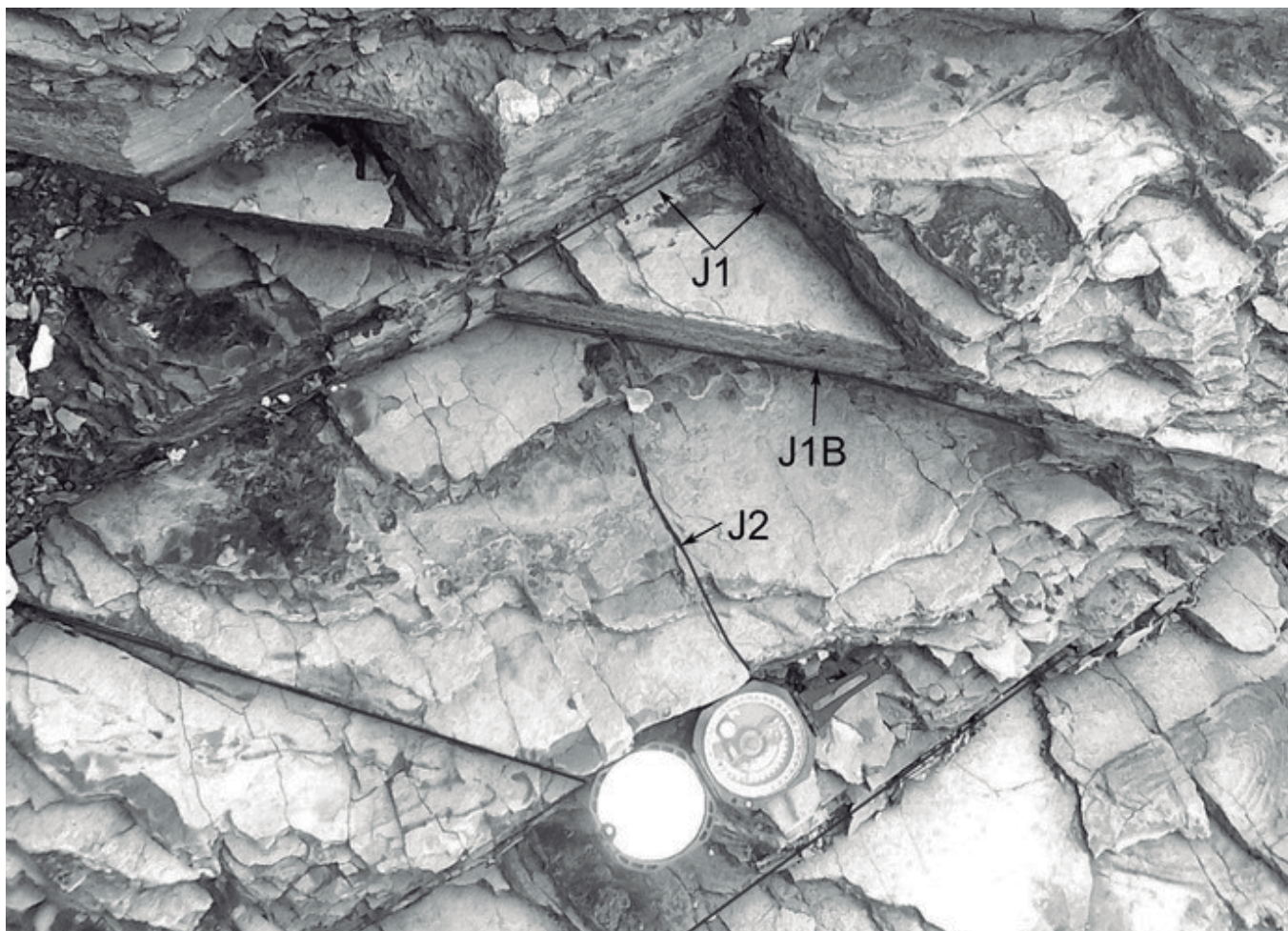


BOLETÍN DE CIENCIAS DE LA TIERRA

No. 39, Enero de 2016

ISSN 0120 - 3630



Patrón de fracturamiento al norte del Lineamiento de Zipaquirá
Helbert García & Giovanni Jiménez

TARIFA POSTAL REDUCIDA No. 2015-456 . 4-72
La Red Postal de Colombia, vence 31 de Dic. 2016



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

DEPARTAMENTO DE GEOCIENCIAS Y MEDIO AMBIENTE



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

BOLETÍN DE CIENCIAS DE LA TIERRA

Número 39, Enero de 2016

Publicación del Departamento de Geociencias y Medio Ambiente
Programa Curricular de Ingeniería Geológica
FACULTAD DE MINAS - UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
ISSN 0120 - 3630

Boletín de Ciencias de la Tierra es una publicación creada en 1978, del Programa Curricular de Ingeniería Geológica, Departamento de Geociencias y Medio Ambiente de la Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. La revista publicará artículos originales resultados de investigación en las diferentes áreas de las geociencias y pretende dinamizar la discusión científica en torno al conocimiento del territorio colombiano, sus recursos y restricciones. Se publicaran tanto artículos de análisis específicos como de interés regional, que promuevan el desarrollo de las Ciencias de la Tierra.

Boletín de Ciencias de la Tierra es una publicación dirigida a investigadores e interesados en las áreas de las geociencias y la ingeniería. Publica artículos sobre las siguientes áreas:

- | | | |
|---------------|---|-----------------|
| • Geodinámica | • Geología regional | • Paleontología |
| • Geofísica | • Geomorfología | • Vulcanología |
| • Georecursos | • Geotecnia | • Estratigrafía |
| • Geografía | • Geología ambiental | • Petrografía |
| • Mineralogía | • Aprovechamiento y explotación de recursos | • Petrofísica |
| • Geomecánica | | |

Boletín de Ciencias de la Tierra publicará dos números en el año con editorial, artículos de investigación, ensayos, comunicaciones breves e imágenes diagnósticas. Los artículos enviados deberán ser siempre originales y no estar sometidos a otra publicación; todos los artículos se someten a revisión por pares o árbitros académicos de conocida idoneidad en el tema.

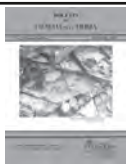
La orientación general para la presentación de artículos e información interesante se puede encontrar en la dirección electrónica:

http://www.minas.medellin.unal.edu.co/index.php?option=com_content&view=article&id=96:boletde-ciencias-de-la-tierra-&catid=43:revistas-&Itemid=215. Los correos electrónicos de la revista son: rbct_med@unal.edu.co, Teléfono y Fax: (57-4) 425 53 43

Foto carátula: Figura 6.

Artículo: Structural analysis of the Zipaquirá Anticline (Eastern Cordillera, Colombia)

Autores: Helbert García & Giovanni Jiménez



Revista indexada en:

Índice Nacional de Publicaciones Seriadas Científicas y Tecnológicas de COLCIENCIAS - Publindex, en Categoría A2.

Georef

SciELO - Scientific Electronic Library Online

Índice Actualidad Iberoamericana, del Instituto Iberoamericano de Información en Ciencia y Tecnología de Chile.

Base de Datos Periódica de La Universidad Nacional Autónoma de México.

Redalyc, Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal.

BOLETÍN DE CIENCIAS DE LA TIERRA

ISSN 0120 - 3630

Periodicidad semestral: Julio y Diciembre

Tarifa Postal Reducida No. 2015-456 . 4-72 La Red Postal de Colombia, vence 31 de Dic. 2016

Carrera 80 No. 65 - 223

Facultad de Minas - Bloque M9 - Of.: 107

Medellín - Colombia

Teléfono: (57+4) 425 53 43, Fax: (57+4) 425 53 43

e-mail: rbct_med@unal.edu.co

VERSIÓN ELECTRÓNICA DISPONIBLE EN:

<http://www.scielo.org.co/scielo.php>

<http://revistas.unal.edu.co/index.php/rbct>

http://intranet.minas.medellin.unal.edu.co/index.php?option=com_docman&task=cat_view&gid=47&Itemid=57

SE SOLICITA CANJE - EXCHANGE SOLICITED

Los pedidos de esta serie de publicaciones en Suscripción y/o Canje, pueden ser solicitados a:

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Biblioteca Facultad de Minas - Bloque M5

Carrera 80 No. 64 - 223

Teléfonos: (57+4) 425 53 43, 430 97 86 Medellín - Colombia

Correo Electrónico: canje@unal.edu.co

DIRECTOR

JUAN DAVID VELÁSQUEZ HENAO

Departamento de Ciencias de la Computación y de la Decisión - Facultad de Minas
Universidad Nacional de Colombia, Medellín

COMITÉ EDITORIAL

MARION WEBER S.

Departamento de Geociencias y Medio Ambiente - Facultad de Minas
Universidad Nacional de Colombia, Medellín

ANTONIO ROMERO H.

Departamento de Geociencias y Medio Ambiente - Facultad de Minas
Universidad Nacional de Colombia, Medellín

SERGIO LOPERA C.

Departamento de Procesos y Energía - Facultad de Minas
Universidad Nacional de Colombia, Medellín

JOHN WILLIAN BRANCH B.

Departamento de Ciencias de la Computación y de la Decisión - Facultad de Minas
Universidad Nacional de Colombia, Medellín

GLORIA TORO V.

