21	0,46	0,02
2	26,07	0,73	0,85	0,03
3	35,06	0,05	0,22	0,01
4	37,00	0,15	0,39	0,01
5	51,40	0,17	0,41	0,01
6	43,06	320,53	17,90	0,42

**Tabla 6**  
Resultados media y varianza de CPT, 30,92 m

Sector	Media (KPa)	Varianza $KPa^2$ .	Desviación estándar (S)	Coefficiente de variación
1	32,7	0,01	0,10	0,00
2	23,17	1,19	1,09	0,05
3	26,77	4,16	2,04	0,08
4	28,89	0,21	0,46	0,02
5	34,36	0,05	0,22	0,01
6	37,33	0,28	0,53	0,01
7	32,66	99,19	9,96	0,30

**Tabla 7**  
Resultados media y varianza de CPT 20,66 m

Sector	Media (KPa)	Varianza $KPa^2$ .	Desviación estándar (S)	Coefficiente de variación
1	35,61	8,71	2,95	0,08
2	26,16	25,72	5,07	0,19
3	16,46	0,06	0,24	0,01
4	31,42	22,71	4,77	0,15
5	25,32	0,88	0,94	0,04
6	22,63	64,61	8,04	0,36

## ANÁLISIS DE RESULTADOS

La investigación se centró en calcular la escala de fluctuación, no obstante, una de las mayores dificultades

se encontró en la identificación y clasificación de los sectores que cumplieran la homogeneidad necesaria para el análisis.

Se buscó garantizar la continuidad para la cantidad de sectores analizados, pero muchos de ellos no eran aptos en cuanto a homogeneidad. Los sectores finalmente seleccionados (tablas 2, 3 y 4) fueron los únicos que satisficieron dicha condición.

Al analizar la totalidad del conjunto de los datos, así como las longitudes que presentaban mayor grado de estacionariedad, se puede afirmar que, en general, de la idea que se tiene que el depósito lacustre A es homogéneo, esta afirmación procede para las caracterizaciones determinísticas, lo que en realidad sucede es que el depósito, en efecto, es espacialmente variable y está condicionado por los repetidos eventos geológicos que se dieron durante su formación [10]. El hecho de que no existan tramos o longitudes de una mayor extensión es una particularidad de los suelos lacustres en la ciudad de Bogotá.

Los tramos discretizados reflejan las condiciones de homogeneidad más confiables para el depósito que aquellas que tienen en cuenta la totalidad de los datos para todo perfil del depósito.

Los antecedentes para las investigaciones en la India [1], así como en Missouri (Estados Unidos) [7], están dados para estratos cohesivos de poco espesor y con particularidades geológicas para depósitos más consolidados, de menor longitud y de mayor edad, lo cual los hace más homogéneos.

Al comparar los valores estimados de escalas de fluctuación con otros estudios se tiene lo siguiente:

La investigación de Australia [7] está dada para una gran extensión y un número representativo de CPT evaluados. Los resultados muestran que para un depósito de 5 m la homogeneidad estadística es alta, en la que se obtuvieron escalas de fluctuación de entre 63 mm y 241 mm, al igual que coeficientes de variación de 30 %. En Australia, los valores corresponden a escalas de fluctuación para la resistencia por punta del cono ( $Q_c$ ); no obstante, Phoon establece que estimar  $\delta v$  para  $Q_c$  es equivalente a hacerlo para  $C_u$ .

Respecto a las funciones de autocorrelación (ACF) se puede observar que, en efecto, los datos son estacionarios debido a que éstos decaen en los primeros rezagos en forma exponencial. Si se compara con la AFC para los datos experimentales, se observa que éstos

decaen linealmente; a la hora de hacer una evaluación y un cálculo de la escala de fluctuación para este caso (decaimiento lineal), no son confiables los resultados para este parámetro.

La distancia entre la cual el depósito lacustre A, localizado en la Escuela Colombiana de Ingeniería, muestra fuerte correlación es de hasta los 67,32 mm; este valor, si se compara con los estudios en la India, en Missouri (Estados Unidos) y Adelaida (Australia), resulta menor. De lo anterior se infiere que una escala de fluctuación ( $\delta$ ) pequeña, traduce fluctuaciones rápidas sobre la media con una posible reducción en la varianza [1].

Al analizar la totalidad de los datos en cada uno de los CPT contra los sectores discretizados, se observa que la cantidad de datos que se tengan para el análisis no incide en los resultados; es decir, una gran cantidad de datos es independiente de los valores que tome la escala de fluctuación.

## CONCLUSIONES

Cada día se hace más necesario incorporar el tratamiento de los datos y la estadística en geotecnia, sobre todo por la gran variabilidad que exhiben los materiales geológicos, inducida principalmente por sus ambientes de formación, erosión y meteorización, entre otras. En este punto, la estadística es una herramienta de apoyo que facilita la correcta interpretación de las propiedades físicas, mecánicas y espaciales, indispensables para el diseño en geotecnia.

Para la aplicación de una metodología de caracterización de variabilidad espacial con la metodología propuesta, es necesario formular, utilizar y acoplar los conceptos de estadística espacial y estadística temporal, la unión de estas dos permite una correcta interpretación para elaborar un análisis como el del objeto del presente estudio. Sumado a lo anterior, también se destaca la importancia de las herramientas descriptivas de los datos para lograr una interpretación acertada de la naturaleza del tipo de depósito al que se enfrenta el diseñador.

Mediante el análisis estadístico espaciotemporal, se estimó la variabilidad espacial del depósito lacustre localizado en la Escuela Colombiana de Ingeniería.

Media ( $\mu$ ) = 32,76 Kpa

Desviación estándar ( $\sigma$ ) = 15,58 KPa

Escala de fluctuación ( $\delta v$ ) = 67,32 mm

Lo anterior se refiere a que la distancia en la cual la propiedad del suelo evaluada ( $C_u$ ) muestra una fuerte correlación de sus propiedades es mayor de 67 mm; esto es, cada cuatro mediciones (en el caso de los CPTu de medición de 2 cm) de la resistencia al corte no drenado suponen que la correlación disminuye entre las fluctuaciones de las mediciones y se comportan más al azar.

Los coeficientes de variación para  $C_u$  en los sectores discretizados de los CPTu 42,50 m, 30,92 m y 20,66 m son del 1 % al 19 %, pero para la totalidad de los perfiles están en el orden del 30 % al 42 %; esto demuestra la trascendencia y la necesidad de discretizar los análisis en el depósito, ya que este procedimiento reduce la incertidumbre de los modelos, mientras que para la totalidad de los datos en cada uno de los perfiles afecta el ajuste y la convergencia de los modelos en el cálculo de la escala de fluctuación.

Entre los factores indispensables para el correcto desarrollo de la metodología propuesta, se encontró que identificar la homogeneidad estadística de los resultados de la resistencia al corte no drenada de los datos es fundamental. Se encontró que el conjunto de datos del lacustre A para la  $C_u$  es sensible a cualquier variación que se presente, un dato atípico, que limita homogeneidad, modifica tendencias y aumenta el sesgo existente entre los datos, generando así conflictos en las interpretaciones y no convergencia de los modelos en los resultados de los análisis estadísticos.

Teniendo en claro lo que implica contar con datos que se ajusten al propósito del estudio, cobra gran importancia la verificación de estacionariedad de los datos, ya que esta condición se refleja en las gráficas de las funciones de autocorrelación; por ejemplo, cuando se grafican datos transformados en estacionarios, las AFC convergen exponencialmente y decaen en los primeros rezagos, lo que indica y ratifica la estacionariedad; en cambio, cuando se grafican datos experimentales que no son estacionarios se aprecian funciones que decaen linealmente, la diferencia entre las dos se refleja en el hecho de que en el primer caso se miden distancias de correlación y escalas de fluctuación reales, mientras que en el segundo caso se incurría en lecturas y mediciones que no tienen en cuenta la estacionariedad de los datos.

Aun cuando se describen tres métodos para verificar la homogeneidad estadística de los datos, solo los resultados obtenidos del método basado en la prueba de Dickey-Fuller y el Kendall test resultaron lo suficien-

temente adecuados para los cálculos de estacionariedad, dado que el método del enfoque Bartlett y su complemento con el modificado de Bartlett son aproximados e iterativos y pueden resultar menos confiables.

Las escalas de fluctuación para todos los datos y los sectores discretizados para la resistencia al corte no drenado presentan un coeficiente de variación ( $C_v$ ) de 37 %; si se comparan con los estudios desarrollados hasta el momento (Jaksa, Brooker & Kaggwa, 1997; Ge & Onyejekwe, 2013; Murthy, 2005), se encuentra que están dentro de los rangos estimados en cada uno de los estudios particulares.

La complejidad geológica del lacustre A de la ciudad de Bogotá evidencia que los eventos que se presentaron durante su formación condicionan la homogeneidad del depósito, pues las intercalaciones limosas y areno-gravosas obligan a discretizarlo en substratos; la implantación de cimentaciones profundas, por ejemplo, podría hacer creer que un valor determinístico de laboratorio estimado a cierta profundidad pueda ser suficiente para diseñarla, por lo que es recomendable tener en cuenta la variabilidad espacial y cómo ésta puede influenciar la respuesta del suelo y la estructura.

Las características estadísticas de los datos de laboratorio presentan diferencias apreciables para los humedades y límites líquidos, puesto que sus rangos máximos y mínimos pueden afectar los modelos estadísticos espaciotemporales; sin embargo, esta afirmación debe continuar en investigación, siguiendo la metodología de variabilidad espacial.

Se decidió hacer el cálculo de los parámetros espaciales para la resistencia al corte no drenada  $C_u$ , debido a que es la propiedad que está involucrada directamente en diseño de estructuras de un depósito como el lacustre A; no obstante, la metodología se puede aplicar a cualquier propiedad que cuente con una cantidad de datos significativa.

De acuerdo con las caracterizaciones geológicas se puede afirmar que el depósito lacustre A tiene un comportamiento anisotrópico transversal.

## REFERENCIAS

- [1] Murthy Dasaka, S. (s.f.). *Probabilistic site characterization and reliability analysis of shallow foundations and slopes*. Bangalore: Indian Institute of Science.
- [2] Uzuelli, M., Lacase, S., Nadim, F., & Phoon, K. K. (2006). *Soil variability analysis for geotechnical practice* (p. 104).