Departamento de Geología

Universidad EAFIT

GIOVANNI FRANCO

Departamento de Materiales y Minerales - Facultad de Minas

Universidad Nacional de Colombia, Medellín

JOSÉ HUMBERTO CABALLERO ACOSTA

Departamento de Geociencias y Medio Ambiente - Facultad de Minas
Universidad Nacional de Colombia, Medellín

COMITÉ CIENTÍFICO

EDUARDO PARRA P.

INGEOMINAS Medellín

JAVIER HELENES E.

Departamento de Geología - CICESE, México

ARTURO MARTÍN

Departamento de Geología - CICESE, México

JORGE LEDESMA V.

Área de Geología - UABC, México

JEAN FRANCOIS TOUSSAINT

Colombia

RICARDO SMITH QUINTERO

Asesor externo

Grupo Centro Editorial - Facultad de Minas

Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín

Juan David Velásquez Henao, Director

Mónica Del Pilar Rada T., Coordinación Editorial

Catalina Cardona A., Asistente editorial

Byron Llano V., Asistente editorial

Amilkar David Álvarez C., Diagramación

Landsoft Ltda, Sistemas y marcación



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

BOLETIN DE CIENCIAS DE LA TIERRA



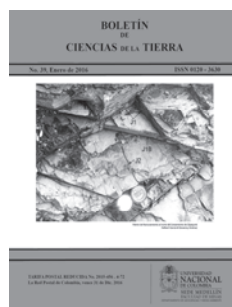
UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

CONTENT

Definition of homogeneous fertility areas through factorial and geostatistical analysis Daniel Francisco Jaramillo-Jaramillo	5
Performance mining equipment (extraction-load-transportation) in the Ernesto Guevara Factory Orlando Belete-Fuentes, Severo Estenoz-Mejía & Yoandro Diéguez-García	12
Structural analysis of the Zipaquira Anticline (Eastern Cordillera, Colombia) Helbert García & Giovanny Jiménez	21
Simulation of processing minerals plants in Colombia through MODSIM® Moisés Oswaldo Bustamante-Rúa, Alan José Daza-Aragón, Pablo Bustamante-Baena & Manuel Julián Barros-Daza	33
Aggregated conceptual model of sediment transport for mountain basins in Antioquia- Colombia Santiago Cataño-Álvarez & Jaime Ignacio Vélez-Upegui	38
Geotechnical characterization of the silt from the terrace of the municipality of Olaya in Antioquia, Colombia Óscar Echeverri-Ramírez	49
Effect of the temperature in adsorption phenomena of water onto Sub-Bituminous coal Esteban Alberto Taborda-Acevedo, William J. Jurado, & Farid B. Cortés	57

Our cover
 Image alluding to Article:
 Structural analysis of the Zipaquira Anticline (Eastern Cordillera,
 Colombia)
 Authors:
 Helbert García & Giovanny Jiménez

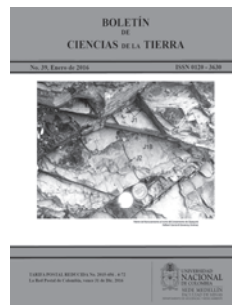


CONTENIDO

Definición de áreas homogéneas de fertilidad mediante análisis factorial y geoestadística Daniel Francisco Jaramillo-Jaramillo	5
Rendimiento del equipamiento minero de arranque-carga-transporte de la empresa Comandante Ernesto Guevara Orlando Belete-Fuentes, Severo Estenoz-Mejía & Yoandro Diéguez-García	12
Análisis estructural del Anticlinal de Zipaquirá (Cordillera Oriental, Colombia) Helbert García & Giovanny Jiménez	21
Simulación de plantas de procesamiento de minerales a través de MODSIM® Moisés Oswaldo Bustamante-Rúa, Alan José Daza-Aragón, Pablo Bustamante-Baena & Manuel Julián Barros-Daza	33
Modelo conceptual agregado de transporte de sedimentos para cuencas de montaña en Antioquia-Colombia Santiago Cataño-Álvarez & Jaime Ignacio Vélez-Upegui	38
Caracterización geotécnica de los limos de la terraza del municipio de Olaya, Antioquia, Colombia Óscar Echeverri-Ramírez	49
Efecto de la temperatura en el proceso de adsorción de agua en Carbón sub-bituminoso colombiano Esteban Alberto Taborda-Acevedo, William J. Jurado, & Farid B. Cortés	57

Nuestra carátula
Imagen alusiva al artículo:
Análisis estructural del Anticlinal de Zipaquirá
(Cordillera Oriental, Colombia)

Autores:
Helbert García & Giovanny Jiménez



Definition of homogeneous fertility areas through factorial and geostatistical analysis

Daniel Francisco Jaramillo-Jaramillo

Escuela de Geociencias, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia. djaramal@unal.edu.co

Received: October 31th, 2013. Received in revised form: October 26th, 2015. Accepted: November 3rd, 2015

Abstract

In a flat lot of 4 ha, with dry warm climate and Mollisols were determined the bulk density, pH and content of sand, silt, clay, organic matter, Ca, Mg, K and P, in the first 150mm of soil, doing a sampling in a semi-regular grid with cell size of 25 x 25m.

A factorial analysis was reduced the number of variables to two (factors). The contents of clay, Ca and Mg shaped the first factor, and the second the pH and the contents of organic matter and phosphorus. To each factor and their variables was made an analysis of semivariance and the respective map of its spatial distribution using interpolation with block kriging.

In the map of factor 1 homogeneous areas were better defined, and there was a greater spatial correlation between this map and those of their variables. The factor 2 variables presented a spatial structure in patches that not corresponded with the factor structure, making its zoning produced not adequate to establish a possible programme of fertility management with techniques of precision agriculture. The zoning which gives the factor 1 should be used for this purpose.

Key words: Semivariance, kriging, Mollisol.

Definición de áreas homogéneas de fertilidad mediante análisis factorial y geoestadística

Resumen

En un lote plano de 4 ha, con clima cálido seco y Mollisoles, se determinaron la densidad aparente, el pH, y los contenidos de arena, limo, arcilla, materia orgánica, Ca, Mg, K y P, en los primeros 150mm del suelo, haciendo un muestreo en cuadrícula semi-regular con tamaño de celda de 25x25m.

Con un análisis factorial se redujo el número de variables a dos (factores). El primer factor lo conformaron los contenidos de arcilla, Ca y Mg, y el segundo, el pH y los contenidos de materia orgánica y fósforo. A cada factor, y a las variables que lo componían, se les hizo un análisis de semivarianza y el respectivo mapa de su distribución espacial mediante interpolación con kriging en bloques.

En el mapa del factor 1 se definieron mejor las áreas homogéneas, y hubo mayor correlación espacial entre este mapa y los de sus variables. Las variables del factor 2 presentaron una estructura espacial en parches que no correspondió con la estructura del factor, haciendo que la zonificación producida por él no sea adecuada para establecer un posible programa de manejo de la fertilidad con técnicas de agricultura de precisión. Para este propósito se debe utilizar la zonificación que da el factor 1.

Palabras clave: Semivarianza, kriging, Mollisol.

1. Introducción

La geoestadística univariada permite estudiar la variabilidad espacial de variables regionalizadas individualmente. Sin embargo, hay técnicas geoestadísticas que permiten hacer dicho estudio en varios atributos del suelo simultáneamente, llevando a conocer la manera en que ellas varían conjuntamente en el espacio, conocidas como geoestadística multivariada [7,14,15,28].

Una de las aplicaciones más importantes de la geoestadística multivariada en suelos consiste en definir áreas de manejo homogéneo en campos donde se vayan a implementar programas de agricultura de precisión [2,3,5-7,15,23,24,27,29].

Una forma de estudiar de manera integrada varios atributos del suelo consiste en hacer análisis de factores entre todas las propiedades evaluadas, para luego hacer el análisis geoestadístico con los factores que se seleccionen [1,10,12,22].

[8,10,21] estudiaron y mapearon problemas de contaminación con metales pesados en suelos en el sur de Gales, noroeste de Italia y Taiwan, respectivamente, utilizando el análisis de factores y técnicas geoestadísticas.

[1] hicieron muestreos en red georreferenciados y repetidos en el tiempo, tanto de suelo como foliares, para establecer las propiedades que intervenían en la producción y calidad de la uva en un viñedo de 5 ha en España. Mediante un análisis de factores lograron agrupar, en tres factores, 16 propiedades que estaban controlando el comportamiento del viñedo. El primer factor lo conformaron 8 elementos nutritivos y el segundo tres, todos medidos en los peciolo, mientras que el tercer factor tuvo los contenidos de arcilla, limo y carbonatos en el suelo, de fósforo en peciolo y la altitud del terreno como variables interrelacionadas.

El análisis de factores es una técnica estadística multivariada que trata de establecer la estructura de las interrelaciones presentes entre un gran número de variables mediante la definición de una serie de dimensiones subyacentes comunes a ellas, llamadas **Factores** [16].