- [3] Uzielli, M. (2008). *Statistical analysis of geotechnical data* (pp. 1-21).
- [4] Cheng, H., Chen, J., Chen, R., Chen, G., & Zhong, Y. (2018). *Risk assessment of slope failure considering the variability in soil properties. Computers and Geotechnics, 23.*
- [5] Garzón, L. X., Caicedo, B., Silva, M. S., & Phoon, K. K. (2014). Physical modelling of soil uncertainty. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics.*
- [6] Jaksa, M., Kaggwa, W., & Brooker, P. (1999). Experimental evaluation of the scale of fluctuation of a stiff clay. Adelaide, Australia: University of Adelaide, Department of Civil and Environmental Engineering. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/246138559\\_Experimental\\_evaluation\\_of\\_the\\_scale\\_of\\_fluctuation\\_of\\_a\\_stiff\\_clay](https://www.researchgate.net/publication/246138559_Experimental_evaluation_of_the_scale_of_fluctuation_of_a_stiff_clay).
- [7] Onyejekwe, S. (2012). Characterization of soil variability for reliability based design. Obtenido de [http://scholarsmine.mts.edu/doctoral\\_dissertation](http://scholarsmine.mts.edu/doctoral_dissertation): [http://scholarsmine.mts.edu/doctoral\\_dissertation](http://scholarsmine.mts.edu/doctoral_dissertation).
- [8] Phoon, K.-K., & Kulhawy, F. H. (1999). Characterization of geotechnical variability. *Geotechnical Journal, 612-624.*
- [9] Delicado, P. (2008). *Curso de modelos no paramétricos*. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña.
- [10] Ruiz Campo, A. (2006). Origen, formación, estructura y comportamiento de la arcilla de Bogotá [tesis de maestría, Universidad de los Andes].
- Arenas, D. M., & Torres, G. R. (2005). *Geología de la sabana de Bogotá*. Bogotá: Ingeominas.
- Baecher, G. B., & Christian, J. T. (2003). *Reliability and statistics in geotechnical engineering*. West Sussex, England: John Wiley & Sons Ltd.
- Cryer, J., & Chan, K.-S. (2008). *Time series analysis*. OIWA: Springer.
- Dalgaard, P. (2008). *Introductory statistics with R*. Nueva York: Springer.
- Fenton, G. A., & Griffiths, D. V. (2007). Review of probability theory, random variables, and random fields. *Probabilistic methods in geotechnical engineering, 1-76.*
- Ge, L., & Onyejekwe, S. (Marzo de 2013). Scale of fluctuation of geotechnical parameters estimated from cptu and laboratory test data. Obtenido de Research Gate: <https://www.researchgate.net/publication/268459054>.
- Holtz, R. D., Kovacs, W., & Sheahan, T. (2011). *An introduction to geotechnical engineering*. New Jersey: Pearson.
- Hong, Z., & Zhang, L. M. (2013). Characterizing geotechnical anisotropic spatial variations using random field. *Canadian Geotechnical Journal, 723-734.*
- Jaksa, M. B. (2013, March). Assessing soil correlation distances and fractal behavior. *Geotechnical Special Publication.*
- Jaksa, M. B., Brooker, P. I., & Kaggwa, W. S. (1997). Inaccuracies associated with estimation of random measurement errors. *Journal Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 393-401.*
- Julivert, M. (1961). *Boletín de Geología*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- Kim, H. (2005, August). *Spatial variability in soils* [In Partial Fulfillment of the Requirements of the Degree Doctor of Philosophy in Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology].
- Kulhawy, F., Birgisson, B., & Grigoriu, M. D. (1992). Reliability-based foundation design for transmission line structures: transformation models for in-situ tests. EPRY Report No. EL-5507.
- Lacasse, S., & Nadim, F. (1996). Uncertainties in characterising soil properties. *Geotechnical Special Publication, 49-75.*
- Montaña Sanabria, D. (2013). *Características de compresibilidad y resistencia de las arcillas típicas del depósito lacustre de Bogotá*. Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Nie, X., Zhang, J., Huang, H., Liu, Z., & Lacasse, S. (2015). *Scale of fluctuations for geotechnical probabilistic analysis* (pp. 834-840). T. Schweckendiek (eds.).
- Raba, M. A., & Caicedo, B. (2012). Caracterización física y geomecánica de los suelos lacustres en la ciudad de Bogotá desde el contexto de modelos de comportamiento de suelos blandos. .
- Rodó, P. (2020, junio). *Economipedia/Haciendo fácil la economía*. Obtenido de <https://economipedia.com/definiciones/contraste-de-dickey-fuller.html>.
- Sarmiento Terán, C. F., & León Arias, D. A. (2016). *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*. Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Suárez Pinilla, J. G. (2017). *Análisis por confiabilidad de asentamientos de cimientos superficiales*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Uzielli, M., Vannucchi, G., & Phoon, K. K. (2005). Random field characterisation of stress-normalised cone penetration testing parameters. *Géotechnique, 1, 55.*



# Influencia de la longitud de traslapo en la capacidad a flexión de muros de mampostería reforzados internamente con barras de GFRP, ante cargas fuera del plano

Influence of overlap length in flexural capacity of masonry walls internally reinforced with GFRP under out-of-plane loads

JAIRO ARLEY URBINA GÓMEZ - NANCY TORRES CASTELLANOS

Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Centro de Estudios de Estructuras y Materiales.

jairo.urbina@mail.escuelaing.edu.co - nancy.torres@escuelaing.edu.co

Recibido: 20/04/2020 Aceptado: 10/05/2020

Disponible en [http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones\\_revista](http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista)  
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

## Resumen

Se planteó un programa experimental para evaluar la capacidad ante cargas fuera del plano de muros de mampostería reforzados internamente con barras traslapadas de polímeros reforzados con fibra de vidrio (GFRP, por su sigla en inglés) longitudinales, con el objeto de evaluar la influencia de la longitud de traslapo, siguiendo el protocolo de diseño evaluado en anteriores investigaciones para determinar la capacidad teórica de dichos muros, tomando como base los requisitos especificados en el ACI 440.1R-15 y el TMS 402-16.

Dentro del programa experimental se construyeron y ensayaron once muros, reforzados internamente con barras de GFRP; siete de éstos tenían las barras traslapadas y cuatro tenían las barras continuas, y se usaron como muros de control. Se registraron las deflexiones en la mitad de la altura de los especímenes mediante transformadores diferenciales lineales variables (LVDT, por su sigla en inglés). Los muros reforzados con barras traslapadas de GFRP presentaron mayor capacidad respecto a los muros con barras continuas y a las capacidades esperadas al ser sometidos a su máxima capacidad. El modo de falla presentado en los muros reforzados con GFRP fue por aplastamiento en la mampostería, lo que coincide con la falla teórica esperada.

**Palabras claves:** GFRP, mampostería, flexión, traslapo.

## Abstract

An experimental program was proposed to evaluate the capacity against out-of-plane loads of internally reinforced masonry walls with overlapping bars of glass fiber reinforced polymers (GFRP), to evaluate the influence of the overlap length following the design protocol evaluated in previous investigations to determine the theoretical capacity of these walls, based on the requirements specified in ACI 440.1R-15 and TMS 402-16.

Within the experimental program, eleven internally reinforced walls with GFRP bars were built and tested, 7 of which had overlapping bars and 4 had continuous bars and were used as control walls. Deflections at half the height of the specimens were recorded using linear variable differential transformers (LVDT). The walls reinforced with overlapping GFRP bars, when subjected to their maximum capacity, presented greater capacity compared to the walls with continuous bars and the expected capacities. The failure mode presented in the GFRP reinforced walls was by crushing in the masonry, coinciding with the expected theoretical failure.

**Keywords:** GFRP, masonry, flexural, splice.

## INTRODUCCIÓN

La mampostería es uno de los sistemas estructurales más utilizados no solamente en Colombia, sino también en otros países del mundo; se emplea por lo general en edificaciones multifamiliares de vivienda de diferentes alturas, o en ciertos casos como muros de contención o de cerramiento.

El sistema de mampostería estructural ofrece grandes ventajas, tales como su disminución en costo frente a estructuras convencionales de pórticos, dado que tienen menos alturas de acabados, no se necesita formaleta y, por lo general, en Latinoamérica se cuenta con mano de obra especializada muy económica.

En los últimos años, se han implementado en la industria de la construcción materiales compuestos cuyo refuerzo se compone de fibras y se encuentran recubiertos por resinas poliméricas; dichos materiales se conocen como polímeros reforzados con fibra (FRP, por su sigla en inglés). El FRP es un material muy utilizado en la construcción porque ofrece facilidades para restaurar, repotenciar, reforzar y reparar estructuras existentes, pero también se puede emplear en estructuras nuevas [3].

No obstante, se debe reconocer que estos materiales tienen un comportamiento frágil, lo cual no es ideal para estructuras sismorresistente, en las cuales la filosofía se fundamenta en el diseño de estructuras dúctiles.

En cuanto a la normativa actual de este material y su uso, ya se puede encontrar la guía de diseño *Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with FRP bars*, basada en la norma estadounidense ACI 440.1R-15; esta guía contiene las recomendaciones para el análisis y diseño de estructuras nuevas en concreto con refuerzo interno en barras de FRP y la normativa canadiense CSA-S806 *Design and construction of building components with fiber-reinforced polymers*, que cubre los requisitos generales de diseño por estados límite, las propiedades de los componentes de FRP y el diseño de elementos de concreto con refuerzo interno de barras de FRP.

Por otro lado, existen las normas estadounidenses TMS 402-13/ACI 530-13/ASCE 5-13, que son actualmente los códigos de análisis y diseño estructural de mampostería, y cubren por lo general la mampostería reforzada con acero convencional.

De igual manera, en Colombia los requisitos de diseño de mampostería reforzada internamente con barras

de acero se especifican en el título D del Reglamento de Construcciones Sismo Resistentes, título D, NSR-10.

En relación con el estudio del comportamiento de muros reforzados internamente con barras de FRP expuestos a diferentes sollicitaciones, a escala mundial apenas se están dando los primeros pasos para generar ecuaciones que permitan determinar la capacidad teórica.

En Colombia, específicamente en la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, ya se han hecho varias investigaciones [4][5], en las que se han propuesto algunas ecuaciones para determinar su capacidad, sobre todo ante cargas fuera del plano, que se han validado de manera experimental, con excelentes aproximaciones; a su vez, en los estudios que se han desarrollado se ha generado una serie de incertidumbres, relacionadas especialmente con la longitud que debe colocarse de traslapo en las barras embebidas en las celdas de los muros.

Basados en estas capacidades teóricas y la excelente correlación que han presentado con los resultados de los ensayos experimentales, se llevó a cabo este proyecto, en el que se evaluó experimentalmente una serie de muros con diferentes longitudes de traslapo de refuerzo y se validaron su capacidad y su comportamiento mediante las ecuaciones ya propuestas.

En primera instancia, se tomaron en cuenta las disposiciones establecidas en el ACI 440 [6]; con estas disposiciones se determinó, inicialmente, una longitud de traslapo, y considerando el diámetro de la barra y de acuerdo con los resultados obtenidos experimentalmente, se seleccionaron longitudes de traslapo diferentes, con el objeto de estimar el grado de afectación que se presentaba en la capacidad.

Las variables definidas en la etapa experimental fueron la cuantía de refuerzo, la longitud de traslapo en barras # 4 y # 5, y adicionalmente se verificó el efecto de tener la barra desplazada en el muro; para evaluar este efecto, se ensayaron muros con barras de refuerzo ubicadas a dos pulgadas de la cara exterior del bloque, determinando así la influencia que genera tener la barra desviada del eje central de la dovela hacia la cara a tensión.

## PROGRAMA EXPERIMENTAL

Para evaluar la capacidad de la mampostería ante cargas fuera del plano, se siguió la metodología de cálculo

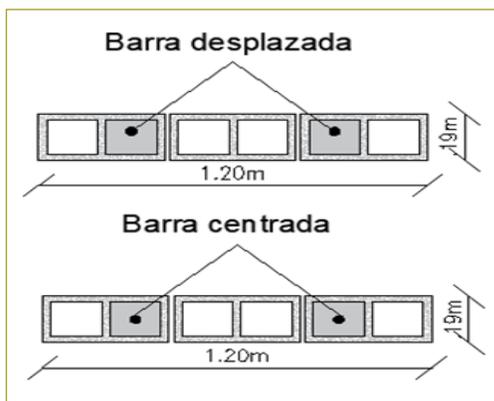
establecida en anteriores investigaciones, la cual es una aproximación a los requisitos de los códigos estadounidenses de diseño:

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

Los resultados esperados se obtuvieron analíticamente y se compararon con los resultados experimentales, para lo cual se ensayaron muros con diferentes longitudes de traslazo, cuantía de refuerzo y  $f'_m$ . Fueron siete muros de mampostería en concreto reforzados con GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymer*), con barras traslapadas, y cuatro muros también reforzados con GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymer*), con barras continuas que se emplearon como muros de control, para un total de once muros.

La longitud de traslazo varió de acuerdo con las propiedades de los materiales componentes de los muros (1,15 m, 1,18 m, 1,23 m). Se utilizaron diámetros de 12,7 mm y 15,88 mm para las barras de GFRP. Más adelante se presenta la disposición en planta de los muros, así como también las dimensiones y la ubicación de las barras de refuerzo (figura 1 y tabla 1).

Los muros se identificaron mediante la siguiente nomenclatura (#barra-f'm (psi)-Centrada/Desplazada-Completa/Traslazo-longitud de traslazo-Consecutivo).



**Figura 1.** Ubicación del refuerzo de los muros.  
Fuente: Elaboración del autor.

**Tabla 1**  
Características del refuerzo de los muros

Nombre inicial	Nombre final	# Barras GFRP	Diámetro barra
M1	5-1500-C-T-1,18- A	2	# 5
M2	5-1500-C-T-1,18 -B	2	# 5
M4	5-1500-C-C	2	# 5
M9	4-1500-C-T-1,15-A	2	# 4
M10	4-1500-C-T-1,15-B	2	# 4
M13	4-1500-C-C	2	# 4
M15	5-2500-C-T-1,23- A	2	# 5
M16	5-2500-C-T-1,23- B	2	# 5
M17	5-2500-C-C	2	# 5
M18	5-1500-D-T-1,18	2	# 5
M20	5-1500-D-C	2	# 5

Mediante la caracterización de los materiales se obtuvieron sus propiedades:

Mortero de pega	$f'_{cp}$	29,1 MPa
Mortero de relleno	$f'_{cr}$	32 MPa
Mampostería en concreto	$f'_m$	10 MPa
Barras de GFRP	$f_{fu}$	758 MPa

### CÁLCULO DE CAPACIDAD RESISTENTE DE MUROS

Se implementó la metodología de cálculo de la capacidad a flexión desarrollada en estudios previos en la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, siguiendo las recomendaciones estipuladas en el ACI 440.1R-15 para el cálculo analítico de la cuantía, la cuantía balanceada, el modo de falla esperado, la deformación unitaria en las barras, el momento resistente nominal, la carga de falla, el momento de agrietamiento y las deflexiones máximas en el muro, en tanto que las ecuaciones propuestas en el TMS 402-16 se siguieron para el cálculo de las propiedades de la mampostería.

Para predecir el modo de falla, se revisó si la cuantía de cada muro era mayor que la cuantía balanceada, con el propósito de determinar si la falla que se presentaba era por aplastamiento en la mampostería o por ruptura de las barras de refuerzo. Se calculó como se indica en las ecuaciones siguientes (ecuaciones 1 y 2).

$$\rho_b = (\alpha l) * (f'_m * F_{fu}) * \beta_1 * (\epsilon_{mu} \epsilon_{mu} + \epsilon_{fu}) \quad (1)$$

Los valores de los coeficientes  $a1$  y  $b1$  se tomaron de acuerdo con lo determinado en el TMS.

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

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

$$\epsilon_r = \frac{(d - c) * (\epsilon_{mu})}{C} \quad (3)$$

Además, se calcularon analíticamente las capacidades de los muros - momento nominal sometidos a cargas perpendiculares al plano mediante la ecuación que se presenta a continuación (ecuación 4).

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

Así mismo, se calculó analíticamente la deflexión máxima del muro (ecuación 5).

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

Donde:

$a1 = 0,8$ .

$b1 = 0,8$ .

$f'_m$ : resistencia a la compresión de la mampostería.

$F_{fu}$ : resistencia a la rotura de las barras de GFRP.

$\epsilon_{mu}$ : deformación unitaria de la mampostería.

$\epsilon_{ru}$ : deformación unitaria de las barras de FRP.

$A$ : área de refuerzo.

$b$ : ancho del muro.

$d$ : distancia del eje de la barra a la fibra extrema en compresión del muro.

$c$ : profundidad del eje neutro del muro.

$M_{cr}$ : momento de agrietamiento del muro.

$L$ : alto del muro.

$E_m$ : módulo de elasticidad de la mampostería.

$I_g$ : inercia bruta del muro.

$I_{cr}$ : inercia agrietada del muro.

En la siguiente tabla se muestran los resultados teóricos de la cuantía, la cuantía balanceada, la defor-

mación unitaria de las barras de refuerzo, la deflexión a la mitad de la altura del muro y el momento nominal resistente (tabla 2).

**Tabla 2**  
Características del refuerzo de los muros

Nombre inicial	r	rb	εf	Mn	d
				KN.m	mm
M1	0,00347	0,00082	0,81 %	16,76	33,87
M2	0,00347	0,00082	0,81 %	16,76	33,87
M4	0,00347	0,00082	0,81 %	16,76	33,87
M9	0,00222	0,00082	1,04 %	14,13	39,07
M10	0,00222	0,00082	1,04 %	14,13	39,07
M13	0,00222	0,00082	1,04 %	14,13	39,07
M15	0,00347	0,00139	1,09 %	21,14	49,74
M16	0,00347	0,00139	1,09 %	21,14	49,74
M17	0,00347	0,00139	1,09 %	21,14	49,74
M18	0,00220	0,00082	1,05 %	16,76	33,87
M20	0,00220	0,00082	1,05 %	16,76	33,87

Fuente: Elaboración del autor.

Después de los análisis, se predijo que el modo de falla se presentaría por aplastamiento en la mampostería.

Una vez obtenidas las capacidades de los muros se determinaron las longitudes de traslazo que se iban a usar con las siguientes ecuaciones tomadas del ACI 440, especificadas para barras de FRP embebidas en elementos de concreto; como ya se mencionó, se toman de base al no contar con una guía de diseño que permita calcular la longitud de traslazo de las barras de GFRP utilizado como refuerzo interno de muros de mampostería de concreto.

La longitud de desarrollo de las barras de FRP viene dada por la siguiente expresión:

$$l_d = \frac{\alpha \frac{l_{fr}}{\sqrt{f'_m \text{ (psi)}}} - 340}{13,6 + \frac{C}{d_b}} * d_b \quad (6)$$

Donde:

$$f_{fr} = \sqrt{\frac{(E_f * \epsilon_{mu})^2}{4} + \frac{0,80 * \sigma_t * f'_m * E_f * \epsilon_{mu}}{\sigma_t}} - 0,5 * E_f * \epsilon_{mu} \quad (7)$$

$$\rho_f = \frac{A_f}{b * d} \quad (8)$$

En la siguiente tabla se presentan las longitudes de traslapo obtenidas para los muros:

**Tabla 3**  
Longitudes de traslapo calculadas

Barra	db (in)	f <sup>*</sup> <sub>fu</sub> (ksi)	ρ <sub>f</sub>	f <sub>fr</sub> (ksi)	l <sub>d</sub> (in)	l <sub>splice</sub> (in)	l <sub>d</sub> (m)	l <sub>splice</sub> (m)	l <sub>d a usar</sub> (m)
<b>Mampostería 10 MPa (1500 psi)</b>									
#4	0,50	110	0,0026	70	57	74	1,425	1,85	1,15
#5	0,625	105	0,0041	57	59	77	1,475	1,93	1,18
<b>Mampostería 17 MPa (2500 psi)</b>									
#5	0,625	105	0,0041	75	61	79	1,525	1,98	1,23

Fuente: Elaboración del autor.

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

1. Cargar el muro al 25 % de su resistencia admisible.
2. Descargar el muro al 5 % de su resistencia admisible.
3. Cargar el muro al 50 % de su resistencia admisible.
4. Descargar el muro al 5 % de su resistencia admisible.
5. Cargar el muro al 75 % de su resistencia admisible.
6. Descargar el muro al 5 % de su resistencia admisible.
7. Cargar el muro al 100 % de su resistencia admisible.
8. Descargar el muro al 5 % de su resistencia admisible.
9. Cargar el muro hasta llegar a la falla.

Siguiendo el protocolo de carga, se hicieron los ensayos a cada uno de los muros, para los cuales se utilizó el muro de reacción de la Escuela, ya que por medio de un gato hidráulico de 100 kN se empujaron dos vigas –simulando las cargas en los tercios de los muros de ensayo– contra un marco de soporte de los muros, el cual consistió en una estructura ensamblada con perfiles metálicos que se sujetaban por medio de barras de 1<sup>1/2</sup>" al muro de reacción (foto 1).



Foto 1. Vista general del montaje.

Fuente: Elaboración del autor.

### RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

A modo de ejemplo, se presenta la curva de carga vs. deflexión en el centro de la altura, obtenidos para el muro M9 (4-1500-C-T-1,15-A), en la que se pueden evidenciar los ciclos de carga y descarga (gráfico 1). Como se puede observar, después de la descarga de cada uno de los ciclos el muro tendía a volver a su posición inicial, mostrando su comportamiento elástico.

Así mismo, se evidencia que la curva tiene dos pendientes: la primera termina en el punto donde la mampostería se agrieta en la zona a tensión del muro y la segunda pendiente continúa lineal hasta la falla (gráfico 1).

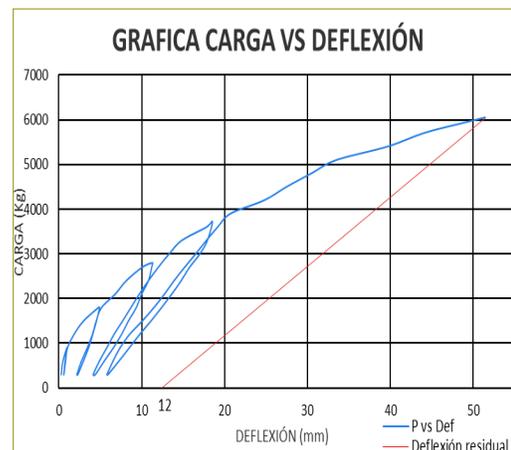
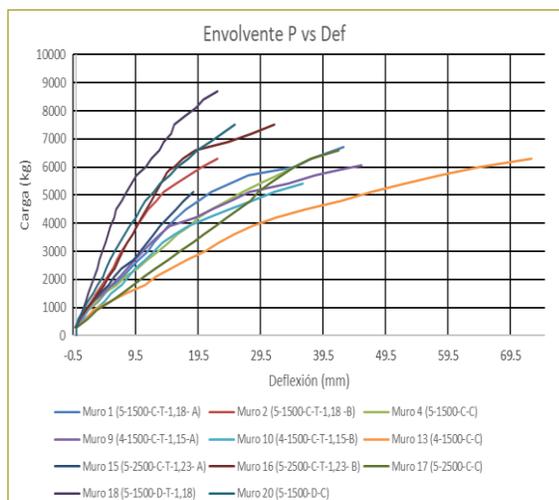


Gráfico 1. Carga vs. deflexión típica.

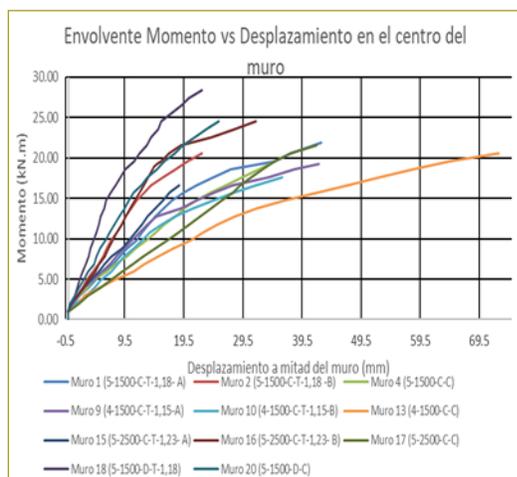
Fuente: Elaboración del autor.

A renglón seguido se muestran las envolventes de las curvas de carga vs. deflexión y momento vs. deflexión en el centro del muro para cada uno de los muros, obtenidas de los ensayos de laboratorio. En los siguientes gráficos se pueden apreciar las curvas de los muros:



**Gráfico 2.** Carga vs. deflexión en muros reforzados con GFRP.

Fuente: Elaboración del autor.



**Gráfico 3.** Momento vs. deflexión en el centro de los muros reforzados con GFRP.

Fuente: Elaboración del autor.

Seguidamente, se presenta el resumen de los resultados obtenidos de los ensayos para cada uno de los muros en estudio (tabla 4).

El modo típico de falla para los muros reforzados con FRP, tal como se esperaba, fue por aplastamiento en la mampostería (foto 2).