En el análisis factorial se analiza la varianza común a todas las variables. Se debe tener un número relativamente alto de observaciones, en relación con las variables estudiadas. Con frecuencia se sugiere tener alrededor de 10 observaciones por cada variable, aunque no hay un criterio unificado para esto [25]. Como norma general se recomienda un mínimo de 50 observaciones y, preferiblemente, 100 [16].

Como el análisis factorial trabaja con la varianza común a las variables, es requisito que se presenten abundantes correlaciones entre ellas. Además, las variables deben tener escala métrica y distribución normal o por lo menos simétrica [25].

Con este trabajo se quieren definir áreas homogéneas de fertilidad del suelo, dentro de un lote comercial de producción de forraje seco de 4 ha aproximadamente, utilizando el análisis de factores y algunas técnicas geoestadísticas.

2. Materiales y Métodos

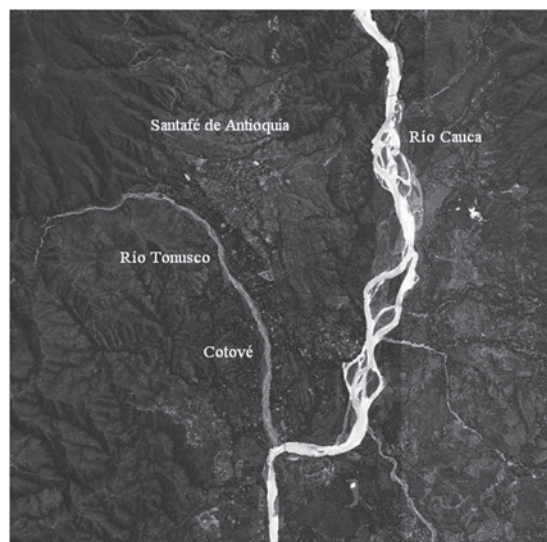
El estudio se realizó en los lotes No 3 y 4 del Centro Agropecuario Cotové de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, ubicado en el municipio de Santafé de Antioquia, vereda El Espinal (Coordenadas: 6° 31' 51,92" N, 75° 49' 45,63" W) y distante de la ciudad de Medellín 79 km (Fig. 1). Los lotes estudiados han estado dedicados a la producción de forraje desde 1985.

El Centro Agropecuario se encuentra a 565 m de altitud y presenta un clima cálido seco (bs-T) caracterizado por una temperatura promedio mensual de 27.3 °C, una precipitación promedio anual de 1019.6 mm y una evapotranspiración promedio anual de 1611 mm. El mes más lluvioso es octubre y el más seco es enero. Se presenta un déficit total de agua promedio anual de 591.4 mm. El lote experimental se ubica en una terraza aluvial plana (pendiente < 3 %) y los suelos dominantes (Fluventic Haplustoll) son de textura media a pesada, con arcillas expansibles, moderadamente profundos y de buen nivel de fertilidad.

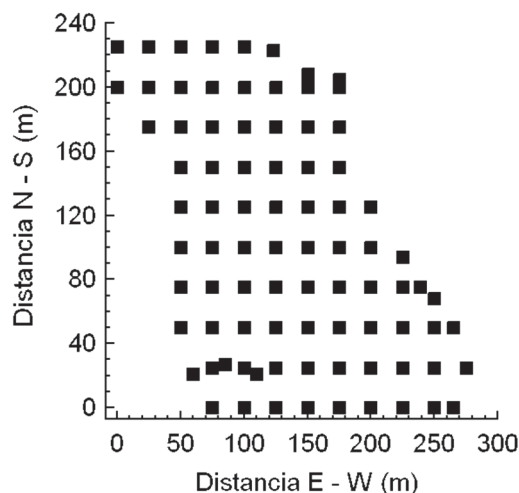
Se seleccionó una parcela de aproximadamente 4 ha en la cual se localizó una cuadrícula semi-regular con tamaño de

celda aproximado de 25 x 25 m (Fig. 1), obteniéndose una malla con 85 intersecciones que fueron georreferenciadas con un sistema de coordenadas planas (X, Y) de origen arbitrario. En cada intercepto se tomó una muestra de suelo sin disturbar, con un cilindro biselado de 95.4 cm³ de volumen, para determinar la densidad aparente (D_a), y otra muestra disturbada, con barreno, entre 0 y 150 mm de profundidad, para hacer las demás determinaciones en el laboratorio.

Con la muestra disturbada se determinó la distribución de arena (A: partículas con diámetro entre 0,05 y 2 mm), limo (L: partículas con diámetro entre 0,05 y 0,02 mm) y arcilla (Ar: partículas con diámetro < 0,002 mm) del suelo, por el método del hidrómetro. Además se determinaron el pH en agua 1:1, los contenidos de materia orgánica (MO) por el método de Walkley y Black, de calcio (Ca), magnesio (Mg) y potasio (K) intercambiables, fueron extraídos con acetato de amonio normal y neutro, y cuantificados por absorción atómica, y el fósforo disponible (P) por Bray II.



a.



b.

Figura 1. a. Localización general del sitio experimental. Fuente: Google Earth. b. Esquema de muestreo utilizado. Fuente: El autor.

Con los resultados obtenidos se hicieron análisis estadísticos exploratorios, análisis de correlación lineal entre todas las propiedades evaluadas, análisis de factores y análisis de semivarianza con los factores seleccionados [16,28]. A los factores utilizados para los análisis geoestadísticos se les confirmaron los supuestos de normalidad o de simetría, y de estacionariedad, teniendo en cuenta las metodologías descritas por [9,17-20,26]. Finalmente se hizo el mapa de los factores, mediante interpolación con kriging, para definir las áreas de manejo en el lote estudiado. Todos los análisis estadísticos se hicieron con los programas Statgraphics 5.1 plus y GS+ 9.0.

3. Resultados y Discusión

Los estadísticos que caracterizaron las propiedades evaluadas se encuentran en las Tablas 1 y 2. Los suelos, en su mayoría (según Q1), presentan textura media a pesada y tienen pH neutro, contenidos altos de materia orgánica y de bases (Ca, Mg, K) y bajo de fósforo disponible. La Da presenta un valor bajo, teniendo en cuenta la textura del suelo. Los contenidos de K y de P son las propiedades más variables, con coeficientes de variación de 36.23 % y 41.45 %, respectivamente, mientras que el pH fue la menos variable, con coeficiente de sólo 2.46 %. La distribución de los valores del pH, K y P no fue normal ni simétrica y la del L fue simétrica pero no normal. Las propiedades químicas observadas en estos suelos reflejan la escasa lixiviación que han sufrido, producto del clima cálido seco en que se han desarrollado. El alto contenido de materia orgánica puede deberse a la formación de complejos entre ésta y los minerales de arcilla que la han protegido de la mineralización.

El comportamiento de la distribución de las variables pH, K y P obligó a eliminar un valor extremo en el pH y a transformar a logaritmo el K y el P, con lo cual se consiguió que las variables tuvieran distribución normal. La A y el L no se tuvieron en cuenta para el análisis de factores, debido a la dependencia lineal que hay entre ellos y la Ar, lo que impide hacer el análisis factorial. En la Tabla 3 se presentan los coeficientes de correlación lineal (Pearson) entre las propiedades evaluadas, con la que se confirma que hay una buena cantidad de correlaciones significativas, cumpliéndose uno de los requisitos del análisis de factores [16,25].

Tabla 1.
Estadísticos básicos⁽¹⁾ de los atributos⁽²⁾ físicos del suelo evaluados (n = 85).

	A	L	Ar	Da
Media	34.66	30.82	34.52	1.11
Mediana	34.00	30.00	34.00	1.13
DE	5.72	5.33	6.22	0.14
CV (%)	16.50	17.29	18.02	12.98
Mínimo	22.00	20.00	20.00	0.85
Máximo	50.00	44.00	50.00	1.57
Q1	32.00	28.00	30.00	0.99
Q3	38.00	34.00	38.00	1.21
Sesgo	0.39	1.66	-0.09	1.72
Norm	0.28	0.025	0.127	0.052

⁽¹⁾ DE: Desviación Estándar. CV: Coeficiente de Variación. Q1: Cuartil inferior. Q3: Cuartil superior. Norm: Valor p de Shapiro-Wilks (Si Norm > 0.05, la distribución de los datos de la variable es normal).

⁽²⁾ A: Arena (%). L: Limo (%). Ar: Arcilla (%). Da: Densidad aparente (Mg m⁻³).

Fuente: El autor.

Tabla 2.

Estadísticos básicos⁽¹⁾ de los atributos⁽²⁾ químicos del suelo evaluados (n = 85).

	pH	MO	Ca	Mg	K	P
Media	6.94	4.97	24.73	10.16	0.29	9.41
Mediana	6.90	5.10	24.60	10.20	0.27	9.00
DE	0.17	0.81	3.21	1.68	0.10	3.90
CV (%)	2.46	16.36	12.99	16.52	36.23	41.45
Mínimo	6.40	2.50	19.00	6.10	0.11	4.00
Máximo	7.60	6.90	32.60	13.60	0.77	26.00
Q1	6.80	4.30	22.40	9.10	0.21	7.00
Q3	7.00	5.60	26.90	11.40	0.35	11.00
Sesgo	2.37	-0.94	1.56	-0.99	5.65	5.17
Norm	0.013	0.746	0.066	0.29	0.011	0.0002

⁽¹⁾ DE: Desviación Estándar. CV: Coeficiente de Variación. Q1: Cuartil inferior. Q3: Cuartil superior. Norm: Valor p de Shapiro-Wilks (Si Norm > 0.05, la distribución de los datos de la variable es normal).

⁽²⁾ MO: Materia orgánica (%). Ca: Calcio (cmolc kg⁻¹ suelo). Mg: Magnesio (cmolc kg⁻¹ suelo). K: Potasio (cmolc kg⁻¹ suelo). P: Fósforo (mg kg⁻¹ suelo). Fuente: El autor.

Tabla 3.

Matriz de coeficientes de correlación lineal entre todas las variables⁽¹⁾ evaluadas (los que están en negrilla son estadísticamente significativos al 95 %) (n = 84).

	A	L	Ar	pH	MO	Ca	Mg	Log K	Log P
L	-0.397	1							
Ar	-0.601	-0.495	1						
pH	-0.073	0.391	-0.271	1					
MO	0.164	-0.609	0.375	-0.501	1				
Ca	-0.391	0.021	0.353	0.073	0.053	1			
Mg	-0.325	-0.288	0.559	-0.198	0.338	0.847	1		
Log K	0.155	-0.532	0.316	-0.352	0.473	0.403	0.569	1	
Log P	-0.229	0.745	-0.432	0.222	-0.525	0.032	-0.231	-0.267	1
Da	-0.049	0.147	-0.081	0.102	-0.357	-0.246	-0.233	-0.203	0.108

⁽¹⁾ A: Arena (%). L: Limo (%). Ar: Arcilla (%). Da: Densidad aparente (Mg m⁻³). MO: Materia orgánica (%). Ca: Calcio (cmolc kg⁻¹ suelo). Mg: Magnesio (cmolc kg⁻¹ suelo). K: Potasio (cmolc kg⁻¹ suelo). P: Fósforo (mg kg⁻¹ suelo). Log: logaritmo base 10.

Fuente: El autor.

Tabla 4.

Resultados del análisis de factores con todas las variables evaluadas.

Factor número	Eigenvalor	Porcentaje de varianza	
		Explicado	Acumulado
1	3.24449	40.556	40.556
2	1.58849	19.856	60.412
3	1.00055	12.507	72.919
4	0.837828	10.473	83.392
5	0.590506	7.381	90.773
6	0.345455	4.318	95.091
7	0.313531	3.919	99.011
8	0.0791508	0.989	100.000

Fuente: El autor.

Los resultados del análisis de factores se presentan en las Tablas 4 y 5, y en la Fig. 2. Se seleccionaron los tres primeros factores que tuvieron valores propios mayores a 1 y los cuales explicaron casi el 73 % de la varianza.

Teniendo en cuenta el número de muestras, la carga factorial significativa para que una variable sea conservada en el modelo de un factor es de 0.60 [16,25], por lo que en el factor 1 (F1) se conservaron las variables Ca y Mg, el factor 2 (F2) estuvo definido por el pH, el contenido de materia orgánica y por el logaritmo de P, y el factor 3 (F3) estuvo

Tabla 5.

Matriz de cargas del factor después de una rotación varimax.

Variable ⁽¹⁾	Factor			Comunalidad	Varianza específica
	1	2	3		
Ar	0.58591	0.52098	0.2723	0.68885	0.31115
pH	0.01146	-0.70182	0.15451	0.51655	0.48345
MO	0.13775	0.80894	-0.34946	0.79548	0.20452
Ca	0.93245	-0.18753	-0.15972	0.93014	0.069857
Mg	0.93397	0.19843	-0.10246	0.92217	0.077828
Log K	0.54388	0.43952	-0.25285	0.55292	0.44708
Log P	-0.10939	-0.75351	-0.14915	0.60199	0.39801
Da	-0.15786	-0.11761	0.88695	0.82542	0.17458

⁽¹⁾ Ar: Arcilla (%). Da: Densidad aparente (Mg m⁻³). MO: Materia orgánica (%). Ca: Calcio (cmolc kg⁻¹ suelo). Mg: Magnesio (cmolc kg⁻¹ suelo). K: Potasio (cmolc kg⁻¹ suelo). P: Fósforo (mg kg⁻¹ suelo). Log: logaritmo base 10.

Fuente: El autor.

representado sólo por la Da. Debido a la alta carga que presentó la Ar en el F1, a lo cerca que está la carga del límite establecido para incorporar una variable en el factor y a la alta cantidad de correlaciones significativas que se detectaron entre ella y las demás variables (Tabla 3), se optó por incluir aquella en la definición del factor 1. Así mismo, debido a que el factor 3 sólo estuvo representado por una variable, él no se tuvo en cuenta para los análisis siguientes pues dicha característica contradice el propósito fundamental del análisis factorial [25]. Observando las variables que definen los factores 1 y 2 puede decirse que estos factores evalúan la “actividad de la fracción mineral” y la “actividad de la fracción orgánica” del suelo, respectivamente.

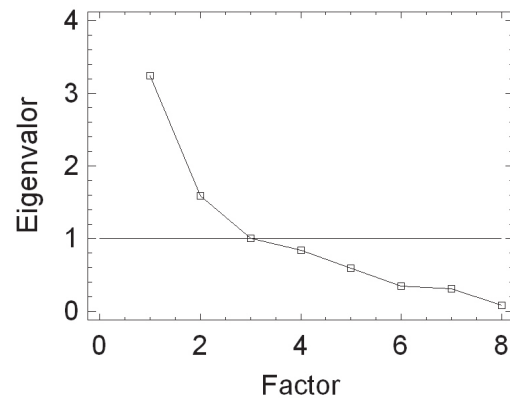
Siguiendo el criterio de autores como [10,11,24,28], quienes mostraron que los componentes principales pueden ser sometidos a análisis de semivarianza y kriging para producir mapas que, al involucrar varios atributos relacionados con la producción, representan áreas homogéneas en el campo, se procedió a desarrollar un análisis de semivarianza con los dos factores seleccionados. Para utilizar esta alternativa, cada factor debe cumplir los supuestos de normalidad, o en su defecto simetría, y estacionaridad [13,14,28]. La estacionaridad se confirmó mediante un análisis de tendencia con una regresión múltiple de segundo orden [9,17-19,26] en la que el factor fue la variable dependiente y las coordenadas (x,y) de los puntos de muestreo fueron las independientes. El análisis de regresión mostró que en ambos factores había una tendencia espacial, representada por los siguientes modelos:

$$F1 = 55.637 + 0.0841y - 0.0000931x^2 - 0.0005977y^2, R^2 = 33.00\%$$

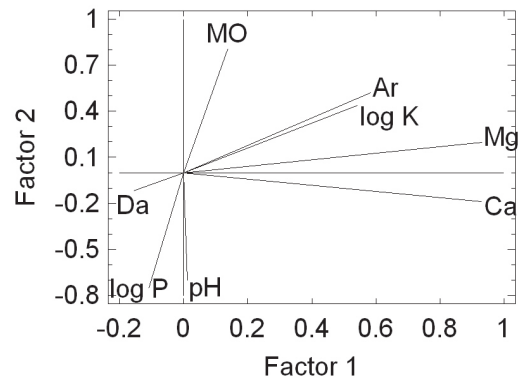
$$F2 = -2.997 + 0.019x + 0.0257y - 0.000071xy - 0.0000687x^2 - 0.0000865y^2, R^2 = 44.39\%$$

Los residuales de los modelos anteriores presentaron distribución normal y simétrica, y además tuvieron homogeneidad de varianza en las direcciones N - S y E - W, según el estadístico de Levene's, como puede verse en la Tabla 6.

Con los supuestos cumplidos, los residuales de los factores se utilizaron para hacer el análisis de semivarianza que permitió definir las áreas homogéneas buscadas. La dependencia espacial de los residuales del F1 se ajustó a un modelo esférico y la del F2 a uno exponencial (Fig. 3), modelos cuyos parámetros se dan en la Tabla 7. Según criterio de [4], con los valores de Co/Sill obtenidos, en Res F1 se presentó una dependencia espacial media y en Res F2, alta.



a.



b.

Figura 2. a. Gráfica de valores propios por factor. b. Carga factorial de las variables en los factores 1 y 2.

Fuente: El autor.

Tabla 6.

Verificación de los supuestos para el análisis de semivarianza en los residuales de los factores 1 y 2.

Variable*	Valor p de			Asimetría
	Shapiro-Wilk	Levene's N - S	Levene's E - W	
Res F1	0.794896	0.545991	0.486463	-0.203847
Res F2	0.574727	0.537722	0.523665	-0.880861

* Res: Residuales, F1: Factor 1, F2: Factor 2.

Fuente: El autor.

Con los modelos de la Fig. 3, mediante interpolación con kriging ordinario en bloques, se elaboraron los mapas de isolíneas de los factores 1 y 2 que se muestran en las Fig. 4 y 5. Con las mismas técnicas geoestadísticas utilizadas con los factores se hicieron los análisis de semivarianza de las propiedades del suelo correlacionadas con cada uno de los factores y los mapas de isolíneas de ellas se presentan acompañando el respectivo factor en las figuras mencionadas. Los mapas de los factores representan las áreas homogéneas en fertilidad delimitadas en el lote experimental.