**Tabla 4**  
Resultados de los ensayos

Nombre inicial	Nombre final	Pfalla		Mexp	d <sub>máx</sub>
		Ton	KN	KN.m	mm
M1	5-1500-C-T-1,18- A	6,90	68,29	22,88	45
M2	5-1500-C-T-1,18 -B	6,42	63,54	21,28	27
M4	5-1500-C-C	6,13	60,67	20,32	41
M9	4-1500-C-T-1,15-A	6,09	60,29	20,20	38
M10	4-1500-C-T-1,15-B	5,50	54,43	18,23	42
M13	4-1500-C-C	6,30	62,35	20,89	81
M15	5-2500-C-T-1,23- A	6,50	64,33	21,55	28
M16	5-2500-C-T-1,23- B	7,66	75,81	25,40	37
M17	5-2500-C-C	6,60	65,32	21,88	50
M18	5-1500-D-T-1,18	8,84	87,49	29,31	28
M20	5-1500-D-C	7,75	76,70	25,69	33

Fuente: Elaboración del autor.



**Foto 2.** Aplastamiento en la mampostería.

Fuente: Elaboración del autor.

### ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

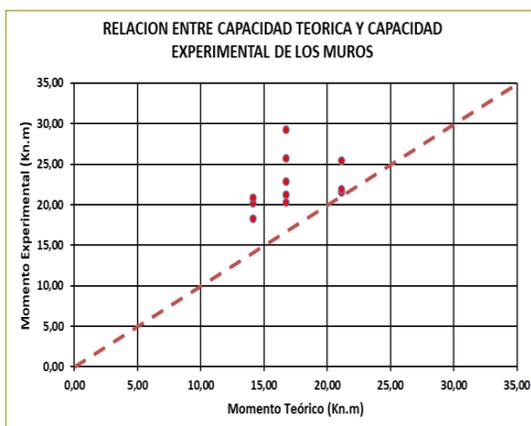
En la tabla siguiente se comparan, por medio de una relación, los momentos máximos teóricos y los momentos máximos experimentales de los muros; los resultados ideales son aquellos en los cuales los momentos máximos experimentales son mayores que los momentos máximos teóricos (tabla 5).

**Tabla 5**

Relación entre capacidad teórica y capacidad experimental de los muros

Nombre inicial	Nombre final	f Barra	M <sub>exp</sub>	M <sub>teórico</sub>	M <sub>teor</sub> / M <sub>exp</sub>
			KN.m	KN.m	
M1	5-1500-C-T-1,18- A	#5	22,88	16,76	0,73
M2	5-1500-C-T-1,18- B	#5	21,28	16,76	0,79
M4	5-1500-C-C	#5	20,32	16,76	0,82
M9	4-1500-C-T-1,15-A	#4	20,20	14,13	0,70
M10	4-1500-C-T-1,15-B	#4	18,23	14,13	0,78
M13	4-1500-C-C	#4	20,89	14,13	0,68
M15	5-2500-C-T-1,23- A	#5	21,55	21,14	0,98
M16	5-2500-C-T-1,23- B	#5	25,40	21,14	0,83
M17	5-2500-C-C	#5	21,88	21,14	0,97
M18	5-1500-D-T-1,18	#5	29,31	16,76	0,57
M20	5-1500-D-C	#5	25,69	16,76	0,65

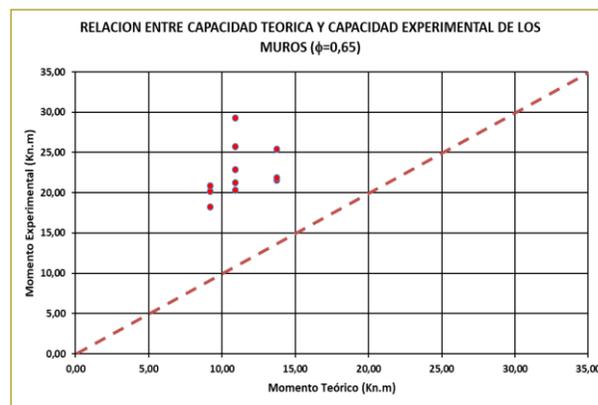
En todos los muros, la relación entre momento teórico y momento experimental fue menor que uno, cumpliéndose así las condiciones ideales y estableciendo el buen comportamiento que presentan los muros con la longitud de traslapo determinada de acuerdo con el ACI 440. A continuación se pueden observar los resultados obtenidos de la relación anteriormente mencionada (en el gráfico 4):



**Gráfico 4.** Relación entre capacidad teórica y capacidad experimental de los muros.

Fuente: Elaboración del autor.

El modo de falla de los muros coincidió con los esperados (resultados teóricos), el cual era por aplastamiento de la mampostería; por lo tanto, se aplicó el factor de reducción  $\phi$  de 0,65 a la capacidad nominal a flexión, de acuerdo con lo estipulado en el ACI 440.1R-15. A renglón seguido se muestran los resultados de los momentos máximos experimentales y los momentos máximos teóricos, afectando estos últimos por el factor  $\phi$  (gráfico 5).



**Gráfico 5.** Relación entre la capacidad teórica afectada por el coeficiente de reducción y la capacidad experimental de los muros.

Fuente: Elaboración del autor.

Los puntos del gráfico anterior que se encuentren por encima de la línea naranja significan que los momentos experimentales fueron mayores que los momentos teóricos y así se garantiza que el elemento falle por aplastamiento en la mampostería, como sucedió en los ensayos.

Una vez comparada la capacidad de los muros, se procedió a comparar las deflexiones obtenidas con las esperadas (tabla 6).

Respecto a la comparación de las deflexiones, los muros que tienen un  $f'_m$  mayor presentaron menores deflexiones que las esperadas, debido a su mayor módulo elástico; los muros con las barras desplazadas registraron también deflexiones menores que las esperadas, lo que significa que un error en la colocación del refuerzo hacia el lado de las tensiones aumenta su capacidad, pero disminuye su deflexión respecto a la esperada.

**Tabla 6**

Relación entre capacidad teórica y capacidad experimental de los muros

Nombre inicial	Nombre final	f Barra	d <sub>exp</sub>	d <sub>teórico</sub>	d <sub>teo</sub> / d <sub>exp</sub>
			mm	mm	
M1	5-1500-C-T-1,18- A	#5	45	34	0,75
M2	5-1500-C-T-1,18 -B	#5	27	34	1,25
M4	5-1500-C-C	#5	41	34	0,83
M9	4-1500-C-T-1,15-A	#4	38	39	1,03
M10	4-1500-C-T-1,15-B	#4	42	39	0,93
M13	4-1500-C-C	#4	81	39	0,48
M15	5-2500-C-T-1,23- A	#5	28	50	1,78
M16	5-2500-C-T-1,23- B	#5	37	50	1,34
M17	5-2500-C-C	#5	50	50	0,99
M18	5-1500-D-T-1,18	#5	28	35	1,26
M20	5-1500-D-C	#5	33	35	1,07

## CONCLUSIONES

En los muros ensayados, debido a que la cuantía de refuerzo fue mayor que la cuantía balanceada, el modo predominante de falla fue por aplastamiento en la mampostería, como era lo esperado; además, se confirmó –tal como se había afirmado en anteriores investigaciones– que las capacidades calculadas teóricamente, según los códigos TMS 402-16 y ACI 440.1R-15, se aproximan a las capacidades obtenidas experimentalmente por medio de los ensayos en el laboratorio.

Las ecuaciones implementadas en esta investigación para el cálculo de las longitudes de traslapo de las barras de GFRP embebidas en concreto satisfacen los requerimientos estructurales de la mampostería construida con bloques de concreto, al presentarse momentos experimentales mayores que los teóricos en los muros ensayados que contenían barras traslapadas.

De acuerdo con lo que se esperaba, el desplazamiento del refuerzo hacia el lado de las tensiones generó un incremento en la capacidad a flexión del muro de mampostería superior al 25 % en relación con los muros con barras traslapadas y centradas, pero a su vez se presentan deflexiones menores que las esperadas.

La longitud de traslapo calculada con la metodología ACI 440 genera un incremento superior al 10 % de la capacidad experimental respecto a la capacidad teórica de los muros de mampostería reforzados internamente con barras de GFRP # 5, y un aumento cercano al 10 % en comparación con los muros que tienen las barras continuas.

Se pudieron validar las ecuaciones planteadas en las investigaciones anteriores en cuanto a la estimación de la capacidad teórica fuera del plano, utilizando una relación de esbeltez diferente.

Las capacidades de los muros reforzados con barras traslapadas fueron superiores a las presentadas por los muros con barras continuas, debido posiblemente a la doble área de refuerzo concentrada en la zona de traslapo; este incremento de la capacidad contradice la idea de que el traslapo reduce la eficiencia del refuerzo.

## Agradecimientos

Queremos dar las gracias a la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito; al ingeniero Gustavo Tumialán, asesor de la investigación y miembro del comité ACI 440; a las empresas Kreato y Owens Corning por sus materiales, y a la Universidad de Miami por el apoyo brindado.

## REFERENCIAS

- ACI Committee, ACI 440.1R-15 (s.f.). *Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with FRP bars*.  
Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS) (2010). Título D. Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, NSR-10. SciELO.  
Otálora Barros, D. (2017). Comportamiento ante carga perpendicular al plano de muros de mampostería en concreto, reforzados con barras de FRP.  
Quintana Ruiz, L. A. (2017). *Comportamiento a flexión pura, de muros de mampostería en arcilla, reforzados con barras de FRP*. Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.  
The Masonry Society (2016). *Building Code Requirements and Specification for Masonry Structures*. Longmont, Colorado: TMS

# Arquitecturas para el análisis de grandes cantidades de datos en tiempo real, aplicado a criptomonedas

Architectures for analyzing large amounts of data in real time, applied to cryptocurrencies

JUAN PABLO ARÉVALO MERCHÁN

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

juan.arevalo-m@mail.escuelaing.edu.co

Recibido: 25/04/2020 Aceptado: 15/05/2020

Disponible en [http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones\\_revista](http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista)

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

## Resumen

Diariamente, se generan grandes cantidades de datos en internet. El crecimiento exponencial de los dispositivos conectados y las nuevas formas de interacción humana con la tecnología proporcionan una gran fuente de información.

En este contexto, el análisis de datos en tiempo real es fundamental para tomar decisiones basadas en información actualizada. Varios factores, como la latencia, la escalabilidad, el almacenamiento, el procesamiento, la visualización y la predicción, afectan la forma en que se reciben y procesan estos datos. Diseñar una arquitectura adecuada para estos sistemas es un elemento crítico de cualquier negocio o empresa respaldada por la tecnología.

En este artículo se estudia el estado del arte de las arquitecturas de sistemas para el análisis en tiempo real de *big data* en el contexto de las criptomonedas. Se presentan primero lambda y kappa, dos arquitecturas de referencia para el análisis en tiempo real en sistemas *big data*, y luego se exploran varios trabajos en los que se describen las arquitecturas de los sistemas de análisis en tiempo real para criptomonedas.

**Palabras claves:** *big data*, arquitectura kappa, arquitectura lambda, *streaming*, criptomonedas, arquitecturas *big data* en tiempo real.

## Abstract

Large amounts of data are being generated daily on the internet. The exponential growth of connected devices and the new ways of human interactions with technology provide a prolific information source.

In this context, real-time data analysis is essential for making decisions based on updated information. Several factors, such as latency, scalability, storage, processing, visualization, and prediction, affect how this data is received and processed. Designing a suitable architecture for these systems is a critical element of any business or social endeavor supported by technology.

This article studies the state of the art of the architectures of systems for real-time analysis of big data in the context of cryptocurrency. The paper first presents lambda and kappa, two reference architectures for real-time analysis in big data systems. It then explores several works describing the architectures of real-time analysis systems for cryptocurrency.

**Keywords:** big data, kappa architecture, lambda architecture, streaming, cryptocurrency, real-time big data architecture.