Tabla 7.

Parámetros de los semivariogramas ajustados a los residuales de los factores 1 y 2.

Variable	Modelo	Nugget (Co)	Sill	Rango (m)	Co/Sill (%)
Res F1	Esférico	16.67	33.35	66.1	50.0
Res F2	Exponencial	0.0378	0.3276	32.4	11.5

Fuente: El autor.

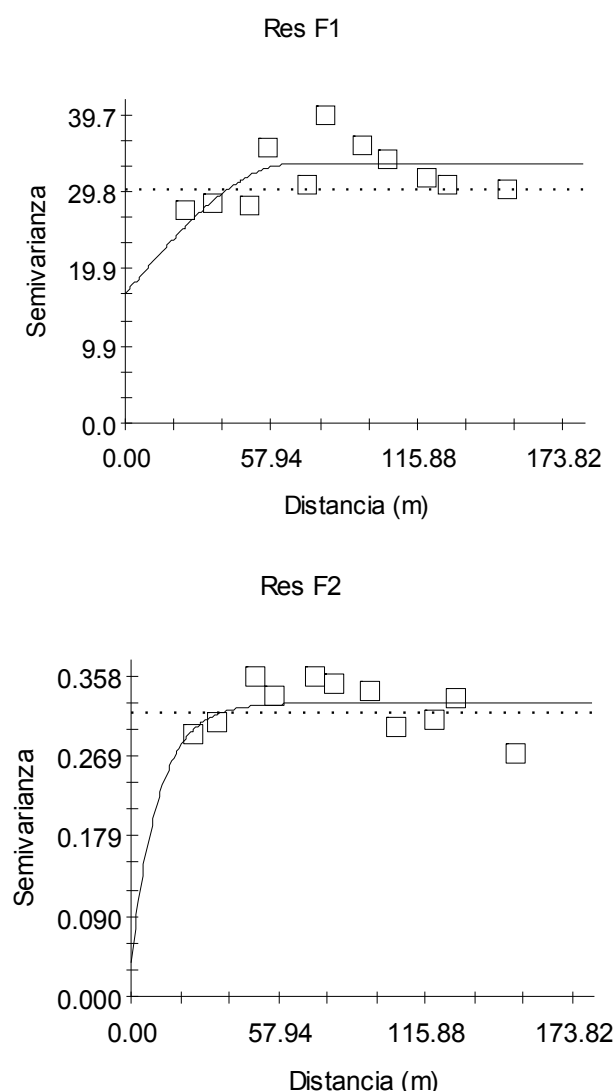


Figura 3. Semivariogramas experimentales (cuadros) y teóricos (líneas continuas) de los residuos de los factores 1 (Res F1) y 2 (Res F2).
Fuente: El autor.

En la Fig. 4 puede apreciarse la alta coincidencia que se presenta entre la estructura espacial del factor 1 y de los contenidos de Ca y Mg del suelo, producto de la alta correlación que se presentó entre estas bases y el factor (Tabla 5). La distribución espacial en parches del contenido de arcilla está corroborando la baja carga factorial que tiene esa propiedad en el factor, y hace que esta propiedad no sea adecuada para definir prácticas de manejo de la fertilidad del suelo debido a su distribución caótica en el lote.

En la Fig. 5 se observa que los contenidos de materia orgánica y de P, así como el pH, presentan un patrón espacial de parches muy diferente al patrón del F2. Esto se debe a la menor carga factorial que tienen esas propiedades en el factor (Tabla 5). En el mapa de la MO, en la orientación de las unidades cartográficas se observa cierta tendencia a mostrar la orientación de las unidades homogéneas del factor 2, debido a que es la propiedad que tiene un mayor peso en él,

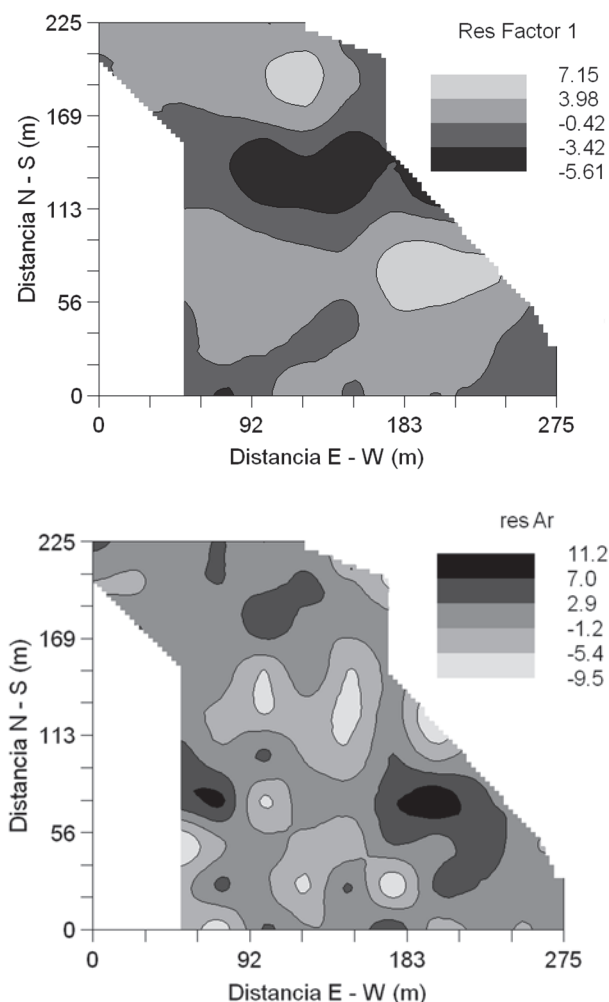


Figura 4. Mapas de la distribución espacial de los residuos del factor 1 y de las variables correlacionadas con él.

Fuente: El autor.

sin embargo, el efecto de las otras dos propiedades distorsiona fuertemente su utilidad como variable a tener en cuenta para establecer planes de manejo específico en este lote. El comportamiento descrito, unido al hecho de que el segundo factor explica aproximadamente un 20 % de la variabilidad del lote, es decir, casi la mitad de la variabilidad explicada por el factor 1 (Tabla 4), hace que la zonificación producida con el factor 2 no sea adecuada para establecer prácticas de manejo por sitio específico en este lote [15].

4. Conclusión

El análisis multivariado permitió seleccionar 2 factores que agruparon 6 de las 10 propiedades edáficas evaluadas. El primer factor lo conformaron los contenidos de arcilla, Ca y Mg, mientras que el segundo fue definido por el pH y los contenidos de materia orgánica y de fósforo. Ambos factores presentaron tendencia espacial por lo que los análisis de semivarianza se hicieron con los residuos de la regresión espacial.