## INTRODUCCIÓN

En el mundo actual, la generación de datos crece en una cantidad exponencial, debido a los numerosos dispositivos capaces de generarlos, desde los sensores IoT más básicos, pasando por transacciones financieras y de criptomonedas, y llegando incluso a información reservada para temas de ciberseguridad.

Durante los últimos años, el análisis de datos en tiempo real ha cobrado mucha fuerza, puesto que cada vez es más importante contar con la información más reciente para la toma de decisiones. En un mundo tan competitivo, esto se tiene que sustentar efectivamente en la información generada por las compañías, la cual tiene que estar lo más actualizada posible; si no es así, las decisiones podrían basarse en datos errados o desactualizados.

Un ejemplo típico sobre el análisis de datos en tiempo real es el aplicado en el campo de las criptomonedas. En la actualidad, estas monedas tienen un valor monetario muy grande; tanto así que plataformas creadas para hacer un seguimiento de la capitalización de diferentes criptomonedas [25] informan que a la fecha existen más de 7.800 clases de estas monedas.

Según [25, 26], las principales criptomonedas son bitcoin, ethereum, ripple, litecoin y tether. Todas presentan una condición común: la volatilidad en sus precios. Por ejemplo, el bitcoin ha pasado de un precio de US\$1.000 en 2017 a US\$19.000 en 2020 [25]; esto hace que exista un alto riesgo en tales inversiones, pero a su vez dicha condición vuelve muy atractivo el mercado, pues se puede llegar a ganar mucho dinero.

Existen varias teorías en cuanto a factores incidentes en los precios de estas monedas. Algunos –como [5]– dicen que este factor es determinado por la oferta y la demanda, por los sentimientos de pánico, pesimismo, escepticismo, optimismo y euforia, y por la opinión de las personas; esto hace que sea muy importante tener en conjunto toda esta información en tiempo real, procesada y lista para su utilización.

Criptomonedas como ethereum manejan cerca de 1.200.000 transacciones por día [27], lo cual demuestra la cantidad de información que se debe evaluar.

Aun cuando las criptomonedas tienen un mundo completo por investigar y comentar, para la finalidad del artículo solamente será necesario conocer datos básicos y reconocer algunos de los factores incidentes en los precios de éstas; con dicha información se puede

profundizar en torno a las arquitecturas para el análisis de grandes cantidades de datos en tiempo real, aplicadas a criptomonedas, en las que se pueda conocer cuál es el estado del arte, cuáles son los orígenes de información, los componentes principales, así como pros y contras, y ver qué relación existe entre estas arquitecturas y las arquitecturas de referencia como Lambda [1] y Kappa [3].

A partir de lo anterior, en el capítulo 2 de este artículo se presenta la metodología utilizada para la revisión hecha; en el marco teórico del capítulo 3 se habla de los conceptos más importantes para el entendimiento del artículo, en tanto que en el capítulo 4 se muestra el estado del arte de la aplicación de arquitecturas de procesamiento de datos en tiempo real a los sistemas de criptomonedas, y a la vez se conocerán diversas opiniones de algunos autores en dicho campo; en el capítulo 5 se analizarán los componentes utilizados por los autores para la generación de sus arquitecturas y se hará un estado comparativo entre las arquitecturas propuestas y las arquitecturas de referencia (kappa y lambda, según corresponda), y finalmente, en el último capítulo se verán las conclusiones y trabajos futuros.

## METODOLOGÍA

Para el desarrollo de este artículo se han buscado bibliografías en sitios como IEEE, Google Scholar, Sciendo y Researchgate, utilizando palabras claves como *lambda architecture*, *kappa architecture*, *lambda implementation*, *real-time architecture*, *big data architecture*, *lambda cryptocurrency*, *kappa cryptocurrency*, *cryptocurrency real time architecture*, *cryptocurrency real time architecture analysis*, *cryptocurrency big data* y *cryptocurrency real-time*.

Así mismo, se consultaron páginas web como las de IBM o Oracle, para obtener información del marco teórico. Luego de la consecución de artículos, se hace la validación del estado del arte actual, para poder sacar conclusiones, beneficios, desventajas y comparaciones contra las arquitecturas de referencia.

## MARCO TEÓRICO

A continuación, se presentan algunos conceptos teóricos claves para el entendimiento del artículo.

## Big data

*Big data* es un término muy acuñado durante los últimos años, para el cual se encuentran múltiples definiciones, entre las cuales se destacan las siguientes:

Una de las más utilizadas nace en el año 2001, en el informe de Meta (ahora de Gartner) [9]; aun cuando en dicho informe no se menciona la palabra *big data*, se ha adoptado desde entonces como una de las definiciones más importantes.

Gartner propuso una definición en la que se emplean las tres V: volumen, velocidad y variedad. En el informe se destaca el tamaño cada vez mayor de los datos, lo que se denomina volumen; a su turno, la velocidad a la que se generan los datos es cada vez mayor, gracias a la cantidad de dispositivos capaces de producir datos, y por último la variedad, es decir, los datos, se generan en muchos formatos y representaciones diferentes [30].

Para IBM en [10], hace referencia al término *big data* como aquellas prácticas utilizadas para describir enormes cantidades de datos, teniendo en cuenta que éstos pueden ser estructurados, no estructurados y semiestructurados, y además tomaría demasiado tiempo y sería muy costoso cargarlos a una base de datos relacional para su análisis.

Sin embargo, el término *big data* no se refiere a una cantidad de datos en específico, pero sí se utiliza por lo general cuando se habla en términos de *petabytes* y *exabytes* de información. Al igual que la definición dada por Gartner [9], IBM y Microsoft [11] utilizan las tres V para la descripción de *big data*.

Por su parte, Oracle en [12] introduce dos nuevas V; ahora no solo son volumen, velocidad y variedad, sino también valor y veracidad.

## Procesamientos de datos

El procesamiento de datos es la fase en la que se recogen, recopilan, limpian, filtran, agregan, transforman o enriquecen los datos para su posterior utilización. El procesamiento se inicia con datos en bruto, que se convierten a un formato más legible, dándoles el sentido y el contexto necesarios para su explotación. Existen dos paradigmas para llevar a cabo este proceso: *batch* y *streaming*.

### • Procesamientos tipo *batch*

Para entenderlo en el concepto *big data*, el procesamiento *batch* según [8] es una colección de datos que se han agrupado dentro de un intervalo de tiempo para ser procesados. Esto significa que la información no estará disponible en tiempo real, ya que se deberá esperar a que el intervalo de tiempo que se ha preestablecido se complete para que la información se pueda emplear.

Esto es muy común en el ámbito *big data*, para el manejo de información que no se requiere tener de manera inmediata. Si se consultan ejemplos de la vida real, una entidad financiera puede procesar todas las transacciones que ha hecho en un día; en este caso, el intervalo de tiempo específico será el citado anteriormente. Dichos datos contienen millones de registros, que se pueden almacenar como un archivo, el cual se procesa al final del día para varios análisis que la empresa desee hacer.

En el ámbito de las criptomonedas, el procesamiento *batch* puede servir para consolidar todas las transacciones que se realicen en un día de las criptomonedas o procesar precios históricos de la moneda para la predicción de precios y procesarlas para la toma de decisiones.

### • Procesamientos tipo *streaming*

Cada vez más, las personas y las empresas requieren tener acceso a los datos en el momento en que se generan, para poder tomar decisiones con base en información actualizada. Según [13], el procesamiento de *stream* permite procesar datos en tiempo real a medida que llegan y así se pueden detectar rápidamente las condiciones en un periodo de tiempo reducido desde el punto de recepción de los datos. Esta es la gran diferencia con los procesos *batch*, pues acá el tiempo de espera es muy reducido y a partir de ello se pueden procesar los datos a medida que van llegando; esto permite introducir datos en herramientas de análisis tan pronto como se generan y obtener resultados de análisis instantáneos. En el análisis del presente artículo, el procesamiento *streaming* será fundamental para procesar los datos a medida que se vayan generando, datos de redes sociales, de transacciones y de la oferta y la demanda de criptomonedas, lo que permitirá tomar las decisiones con base en la información recibida en tiempo real.

## Arquitecturas big data para el procesamiento de datos en tiempo real

Antes de continuar, debemos aclarar qué es arquitectura y cómo vamos a utilizar este término dentro del artículo. La arquitectura se define como las estructuras, patrones, lineamientos o abstracciones de un sistema y las relaciones que existen entre ellos, hablando a un alto nivel [28].

La palabra *arquitectura*, aplicada en *big data* para el procesamiento de datos en tiempo real, se puede definir como aquellas abstracciones y relaciones necesarias para soportar grandes cantidades de información que llegan en tiempo real, es decir, en el momento en que se genera la información. En lugares como [7] y [14], se habla de las dos arquitecturas de referencia que cumplen con las dos condiciones planteadas (*big data* y *real-time*); estas arquitecturas son lambda y kappa.

### • Arquitectura Lambda

N. Marz [1, 29] propuso la arquitectura Lambda en el año 2011. Tenía como prioridad montar una arquitectura tolerante a fallos, ya sean de tipo humano o de *hardware*, y que cumpliera algunos objetivos que hoy en día requieren las arquitecturas *big data*, esto es, que sean escalables para que puedan crecer a medida que se requiera, y sobre todo con una baja latencia para escrituras y lecturas.

La arquitectura Lambda se divide en tres grandes capas: *batch*, servicio y velocidad. A renglón seguido se presentan los componentes y su interconexión (figura 1).

Ahora vamos a explicar un poco el funcionamiento de la arquitectura. Los datos que entran al sistema se envían tanto a la capa *batch* como a la capa de velocidad. La capa *batch* es la encargada de escribir los datos en el almacenamiento y luego los datos tendrán un procesamiento necesario para pasar a la capa de servicio. Esta última se encarga de indexar las vistas *batch*, de modo que pueda responder a las búsquedas o consultas con muy baja latencia y con los datos ya procesados; así, cuando se requiera acceder a los datos, no habrá necesidad de procesar todo el conjunto de datos, sino simplemente acceder a la vista.

El problema es que el proceso de escribir datos y luego indexarlos es bastante lento, por lo que éstos no están disponibles de manera instantánea [2].

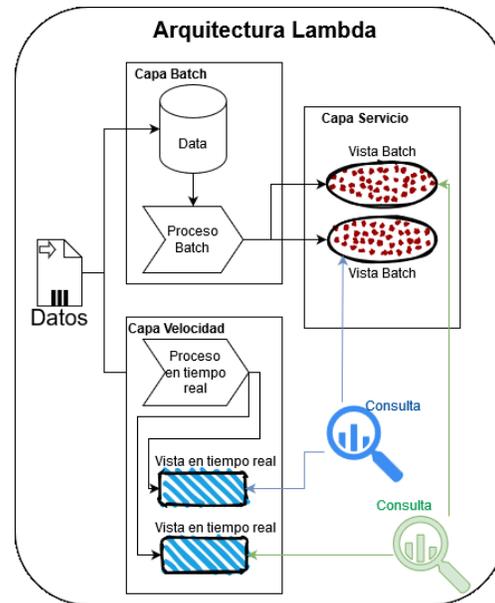


Figura 1. Diagrama de la arquitectura Lambda [1].

Para ello, Marz propone la capa de velocidad, la cual se dedica a exponer sólo los datos más recientes, sin necesidad de preocuparse por escribirlos de manera permanente como sí sucede en la capa *batch* [16].

Al combinar estos dos paradigmas de procesamiento *batch* y procesamiento en tiempo real, cualquier búsqueda o consulta puede tomar datos provenientes tanto de vistas *batch* de la capa de servicio, como de las vistas en tiempo real de la capa de velocidad; esto ofrece lo mejor de dos mundos, ya que brinda un alcance completo y confiable por la capa *batch*, mientras que el modo *stream* nos da los datos en línea para decisiones instantáneas [2, 15].