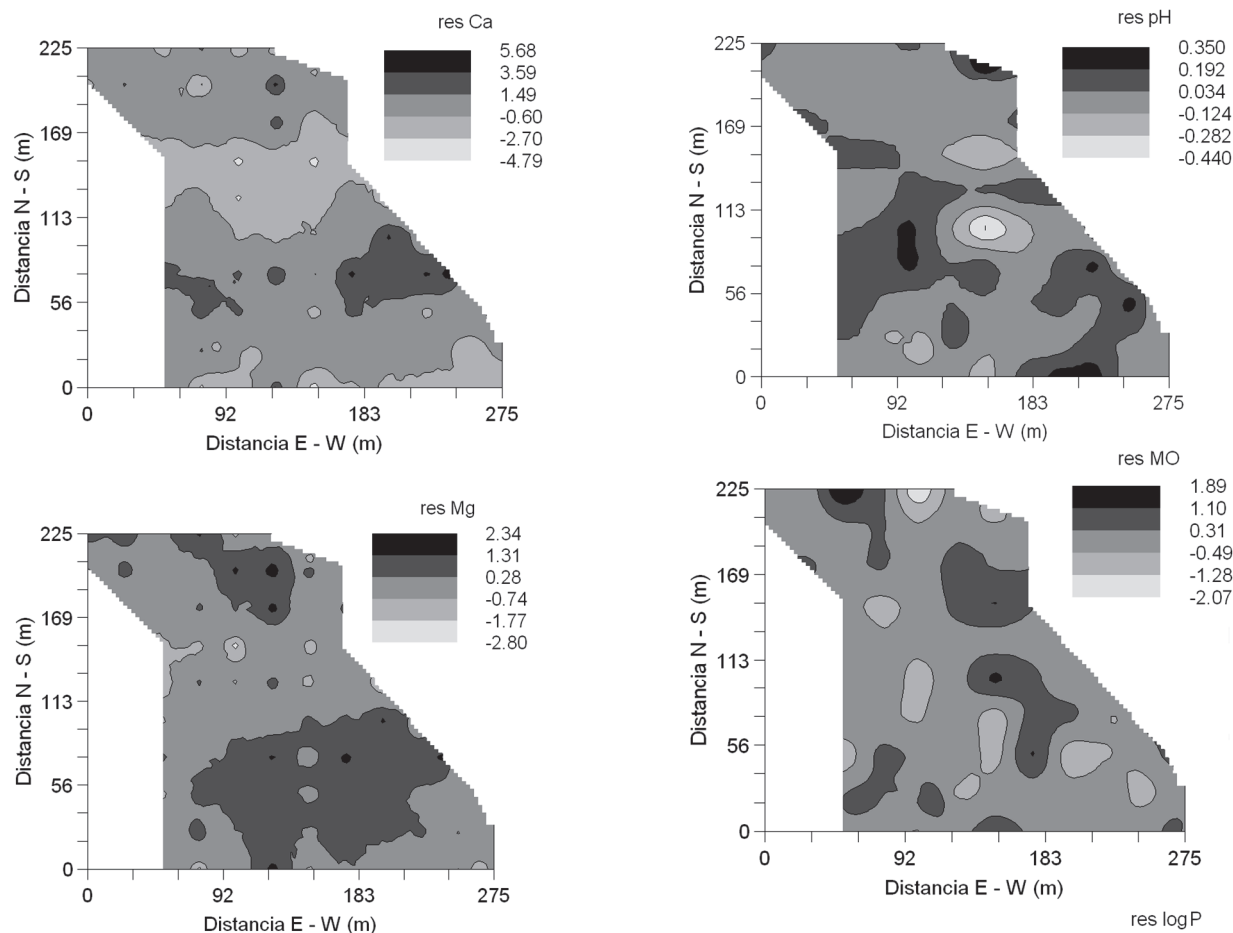


Figura 4. Continuación. Mapas de la distribución espacial de los residuales del factor 1 y de las variables correlacionadas con él.
Fuente: El autor.

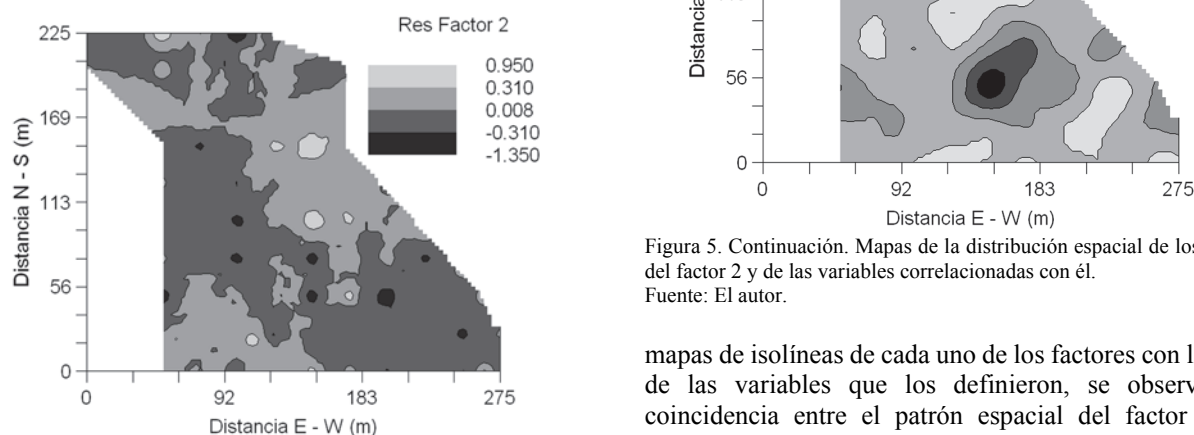


Figura 5. Mapas de la distribución espacial de los residuales del factor 2 y de las variables correlacionadas con él.
Fuente: El autor.

Con los dos factores se definieron áreas homogéneas, siendo mejor definidas las del factor 1. Al comparar los

Figura 5. Continuación. Mapas de la distribución espacial de los residuales del factor 2 y de las variables correlacionadas con él.
Fuente: El autor.

mapas de isolíneas de cada uno de los factores con los mapas de las variables que los definieron, se observó mejor coincidencia entre el patrón espacial del factor 1 y sus variables, que en el factor 2 con las suyas. Las variables de este último factor presentaron una estructura espacial en parches que no correspondió con la estructura del factor, haciendo que la zonificación producida por el F2 no sea adecuada para establecer un programa de manejo de la fertilidad con técnicas de agricultura de precisión. Para este propósito se debe utilizar la zonificación que da el factor 1.

Agradecimientos

A los estudiantes Álvarez, D., Castillo, A., Duque, W., Higueta, C., Ochoa, G. y Ospina, A., por su colaboración en el muestreo en campo. Al Laboratorio de Suelos de la Escuela de Geociencias de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, por la realización de los respectivos análisis.

Bibliografía

- [1] Arnó, J., Rosell, J.R., Blanco, R., Ramos, M.C. and Martínez-Casasnovas, J.A., Spatial variability in grape yield and quality influenced by soil and crop nutrition characteristics, *Precision Agriculture*, 13, pp. 393-410, 2012. DOI: 10.1007/s11119-011-9254-1
- [2] Bocchi, S., Castrignanò, A., Fornaro, F. and Maggiore, T., Application of factorial kriging for mapping soil variation at field scale, *European Journal of Agronomy*, 13, pp. 295-308, 2000. DOI: 10.1016/S1161-0301(00)00061-7
- [3] Bourennane, H., Nicoulaud, B., Couturier, A. and King, D., Exploring the spatial relationships between some soil properties and wheat yields in two soil types, *Precision Agriculture*, 5, pp. 521-536, 2004. DOI: 10.1007/s11119-004-5323-z
- [4] Cambardella, C.A., Moorman, T.B., Novak, J.M., Parkin, T.B., Karlen, D.L., Turco, R.F. and Konopka, A.E., Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils, *Soil Science Society of America Journal*, 58, pp. 1501-1511, 1994. DOI: 10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x
- [5] Casa, R. and Castrignanò, A., Analysis of spatial relationships between soil and crop variables in a durum wheat field using a multivariate geostatistical approach, *European Journal of Agronomy*, 28, pp. 331-342, 2008. DOI: 10.1016/j.eja.2007.10.001.
- [6] Castañeda, D.A., Jaramillo, D.F. y Cotes, J.M., Componentes de la variabilidad espacial en el manejo por sitio específico en banano, *Pesquisa. Agropecuária. Brasileira*, 45, pp. 836-845, 2010. DOI: 10.1590/S0100-204X2010000800009
- [7] Castrignanò, A., Giugliarini, L., Risaliti, R. and Martinelli, N., Study of spatial relationships among some soil physico-chemical properties of a field in central Italy using multivariate geostatistics, *Geoderma*, 97, pp. 39-60, 2000. DOI: 10.1016/S0016-7061(00)00025-2
- [8] Davies, B.E., Heavy metal contaminated soils in an old industrial area of Wales, Great Britain: source identification through statistical data interpretation, *Water, Air and Soil Pollution*, 94, pp. 85-98, 1997. DOI: 10.1023/A:1026478427782, 10.1007/BF02407095
- [9] Diggle, P.J. and Ribeiro Junior, P.J., *Model-based Geostatistics*, New York, Springer, 2007, pp. 12-28.
- [10] Facchinelli, A., Sacchi, E. and Mallen, L., Multivariate statistical and GIS-based approach to identify heavy metal sources in soils, *Environmental Pollution*, 114, pp. 313-324, 2001. DOI: 10.1016/S0269-7491(00)00243-8
- [11] Gallardo, A. y Maestre, F.T., Métodos geoestadísticos para el análisis de datos ecológicos espacialmente explícitos, en Maestre, F.T., Escudero, A. y Bonet, A. *Introducción al análisis especial de datos en ecología y ciencias ambientales: Métodos y aplicaciones*. Madrid, Universidad Rey Juan Carlos, Editorial Dykinson S.L., 2008. pp. 215-272.
- [12] García, M.J., Chica, M., Rigol, J.P., Pardo, E. y Rodríguez, V., Análisis especial geoestadístico para la caracterización edafológica de la Vega de Granada, en: *El acceso a la información especial y las nuevas tecnologías geográficas. Memorias Congreso Nacional del Grupo de Tecnologías de la Información Geográfica [XII, 2006, Granada]*. Universidad de Granada, España, 2006. pp. 195-206.
- [13] Goovaerts, P., *Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives*, *Geoderma*, 89, pp. 1-45, 1999. DOI: 10.1016/S0016-7061(98)00078-0
- [14] Goovaerts, P., *Geostatistical tools for characterizing the spatial variability of microbiological and physico-chemical soil properties*, *Biol Fertil Soils*, 27, pp. 315-334, 1998. DOI: 10.1007/s003740050439
- [15] Guastaferro, F., Castrignanò, A., de Benedetto, D., Sollitto, D., Troccoli, A. and Cafarelli, B., A comparison of different algorithms for the delineation of management zones, *Precision Agriculture*, 11, pp. 600-620, 2010. DOI: 10.1007/s11119-010-9183-4.
- [16] Hair, J.F., Anderson, R.E., Tatham, R.L. y Black, W.C., *Análisis multivariante*, 5th ed. Madrid, Prentice Hall, 2004, pp. 79-142.
- [17] Jaramillo, D.F., Variabilidad espacial de las propiedades ándicas de un Andisol hidromórfico del Oriente Antioqueño (Colombia), *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 62, pp. 4907-4921, 2009.
- [18] Jaramillo, D.F., Sadeghian S. y Lince, L.A., Variabilidad espacial de las bases en un Andisol de la zona cafetera central colombiana, *Boletín Ciencias de la Tierra*, 33, pp. 111-124, 2013.
- [19] Jaramillo, D.F., Anaya, M.L., Restrepo, C.A., González, H.A. y Álvarez, F., Variables físicas que explican la variabilidad de un suelo aluvial y su comportamiento espacial, *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 46(12), pp. 1707-1715, 2011. DOI: 10.1590/S0100-204X2011001200017
- [20] Kraskinikov, P. and Sidorova, V., Geostatistical analysis of the spatial structure of acidity and organic carbon in zonal soils of the Russian plain, in Kraskinikov, P., Carré, F. and Montanarella, L. *Soil geography and geostatistics: Concepts and Applications*, Luxembourg, Institute for Environment and Sustainability, European Communities, 2008, pp. 55-67.
- [21] Lin, Y.P., Multivariate geostatistical methods to identify and map spatial variations of soil heavy metals, *Environmental Geology*, 42, pp. 1-10, 2002. DOI: 10.1007/s00254-002-0523-1.
- [22] Lin, Y.B., Lin, Y.P., Liu, Ch.W. and Tan, Y.Ch., Mapping of spatial multi-scale sources of arsenic variation in groundwater on ChiaNan floodplain of Taiwan, *Science of the Total Environment*, 370, pp. 168-181, 2006. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2006.07.002.
- [23] Mariano, C., Bruno, C., Costas, J.L. and Balzarini, M., Geoestadística multivariada en agricultura de precisión, en: *Memorias Jornadas Argentinas de Informática e Investigación Operativa [40, 2011, Córdoba, Argentina]*. Sociedad Argentina de Informática y Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba. Agosto 29 a septiembre 2 de 2011, pp. 32-42.
- [24] Moral, F.J., Terrón, J.M. and Marques da Silva, J.R., Delineation of management zones using mobile measurements of soil apparent electrical conductivity and multivariate geostatistical techniques, *Soil and Tillage Research*, 106, pp. 335-343, 2010. DOI: 10.1016/j.still.2009.12.002.
- [25] Morales, P., *El Análisis Factorial en la construcción e interpretación de tests, escalas y cuestionarios [en línea]*, Madrid, Universidad Pontificia Comillas, 2011 [fecha de consulta mayo 25 de 2012], 45 P. Disponible en: <http://www.upcomillas.es/personal/peter/investigacion/AnalisisFactorial.pdf>.
- [26] Schabenberger, O. and Pierce, F.J., *Contemporary statistical models for the plant and soil sciences*, New York, CRC Press, 2002, 738 P.
- [27] Van Miervenne, M., Is the soil variability within the small fields of Flanders structured enough to allow Precision Agriculture?, *Precision Agriculture*, 4, pp. 193-201, 2003. DOI: 10.1023/A:1024561406780
- [28] Webster, R., Oliver, M.A., *Geostatistics for environmental scientists*, 2^a ed., England, John Wiley & Sons, 2007, 315 P.
- [29] Zaman, Q.U. and Schumann, A.W., Nutrient management zones for citrus base on variation in soil properties and tree performance, *Precision Agriculture*, 7, pp. 45-63, 2006. DOI: 10.1007/s11119-005-6789-z