### • Arquitectura Kappa

J. Kreps [3] propuso la arquitectura Kappa en el año 2014. En esta propuesta critica la arquitectura Lambda debido al consumo innecesario de recursos que conlleva mantener y tratar los mismos datos, con el objetivo de obtener resultados similares, en dos sistemas distribuidos en la capa *batch* y en la capa velocidad.

Hay que entender que los procesamientos *batch* y los procesamientos *stream* manejan diversas herramientas; por lo tanto, el código está enfocado en cada una de ellas. Kreps afirma que el procesamiento *batch* es un subconjunto de las operaciones de *streaming*, y como

consecuencia, en su idea de Kappa plantea suprimir la capa *batch*, quedándose únicamente con la de velocidad y la de servicio, y pasando a considerar todo como un flujo de datos ininterrumpido.

A continuación, se presentan el diagrama de la arquitectura Kappa y el flujo que sigue en la actualidad (figura 2).

El funcionamiento es muy sencillo: la capa de tiempo real es la encargada de recibir el flujo de información, y de ahí se pasa a la capa de servicio, encargada de crear las vistas en tiempo real, con el objeto de que esté disponible para las consultas; esto simplifica el trabajo realizado en la arquitectura lambda.

La idea planteada se basa, primero que todo, en no modificar los datos de entrada, con el propósito de que si se requiere hacer un reproceso se cuente con ellos, tal cual se necesita. Al tener únicamente un flujo de procesamiento (*stream*), el manejo y el mantenimiento del procesamiento serán mucho más sencillos. Eso sí, los datos se deberán almacenar en una herramienta tipo Kafka, es decir, una herramienta que permita retener el registro completo de los datos de entrada y aún más si este tiempo de retención es personalizable, lo que permite hacer los reprocesos cuando sea necesario. Con esto, la arquitectura Kappa busca simplificar a la hora de construir las plataformas para el análisis de datos en tiempo real.

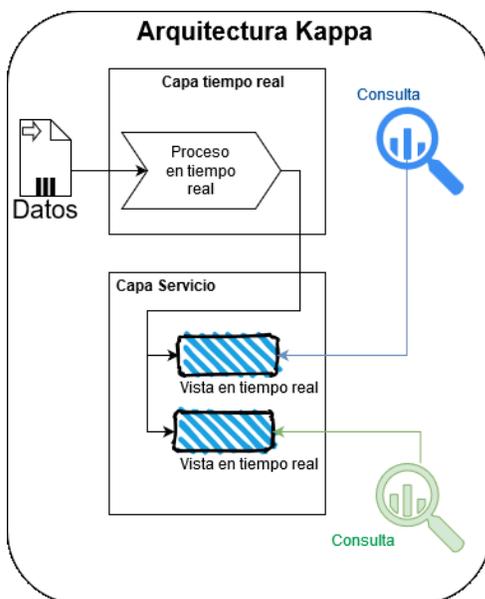


Figura 2. Diagrama de la arquitectura Kappa [3].

## Criptomonedas

Una criptomoneda es un sistema de intercambio de *tokens* entre usuarios, respaldado y matemáticamente verificable en virtud de los mismos principios criptográficos que subyacen al cifrado en internet. Las criptomonedas se implementan típicamente como sistemas distribuidos (*peer-to-peer*), basados en las mismas tecnologías *blockchain* y que tienen el potencial de revolucionar los sistemas monetarios, financieros y de pago [19, 22].

Desde el año 2009, la economía mundial ha venido adoptando las criptomonedas como una parte de la economía; aunque todavía falta mucho para llegar a ser una realidad, poco a poco esta tecnología irá ganando adeptos.

Con *Bitcoin white*, de Satoshi Nakamoto [17], y el inicio de la red *peer-to-peer* de bitcoin, las criptomonedas han surgido como fenómenos tanto tecnológicos como económicos, atrayendo inversiones valoradas en billones de dólares a escala global. La tecnología *blockchain* tiene generalmente características claves de descentralización, persistencia, anonimato y auditabilidad [18].

En [22] se habla sobre el origen de las criptomonedas, las cuales nacen por la crisis de liquidez en los mercados financieros del 2009, cuando se publica un artículo de nueve páginas en un foro de internet titulado “Bitcoin: un sistema de dinero electrónico de igual a igual”. Este artículo sería el empujón inicial para la creación de la primera criptomoneda, el bitcoin, basada en *blockchain*. En [33] se puede evidenciar la larga relación entre *blockchain* y *big data*.

## ESTADO DEL ARTE

Horvat [6] ha utilizado la arquitectura Lambda como su eje central, enfocada en el procesamiento de datos en tiempo real de criptomonedas, teniendo en cuenta los siguientes factores: monitoreo en tiempo real de eventos de *blockchain*, estadísticas de minería, tendencias de compra y venta de criptomonedas, así como eventos de redes sociales relacionados con la reputación de criptomonedas.

Estos factores generan, por un lado, una necesidad de procesar datos históricos por el tema de estadísticas de minería, motivo por el cual se requieren ejecuciones *batch*, y por otro lado, la urgencia de procesar datos en tiempo real de los eventos de *blockchain*, redes sociales y tendencias; esta necesidad hace que la arquitectura

que mejor se acople sea la Lambda, para tener menor latencia, por sus capas *batch*, velocidad y servicio.

A renglón seguido (figura 3) se puede observar la arquitectura propuesta por Horvat, que tiene una gran similitud con la arquitectura Lambda (figura 1): las mismas capas *batch*, velocidad y servicio.

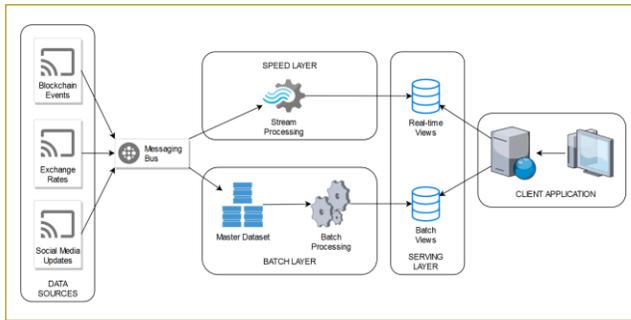


Figura 3. Arquitectura propuesta en [6].

El primer componente propuesto en esta arquitectura es la fuente de datos, conformada por las transacciones pendientes enviadas recientemente, los nuevos bloques agregados al *blockchain*, los datos de intercambio de criptomoneda en tiempo real relacionados con el precio de ésta, las menciones de la criptomoneda en las redes sociales como Twitter y Reddit, y datos no relacionados directamente con la criptomoneda, pero que pueden afectar datos de la bolsa global y cambios en el precio del petróleo.

Como una pequeña variación o paso intermedio a la arquitectura lambda, se ha decidido utilizar un bus de mensajería para recibir la información. Se emplea Kafka como plataforma de mensajería distribuida, tolerante a fallas y rápida mediante técnicas de partición y paralelización; ésta será la responsable de recibir la información que llega y transmitirla a las capas *batch* y de velocidad.

La información en la capa *batch* se almacenará en HDFS, el sistema de archivos de Hadoop, ya que es distribuido, escalable, portátil y tolerante a fallas; para procesar los datos dentro de la misma capa se usa Spark.

Por el camino de *real-time*, los datos llegan a la capa de velocidad bajo Spark Streaming o Kafka Streams, que permite una capacidad de procesamiento escalable y de alto rendimiento en la transmisión de datos; ahí también se hacen procesamientos como filtrado, mapeo, agregación, cruces y uniones.

Y por último, la capa de servicio, en la que se ha decidido utilizar Apache Druid (sistema de administración

de bases de datos orientado a columnas y distribuido de código abierto, que combina ideas de bases de datos analíticas, bases de datos de series de tiempo y sistemas de búsqueda para habilitar casos de uso en arquitecturas de transmisión) [6], como base de datos para almacenar los registros de datos requeridos de las vistas *batch* y en tiempo real. Esta capa de servicio debe garantizar una rápida consulta de los datos, con el beneficio de poder mezclar tanto las consultas *batch* como las consultas en tiempo real.

Se ha detallado la implementación de algunas herramientas, para plasmar la arquitectura lambda en el problema; cabe aclarar que estas herramientas nombradas no son ni las mejores, ni las más utilizadas, ni las únicas. Esta referencia encontrada decidió emplearlas y cumple a cabalidad con lo requerido en la arquitectura.

En [19] utilizan redes sociales e información de la Deep Web como fuente de datos; su arquitectura se centra en una herramienta para el procesamiento de lenguaje natural (PLN), a partir de los orígenes de información. Los datos recibidos pasan por GATE (*General Architecture for Text Engineering*), una plataforma para la creación rápida de prototipos de aplicaciones de PLN, la cual será la encargada de mostrar los resultados a dichos análisis.

Lo mismo sucede con [20], que utiliza el análisis de sentimientos en las redes sociales y determina la correlación entre ésta y las criptomonedas.

En [21] se puede encontrar un tema un poco distinto, pero muy relacionado con el caso de uso; dentro de su arquitectura se define un componente de análisis predictivo, puesto que se emplean redes neuronales convolucionales. Sus orígenes de datos son el precio histórico de un conjunto de activos financieros y precios de criptomonedas.

En [23] se plantea una plataforma de predicción de precios de criptomonedas en tiempo real y adaptativa, basada en los sentimientos de Twitter. La arquitectura propuesta se fundamenta en tres puntos principales (figura 4). El primero es una capa basada en Spark, que maneja el gran volumen de datos entrantes de manera persistente y tolerante a fallas; el segundo es un enfoque que respalda el análisis de sentimientos que puede responder a grandes cantidades de consultas de procesamiento del lenguaje natural en tiempo real, y el tercero es un método predictivo, fundado en el aprendizaje en línea. Se plantean dos grandes flujos dentro

de la arquitectura; por un lado, se tiene la parte de datos históricos en la parte inferior de la figura siguiente (figura 4), los cuales pasan por un procesamiento de datos, encargado de enriquecer la información; posteriormente llegan al componente del modelo predictivo, para finalizar en la capa de actualización del modelo de datos en tiempo real.

Por otro lado, encontraremos el flujo de información de tiempo real (Twitter + *currency data stream*), pasa por Vader y llega a la parte de actualización del modelo de datos en tiempo real, donde se encuentra con los datos históricos, para posteriormente estar disponibles en la capa de visualización.

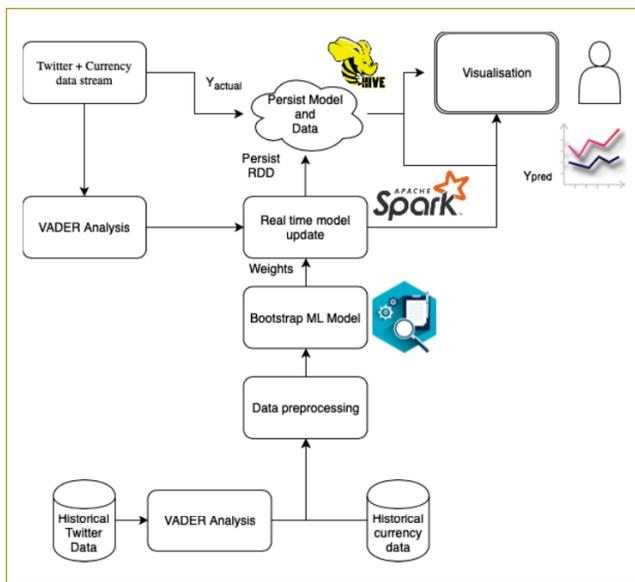


Figura 4. Arquitectura de KriptoOracle [23].

En el artículo [24] de Ayvaz se tomó como caso de estudio la relación entre las opiniones públicas en las redes sociales sobre las criptomonedas y los cambios en sus precios, utilizando enfoques de análisis de sentimiento basados en el léxico, con el objetivo de evaluar la viabilidad de predecir los precios de las criptomonedas.