D.F. Jaramillo-Jaramillo, es Ing. Agrónomo de la Universidad Nacional de Colombia, Medellín (1978), Esp. en Fotointerpretación aplicada a Estudios de Suelos del Centro Interamericano de Fotointerpretación, Bogotá (1979) y MSc. en Suelos y Aguas de la Universidad Nacional de Colombia, Palmira (1992). Ha participado como Reconocedor de Suelos en varios estudios de suelos con fines agropecuarios, ambientales y recreacionales en el Valle del Cauca, Cundinamarca, Antioquia, Córdoba y La Guajira. Se encuentra vinculado como profesor titular de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín desde julio de 1984 y tiene el reconocimiento como Maestro Universitario. Áreas de interés: génesis y clasificación de suelos, variabilidad espacial de suelos, hidrofobicidad de suelos, andisoles, levantamiento de suelos.
ORCID: 0000-0002-9308-9897

Performance mining equipment (extraction-load-transportation) in the Ernesto Guevara Factory

Orlando Belete-Fuentes ^a, Severo Estenoz-Mejía ^b & Yoandro Diéguez-García ^c

^a Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Holguín, Cuba, obelete@ismm.edu.cu

^b Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Holguín, Cuba, sestenez@ech.moa.minem.cu

^c Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Holguín, Cuba, ygdieguez@ismm.edu.cu

Received: February 11th, 2015. Received in revised form: October 26th, 2015. Accepted: November 3rd, 2015

Abstract

The general efficiency of the mining work of the outburst fronts in the locations of the Company Ernesto Guevara of Moa is below the productivities established stockings of exploitation for each one of the lines of teams that form the group technological outburst-load - transports. In the work approaches are exposed about the yield of the mining teams and their productivity, the behavior of the group is analyzed excavating truck for two variants of exploitation applied in the Mine: excavator-articulate truck and excavator- rigid truck. Magnitudes of the different technician-economic-productive indexes of the basic equipment are obtained on whose base cycles and productivities, and the consumption of specific fuel of the operations was determined.

The results are based in technician-productive aspects and include comparative approaches among the technique current excavator-articulate truck and excavator- rigid truck.

Keywords: Mining equipment, Synchronization, Exploitation, Mining Transport

Rendimiento del equipamiento minero de arranque-carga-transporte de la empresa Comandante Ernesto Guevara

Resumen

El rendimiento general del laboreo minero de los frentes de arranque en las minas de la Empresa Comandante Ernesto Guevara de Moa, se encuentra por debajo de las productividades medias de explotación establecidas para cada una de las líneas de equipos que forman el conjunto tecnológico arranque-carga- transporte. En el trabajo se exponen criterios sobre el rendimiento de los equipos mineros y su productividad, se analiza el comportamiento del conjunto excavadora- camión para dos variantes de explotación aplicados en la Mina: Excavadora-Camión articulado y excavadora-Camión rígido. Se obtienen magnitudes de los diferentes índices técnico-económico-productivos del equipamiento sobre cuya base se determinaron las productividades y el consumo de combustible específico de las operaciones.

Los resultados se fundamentan en aspectos técnico-productivos e incluyen criterios comparativos entre la tecnología Excavadora-Camión articulado contra excavadora-Camión rígido. Se determinó la variante más efectiva desde el punto de vista consumo energético y minero técnico del conjunto Excavadora-Camión.

Palabras clave: Equipamiento Minero, Rendimiento, Explotación, Transporte Minero

1. Introducción

La industria minera en cualquier país del mundo aporta a su economía cuantiosos recursos que complementan el desarrollo en sus diferentes ramas. La industria niquelífera cubana, busca alternativas y variantes para lograr un trabajo más productivo y eficiente, por lo que se realizan diferentes investigaciones relacionadas con el proceso de extracción, transporte, beneficio y

procesamiento metalúrgico de las lateritas (Estenoz, 1999; Belete, 2000; Belete et al. 2003 y Arrau, 2004).

Estudios realizados igual que Xiribimbi (1999); Belete et al. (2003) y Belete et al. (2008) determinan las vías para seleccionar el equipamiento minero racional considerando el método de explotación, sin embargo, no consideran los criterios sobre el rendimiento de los equipos mineros y su productividad, no analizan el comportamiento de la eficiencia del conjunto

excavadora camión ni los diferentes índices técnico-económico-productivos del equipamiento básico y el consumo de combustible específico de las operaciones.

Existen procedimientos metodológicos que determinan la productividad de los equipos de arranque-carga y transporte en las diferentes minas de otros países (por ejemplo, los trabajos del Dr. Kuleshev, profesor de la Universidad Técnica de San Petersburgo), no así en estos yacimientos de particularidades específicas, donde se debe tener en cuenta el complejo excavadora-camión como un todo, sabiendo que los cálculos se realizan partiendo de las características técnicas de cada uno de ellos adaptadas a las condiciones concretas de trabajo (Estenoz, 1991).

El objetivo de esta investigación consistió en determinar el rendimiento del equipamiento minero óptimo que considere la sincronización de los equipos de arranque-carga-transporte de cualquier tipo y capacidad, en función del volumen y la distancia de transportación del material.

2. Materiales y métodos

Los datos utilizados para el análisis proceden de investigaciones realizadas en la mina de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara de Moa por Belete et al. (2008) y de observaciones directas en el campo, monitoreando los camiones cargados y vacíos desde los frentes de arranque hasta los puntos de descarga. También se hicieron mediciones para conocer en detalles el consumo energético y la productividad de las máquinas mineras, así como la organización del transporte minero, los cuales presentan los resultados del cálculo de las productividades teórica, técnica y de explotación de las excavadoras y camiones para jornada laboral de doce horas (un turno de trabajo) (Registro No. 55128, 2004).

El muestreo se realizó en cada frente de arranque, depósitos de mineral y escombreras, tanto para las excavadoras como para los camiones en todos los viajes, cargado y vacío.

En todos los frentes de arranque mineros se analizaron criterios sobre el comportamiento del conjunto excavadora camión para dos variantes de explotación aplicados en la Mina Che Guevara de Moa (Belete et al. 2008):

- Excavadora-Camión articulado.
- Excavadora-Camión rígido.