Para esto proponen una clase de arquitectura (figura 5), y se determina como origen de información la red social Twitter, una capa de *streaming* (*data streaming layer*), que funcionará con la herramienta Spark Streaming, la cual permite el procesamiento de datos escalable, de alto rendimiento y tolerante a fallas en tiempo real, así como una capa de procesamiento (*data processing layer*).

Acá se utilizarán dos herramientas. Por una parte, se tiene Hive, que es un *software* de almacenamiento de

datos que simplifica la escritura, lectura y gestión de grandes conjuntos de datos en almacenamientos distribuidos, y por otra parte está Apache Spark, que es un marco computacional distribuido para el procesamiento de grandes datos; hay una capa de almacenamiento (*data storage layer*) que utilizará la herramienta HDFS (*Hadoop Distributed File System*), la cual es un sistema de archivos distribuido, altamente tolerante a fallas, que maneja grandes conjuntos de datos, y otra capa de visualización (*view layer*), que será la encargada de mostrar los resultados de los procesamientos; para esto han planteado la utilización de la herramienta Zeppelin, que es un *notebook* de código abierto basado en la web que permite la ingesta, el descubrimiento, el análisis y la visualización de la analítica de datos.

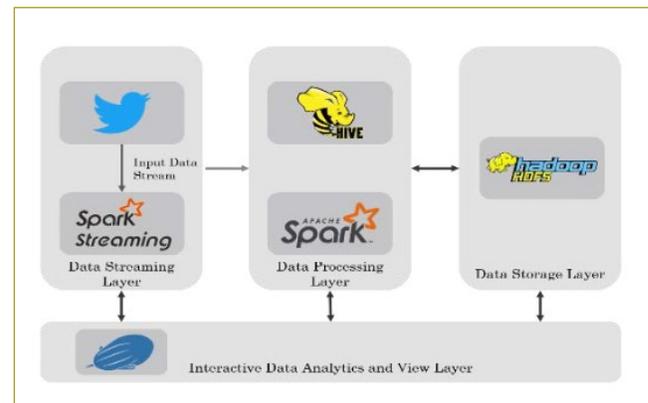


Figura 5. Arquitectura propuesta en [24].

En artículos como [31, 32] se busca consolidar información entre *big data* y criptomonedas o *blockchain*; aunque no hablan de arquitecturas específicas, ayudan a entenderlas, puesto que presentan soluciones novedosas asociadas con algunas de las áreas de *big data* que se pueden potenciar por medio de la tecnología *blockchain*, realizando una revisión sistemática de las interacciones entre *big data* y criptomonedas, y servir como un directorio de referencia.

Si bien en el artículo se pretende revisar arquitecturas *big data* para el análisis de datos en tiempo real en el contexto de criptomonedas, se quiere dejar en evidencia que éste no es el único ámbito en el que se pueden aplicar tales arquitecturas, ya que existen otros tipos de aplicaciones; por ejemplo, en [4] se emplea en el contexto de restaurantes, y en [34] el ámbito de aplicabilidad es con sensores IoT, lo que abre muchos

caminos, como en ciudades inteligentes [36], temas de salud con dispositivos médicos [37] y temas de *marketing* [35], pero todavía hay muchos ámbitos en los que se pueden utilizar.

## ANÁLISIS COMPARATIVO

Encontrar un estándar para dicho problema no es nada sencillo, debido a todas las variantes que se puedan hallar en la definición de la solución, desde los orígenes de los datos, hasta las propuestas de las arquitecturas y las herramientas seleccionadas. Eso sí, las principales características que deben cumplir las arquitecturas es que deben trabajar con grandes cantidades de datos, en tiempo real y aplicadas a criptomonedas, para que la toma de decisión sea lo más cercana a la actualidad y esto, a su vez, lleva a adoptar mejores decisiones por tener la información más reciente.

Para un mejor entendimiento, se propone una categorización para el estado del arte; las arquitecturas se podrán categorizar en *real-time*, *batch*, analítica, procesamiento de lenguaje natural y seguridad.

En su artículo [6], Horvat toma como referencia la arquitectura lambda para la construcción de su solución; da una explicación clara de las herramientas que utiliza en cada una de las capas propuestas por Marz, pero hace una pequeña variación al introducir un bus de mensajería. De resto, cada capa tiene relación con una herramienta específica que cumple a cabalidad la funcionalidad propuesta en la arquitectura de referencia.

Al analizar las ventajas de la arquitectura utilizada se puede encontrar la baja latencia, gracias a la combinación del mundo *batch* y el *stream*. Por un lado, en la capa *speed* se tiene la información en tiempo real, fundamental para una arquitectura enfocada en criptomonedas, y por el otro lado, en la capa *batch* la información histórica, que por su volumen es más pesada para procesar y en herramientas *real-time* no es nada óptimo, pero eso sí, de suma importancia para la toma de decisiones en el ámbito de las criptomonedas, de acuerdo con los principales factores incidentes en el valor de las criptomonedas [5].

Así mismo, las desventajas o críticas a la arquitectura propuesta tienen que ver con el problema de administrar y mantener dos sistemas distribuidos complejos: *batch* y *streaming*. Esto lo hace estructuralmente complejo. La integración de tantas herramientas puede generar un hueco en temas de seguridad, pero los autores no

se preocupan por el manejo de este tema; además, falta un componente dentro de la arquitectura que permita un manejo de análisis predictivo, fundamental en el campo de las criptomonedas. Esta arquitectura entra en las categorías *real-time* y *batch*.

En [19] existe una ventaja, pues dentro de su arquitectura posee una herramienta para el procesamiento de lenguajes naturales, pero realmente no cumple con los principios requeridos, que sea capaz de manejar grandes cantidades de información en tiempo real. Así mismo, compararlo con alguna de las arquitecturas de referencia no tiene sentido, no encaja en ninguna de las dos, le faltan más orígenes de información para que los resultados se acerquen más a lo esperado en criptomonedas, no hay componentes de seguridad ni componentes predictivos; ésta entra en la categoría de procesamiento de lenguaje natural y *batch*.

Para [21] dentro de su arquitectura definen un componente de análisis predictivo, pues se utilizan redes neuronales convolucionales, sus orígenes de datos son el precio histórico de un conjunto de activos financieros y precios de criptomonedas. Dichos modelos pueden emplearse para predicciones usando datos históricos, pero carecen de una forma conveniente y eficiente de procesar nuevos datos en tiempo real. Se categoriza en *batch*, analítica.

Mohapatra en [23] no utiliza ninguna de las arquitecturas de referencia mencionadas en este artículo, ni lambda ni kappa; por el contrario, ha creado una arquitectura propia. Si queremos hacer una comparación entre las arquitecturas de referencia, podemos evidenciar que Mohapatra habla implícitamente de la arquitectura lambda y plantea dos flujos dentro de la arquitectura: el flujo de datos históricos, asociado a una capa *batch*, y un flujo de datos en tiempo real, asociado a la capa de velocidad de Marz.

Por el lado de datos históricos maneja el procesamiento de información, encargado de funciones como filtrado, agregación, uniones y cruces; esta información pasa por un componente clave de los modelos predictivos, tan necesarios para el análisis de las criptomonedas. Por último, tiene un componente de visualización asociado a la capa de servicio en la arquitectura lambda.

Esta arquitectura maneja componentes históricos y en tiempo real, lo que ayuda a que la información obtenida sea más precisa y, sobre todo, más rápida de consultar; además, hace hincapié en algo a lo que ningun-

na otra referencia le ha dado la suficiente importancia: el componente predictivo dentro de la arquitectura.

Al igual que en las otras arquitecturas, falta la seguridad dentro de ésta, que se puede categorizar en *batch*, *real-time* y analítica.

Ayvaz en [24], aun cuando no nombra la arquitectura Lambda como su referencia, hace un símil entre la arquitectura de referencia y la propuesta, y se evidencia que tiene una gran similitud. La capa de *data streaming layer* cumple la misma funcionalidad de la capa de velocidad de Lambda, esto es, se procesa toda la información que va llegando en tiempo real.

Una de las diferencias es la capa *data storage layer*. Marz no propone una capa específica para esta acción, sino que afirma que dentro de la capa *batch* se encuentra este almacenamiento de los datos. Por lo tanto, si se ve como una sola capa, la similitud con esta arquitectura de referencia es aún mayor.

La capa *data processing layer* cumple la misma función de la capa *batch*; en ésta se procesa toda la información necesaria para poder hacer todo el análisis del caso de uso propuesto. Por otro lado, la *view layer* se compara con la capa de servicio de Lambda, puesto que será la encargada de visualizar la información gracias al procesamiento *batch* y al procesamiento *stream*.

La simplicidad es una de las ventajas de la arquitectura propuesta. Se tiene una capa para el procesamiento *batch*, otra para *stream*, otra de almacenamiento y otra de visualización. Una desventaja es la falta de componente predictivo, de seguridad; una capa exclusiva para el almacenamiento es muy grande, por lo que debe estar intrínseco en la capa *batch*. Se categoriza en *real-time* y *batch*.

Este análisis comparativo, sumado al estado del arte, lleva a evidenciar la falta de bibliografías en la que se utilice la arquitectura Kappa como referencia para las arquitecturas *big data* para el análisis de datos aplicado a criptomonedas.

Pese a que se supone que Kappa es una simplificación de lambda, no siempre constituye una solución viable para todos los casos, y este es uno de ellos; depende de factores como el tipo de procesamientos simultáneos de los datos que se pretenden realizar. Cuando se analizan criptomonedas, hay que validar tanto datos históricos como datos recientes; esto hace que la arquitectura Lambda sea la predilecta, pues combina los paradigmas *batch* y *stream*.

Por otro lado, la importancia de la latencia para los actores implicados es fundamental, especialmente en un ámbito como el de las criptomonedas, en el que se requiere tener la información demasiado rápido para la toma de decisiones.

## CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Los resultados del procesamiento de datos en tiempo real pueden producir una ganancia económica potencial al predecir las fluctuaciones de precios, a causa de la naturaleza volátil de las criptomonedas; esto motiva a encontrar la arquitectura más adecuada para procesar cantidades tan grandes de datos, sobre todo en tiempo real, debido a la necesidad que tienen los expertos de monitorear y analizar algunos tipos de eventos relacionados con el mercado de estas monedas, para la toma de decisiones fundadas en información en tiempo real.

Las arquitecturas de referencia lambda y kappa tienen sus pros y sus contras, pero lo que sí hay que destacar es que ambas satisfacen la necesidad del análisis de datos en tiempo real. Para el caso de las criptomonedas, la arquitectura más acorde es lambda, por lo siguiente: si analizamos cuáles son los principales factores que afectan los precios de las criptomonedas tenemos, por un lado, la oferta y la demanda. Sobre esto necesitamos observar transacciones históricas y en tiempo real, los sentimientos de pánico, pesimismo, escepticismo, optimismo y euforia, así como la opinión de las personas; será fundamental conocerlos en tiempo real.

Por otro lado, tenemos el análisis del mercado, que también es un factor determinante, puesto que servirá para evaluar el precio actual y el precio histórico de las criptomonedas; todos estos atributos conducen a la necesidad de que se maneje el procesamiento *batch* para temas históricos, ya que se requiere procesar grandes cantidades de datos y procesamiento *stream*, al igual que procesar la información en tiempo real. Lambda utiliza estos dos paradigmas y por eso la mayoría de las referencias se inspiran en esta arquitectura.

La investigación hecha dejó como resultado que existe una gran falencia a la hora de trabajar las arquitecturas *big data* aplicadas a criptomonedas en un componente fundamental: la seguridad. Ninguno de los autores se preocupa por tratar la seguridad dentro de las arquitecturas, como si éste no fuera un tema clave; hay que reconocer que la seguridad debe ser un tema transversal

a toda la arquitectura, que debe estar presente en cada una de las capas y entre sus interconexiones.

Otro asunto muy asociado es la privacidad de la información, aspecto que los autores tampoco trataron, razón por la cual resulta indispensable validar este tema como trabajo futuro y evaluar hoy en día qué tendencias se están tratando en esta clase de arquitecturas para controlar la seguridad.

Así mismo, las arquitecturas *big data* y las criptomonedas requieren un componente importante que también se le resta importancia en las arquitecturas descritas en el estado del arte: la capa predictiva, estas arquitecturas deberían utilizar más la inteligencia artificial [31], como uno de los componentes principales, temas como *machine learning*, *deep learning* y análisis predictivo deberán cobrar más importancia en los planteamientos futuros.

Otra de las falencias evidenciadas tiene que ver con la veracidad de las fuentes de información, que si bien no están completamente relacionadas con las arquitecturas, es importante nombrar el tema, puesto que forma parte del flujo en toda la arquitectura, y más cuando estas arquitecturas, aplicadas al contexto de criptomonedas, requieren información como redes sociales para el análisis de sentimientos. Por todo esto, tales arquitecturas deben preocuparse un poco más respecto a los orígenes de la información.

Otro punto para un trabajo futuro es el referente al despliegue de las arquitecturas, en especial lo relacionado con hallar el mejor lugar para desplegarlas, debido a la variedad de opciones que hoy en día se presentan.

En ese orden de ideas, la computación en la nube nos abre muchas puertas para llegar a implementar dichas arquitecturas y poder ir escalando tanto horizontal como verticalmente, además de todo lo que nos puede ofrecer; por ejemplo, infraestructura como servicio, plataforma como servicio y *software* como servicio, sin mayor desgaste. Así mismo, hay que evaluar cuál será la mejor opción, si una arquitectura en nube híbrida, en nube pública, en nube privada u *on premise*.

En virtud de todo ese análisis, se ha decidido proponer una arquitectura en la que se puedan evidenciar todas las capas y componentes requeridos para el análisis de datos en tiempo real, aplicada a criptomonedas.

La figura siguiente (figura 6) se basa en la arquitectura Lambda como fuente de inspiración, incluyendo dos componentes adicionales. Por un lado, la capa predictiva necesaria para todos los análisis, en la que se podrán

hacer modelos predictivos, aprendizaje automático, análisis de sentimientos, entre otros; es un componente muy potente para este tipo de arquitecturas. Y, por otro lado, está la capa de seguridad, transversal a toda la arquitectura. De resto se utilizará la capa *batch*, la capa *streaming* o velocidad y la capa de servicio que propone N. Marz. Esta arquitectura cumpliría a cabalidad con lo requerido en este contexto de criptomonedas.

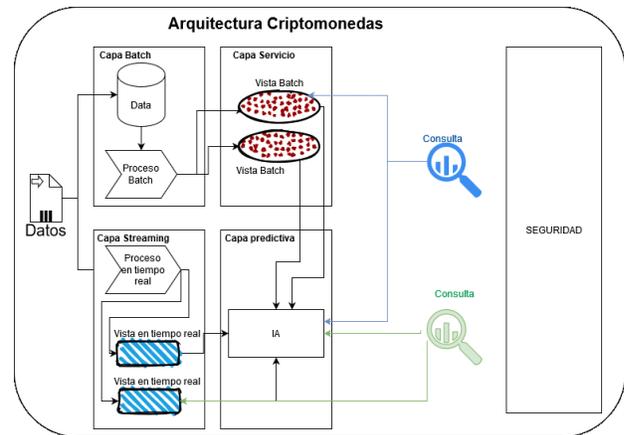


Figura 6. Arquitectura de criptomonedas propuesta.

Las arquitecturas lambda y kappa no solo se pueden utilizar para arquitecturas relacionadas con criptomonedas. En cualquier trabajo que requiera análisis de grandes cantidades de datos en tiempo real se puede elegir alguna de éstas para implementar o para basarse como arquitecturas de referencia.

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

## REFERENCIAS

- [1] Marz, N. (2011, octubre). How to beat the CAP theorem [en línea]. <http://nathanmarz.com/blog/how-to-beat-the-cap-theorem.html> [último acceso: 01/11/2020].
- [2] Feick, M., Kleer, N. & Kohn, M. (2018). Fundamentals of real-time data processing architectures lambda and kappa. Lecture Notes in Informatics (LNI), 1.
- [3] Kreps, J. (2014, julio). Questioning the lambda architecture. O'Reilly [en línea]. <https://www.oreilly.com/radar/questioning-the-lambda-architecture/> [último acceso: 21/11/2020].

- [4] Lee, C.-H. & Lin, C.-Y. (2017). Implementation of lambda architecture: a restaurant recommender system over Apache Mesos. IEEE 31st International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA). Taipéi.
- [5] Godoy, G. (2020). ¿Qué es lo que mueve el precio del bitc in?  Cu al es el factor más importante? [en línea]. <https://es.cointelegraph.com/news/what-drives-the-price-of-bitc oin-whats-the-most-important-factor> [ ltimo acceso: 30/ 11/2020].
- [6] Horvat, N., Ivkovi c, V., Todorovi c, N., Ivan evi c, V., Gajic, D. & Lukovi c, I. (2020). Big data architecture for cryptocurrency real-time data processing. ICIST 2020 - 10th International Conference on Information Society and Technology. Kopaonik, 2020.
- [7] Verrilli, M. (2017, agosto). De lambda a kappa: guía sobre arquitecturas de big data en tiempo real. Talend [en línea]. <https://www.talend.com/es/blog/2017/08/28/lambda-kappa-real-time-big-data-architectures/> [ ltimo acceso: 21/11/2020].
- [8] Balkenende, M. (2018, junio). The big data debate: batch versus stream processing. The New Stack [en línea]. <https://thenewstack.io/the-big-data-debate-batch-processing-vs-streaming-processing/> [ ltimo acceso: 21/11/2020].
- [9] Laney, D. (2001). 3D Data management: controlling data volume, velocity, and variety. META Group.
- [10] Barranco Fragoso, R. (2012, junio).  Qu e es big data? IBM [en línea]. <https://developer.ibm.com/es/articles/que-es-big-data/> [ ltimo acceso: 21/11/2020].
- [11] Microsoft (2015).  Qu e es eso llamado big data? 24/08/2015 [en línea]. <https://news.microsoft.com/es-xl/que-es-eso-llamado-big-data/> [ ltimo acceso: 23/ 11/2020].
- [12] Oracle (2020).  Qu e es big data? [en línea]. <https://www.oracle.com/co/big-data/what-is-big-data.html> [ ltimo acceso: 23/11/2020].
- [13] Vaseekaran, G. (2017). Big data battle: batch processing vs. stream processing. 21/10/2017 [en línea]. <https://medium.com/@gowthamy/big-data-battle-batch-processing-vs-stream-processing-5d94600d8103> [ ltimo acceso: 23/11/2020].
- [14] Domínguez, J. (2018). De lambda a kappa: evolución de las arquitecturas big data [en línea]. <https://www.paradigmadigital.com/techbiz/de-lambda-a-kappa-evolucion-de-las-arquitecturas-big-data/> [ ltimo acceso: 23/11/2020].
- [15] Vera-Tudela, B. (s.f.). Arquitectura lambda: combinando lo mejor de dos mundos. SG [en línea]. <https://sg.com.mx/revista/52/arquitectura-lambda-combinando-lo-mejor-dos-mundos> [ ltimo acceso: 21/11/2020].
- [16] Bryan, P. (2018, noviembre). Big data y la arquitectura lambda [en línea]. <https://medium.com/big-data-world/big-data-y-la-arquitectura-lambda-f571e117670a> [ ltimo acceso: 23/11/2020].
- [17] Nakamoto, S. (2008). Bitc in: a peer-to-peer electronic cash system.
- [18] Zheng, Z., Xie, S., Dai, H., Chen, X. & Wang, H. (2017). An overview of blockchain technology: architecture, consensus, and future trends. 6th IEEE International Congress on Big Data. Honolulu.
- [19] Laskowski, L. & Kim, H. (2016). Rapid prototyping of a text mining application for cryptocurrency market intelligence. 5th IEEE International Workshop on Data Integration and Mining (IEEE DIM). Pittsburgh.
- [20] Dulau, T. & Dulau, M. (2019). Cryptocurrency: sentiment analysis in social media. Acta Marisiensis. Serie Technologica, XVI (2), 1-6.
- [21] Jiang, Z. & Liang, J. (2017). Cryptocurrency portfolio management with deep reinforcement learning. 2017 Intelligent Systems Conference (IntelliSys). Londres.
- [22] Ordinas, M. (2017). Las criptomonedas:  oportunidad o burbuja? Palma de Mallorca: Banca March.
- [23] Mohapatra, S., Ahmed, N. & Alencar, P. (2019). KryptoOracle: a real-time cryptocurrency price prediction platform using twitter sentiments. 2019 IEEE International Conference on Big Data (Big Data). Los  ngeles.
- [24] Ayvaz, S. & Shiha, M. (2018). A scalable streaming big data architecture for real-time sentiment analysis. Proceedings of the 2018 2nd International Conference on Cloud and Big Data Computing (ICCBDC'18). Nueva York.
- [25] CoinMarketCap (2020, noviembre) [en línea]. <https://coinmarketcap.com/es/> [ ltimo acceso: 30/11/2020].
- [26] Reiff, N. (2020, enero). The 10 most important cryptocurrencies other than bitc in [en línea]. <https://www.investopedia.com/tech/most-important-cryptocurrencies-other-than-bitc oin/> [ ltimo acceso: 30/11/2020].
- [27] Charts, Y. (2020, noviembre). Ethereum transactions per day [en línea]. [https://ycharts.com/indicators/ethereum\\_transactions\\_per\\_day](https://ycharts.com/indicators/ethereum_transactions_per_day) [ ltimo acceso: 30/ 11/2020].
- [28] Bass, L., Clements, P. & Kazman, R. (2003). Arquitectura de software. Boston: Addison Wesley.
- [29] Marz, N. & Warren, J. (2015). Big data: principles and best practices of scalable real time data systems. Nueva York: Manning Publications Co.
- [30] Demchenko, Y., Laat, C. de & Membrey, M. (2014). Defining architecture components of the Big Data Ecosystem. International Conference on Collaboration Technologies and Systems (CTS). Minne polis: IEE.
- [31] Hassan, H., Huang, X. & Silva, E. (2018). Big-crypto: big data, blockchain and cryptocurrency. Big Data and Cognitive Computing, 2(4), 34.
- [32] Karafiloski, E. & Mishev, A. (2017). Blockchain solutions for big data challenges: a literature review. IEEE Eurocon 2017-17th International Conference on Smart Technologies. Ohrid.
- [33] Deepa, N., Pham, Q.-V., Nguyen, D. C., Bhattacharya, S., Boopathy, P., Gadekallu, T. R., Reddy, P. K., Fang, F. & Pathirana, P. N. (2020). A survey on blockchain for big data: approaches, opportunities, and future directions. ACM Comput. Surv. 1(1).
- [34] Ullah Rathore, M. M., Paul, A., Ahmad, A., Chen, B.-W., Huang, B. & Ji, W. (2015). Real-time big data analytical architecture for remote sensing application. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 8, 4610- 4621.
- [35] Jabbar, A., Akhtar, P. & Dani, S. (2020). Real-time big data processing for instantaneous marketing decisions: a problematization approach. Industrial Marketing Management, 90 (1), 558-569.
- [36] Silva, B. N., Khan, M., Jung, C., Seo, J., Muhammad, D., Han, J., Yoon, Y. & Han, K. (2018). Urban planning and smart city decision management empowered by real-time data processing using big data analytics. Sensors, 18.
- [37] Chrimes, D., Kuo, M.-H., Moa, B. & Hu, W. (2017). Towards a real-time big data analytics platform for health applications. International Journal of Big Data Intelligence, 4(2).



# 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](mailto: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](mailto: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](http://www.4-72.com.co)