Teniendo en cuenta el complejo de mecanización en las operaciones de arranque-carga y transporte, para el cálculo de la productividad técnica de las excavadoras y camiones, se utilizó la siguiente fórmula (Britaev & Zamishlaev, 1984):

2.1. Productividad técnica

$$Q_{Tec} = \frac{60k_i x q_e k_u}{T_c x + T_{cb}} \quad (1)$$

Donde:

Q_{Tec} - Productividad técnica de la excavadora en dependencia del tipo de camión a utilizar, m³/h;

k_i - Coeficiente de irregularidad de las operaciones de carga y transporte. Se considera próximo a 1 ó 100% para la más alta y efectiva organización y sincronización de las operaciones de carga y transporte;

k_u - Coeficiente de utilización de la capacidad de la cama;

T_c - Tiempo del ciclo unitario de las operaciones de arranque-carga, y descarga de la cuchara de la excavadora, min;

T_{cb} - Tiempo que duran las operaciones de maniobra y cambio del camión en la zona de carga de la excavadora, el cual depende de la propia maniobrabilidad del camión, de la características de la plataforma y del esquema de acceso a la excavadora;

q_e - Volumen de material que carga la cuchara de la excavadora, en m³. Este está determinado por la capacidad geométrica de la cuchara de la excavadora (E) en m³ y el coeficiente de llenado (K_{LL});

x - Cantidad de ciclos de trabajo de la excavadora o relación q_c/q_e .

$$x = \frac{q_c K_e}{q_e} \quad (2)$$

Donde:

q_c - Capacidad geométrica óptima que debe tener el camión;

K_e - Coeficiente de esponjamiento del mineral.

La capacidad óptima de la cuchara de la excavadora para el trabajo de arranque-carga debe de estar en correspondencia con la capacidad de la cama del camión (E), la misma se calcula por la fórmula siguiente (Estenoz, 1999):

$$E = \frac{q_c - a}{X} = \frac{q_c - a}{4,39} \quad (3)$$

Donde:

a - Coeficiente de acomodo y comprensión de la masa de material en la cuchara de la excavadora. Este coeficiente depende de la forma de la cuchara, las propiedades físico-mecánicas del material y el tipo de excavadora.

La constante 4,39, para camiones, en la fórmula (3) representa el punto medio óptimo en la cantidad de ciclos que debe realizar la excavadora para obtener el máximo de productividad en los trabajos.

Se correlacionaron los valores de la capacidad de la cuchara de la Dragalina para el trabajo de arranque-carga E, contra el coeficiente de acomodo de la carga (a), cuyos valores fueron tomados de la relación $a = f(E)$ de la curva de la función $a = 0,0015 \cdot E^2 + 0,0662 \cdot E + 1,6893$. Esta función se obtuvo del procesamiento de varias mediciones realizadas en los frentes de arranque (Fig. 1).

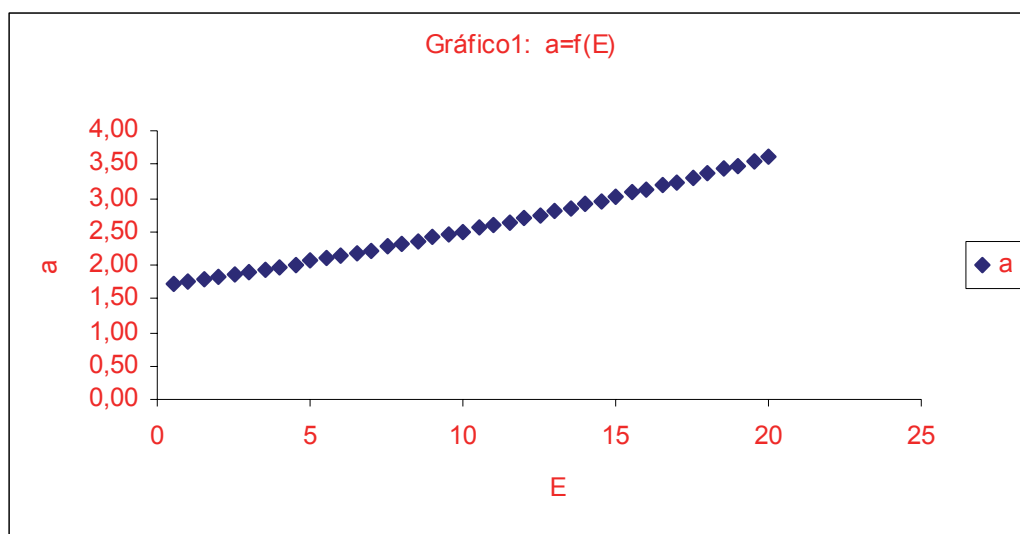


Figura 1. Capacidad óptima de la cuchara de la Dragalina para el trabajo de arranque-carga contra el coeficiente de acomodo de la carga, determinada por los autores.

Fuente: Elaboración propia.

De la Fig. 1 se deduce que la capacidad geométrica de la cuchara de la excavadora está estrechamente relacionada por el coeficiente de acomodo y compresión de la masa de material en la cuchara de la excavadora, el cual permite un mayor aumento del coeficiente de llenado, disminuir el tiempo de ciclos de la excavadora y disminuir el tiempo de espera del camión, hecho que permite elevar progresivamente la productividad de las máquinas mineras.

2.2. Productividad de explotación de la Dragalina

Luego de calculada la productividad técnica de la excavadora (Q_{ex}) en función de la capacidad de la carga de los camiones, así como de la sincronización con las operaciones de arranque-carga, se determinó la productividad de explotación de las excavadoras (Q_{ex}) durante los turnos de trabajos, mediante la fórmula siguiente (Estenoz, 1999):

$$Q_{ex} = (Q_h T \eta); \text{ m}^3/\text{turno} \quad (4)$$

Donde:

Q_h - Productividad horaria de la excavadora en dependencia del tipo de camión a utilizar, m^3/h .

$$\eta = \frac{(T - T_p)}{T} \quad \text{-- Coeficiente de utilización de la}$$

excavadora en un turno de trabajo.

Donde:

T - Duración del turno de trabajo; min.

T_p - Tiempo perdido por la excavadora en el transcurso del turno por diversas razones, las cuales se dividen en evitables (puramente organizativas) e inevitables.

Después de estas valoraciones de suma importancia para tomar decisiones, (Xiribimbi, 1999); (Belete et al. 2008), se deben revisar los promedios históricos de cada uno de estos

valores y aumentarlos o disminuirlos en función de la realidad y circunstancia de cada mina.

2.3. Cálculo del parque de excavadora

Para la determinación del parque de excavadora de la mina se valoraron múltiples aspectos, los cuales se agruparon en la magnitud del coeficiente de reparaciones y mantenimientos imprevistos, así como en la magnitud económica de las pérdidas por el incumplimiento en los diferentes períodos de tiempo tanto para los trabajos mineros como para las operaciones de preparación y tratamiento metalúrgico. Además se consideraron las afectaciones de comercialización del producto final y los incumplimientos de los planes de producción.

Los conceptos anteriores se pueden simplificar a través de la siguiente expresión (Pereda & Polanco, 1999):

$$N_c = \frac{E_{cam} K_e}{\gamma K_{LL} E_{exc}} \quad (5)$$

Donde:

E_{cam} : Capacidad del equipo de transporte;

N_c - parque de excavadora;

K_{LL} - coeficiente de llenado de la cuchara;

γ : Peso volumétrico, t/m^3 ;

E_{exc} : Capacidad geométrica de la excavadora, m^3 .

2.4. Cantidad de excavadoras necesarias para asegurar la productividad anual planificada de la mina (Estenoz, 1999)

$$N_e = \frac{Q_m K_{rm}}{Q_{ex}} \quad (6)$$

Donde:

Q_m - Productividad media de la cantera por turno; m^3/turno ;

k_{rm} - Coeficiente que considera las reparaciones y mantenimientos imprevistos dentro del turno de trabajo.

N_e - Cantidad de excavadoras;

Q_{ex} - Productividad de explotación de la excavadora.

$$Q_m = \frac{M_m}{C_t} \quad (7)$$

Donde:

C_t - Cantidad de turnos al año; en unidades.

M_m - Masa minera a extraer anualmente en la mina, t/año.

$Mm = (M_a + M_{ep}) \gamma K_e$; $m^3/\text{año}$

Donde:

M_a - Masa mineral a extraer para abastecer la planta metalúrgica, se determina considerando los volúmenes del producto terminado de la empresa y la recuperación general de los componentes útiles del mineral en función de la calidad de la materia prima inicial, en t/año

M_{ep} - Masa de escombros a extraer anualmente en la mina; t/año.

k_e - Coeficiente de esponjamiento en la cuchara y en la cama del camión.

γ - Masa volumétrica del mineral y de las rocas a extraer; t/m^3 (Estenoz, 1999).

$$M_a = \frac{P_{ni} 100}{C_{ni} + R_{ni}}; \text{ t/año} \quad (8)$$

Donde:

P_{ni} - Producción anual de N_i ; t/año

C_{ni} - Contenido o ley media de níquel en la masa mineral; en %.

R_{ni} - Recuperación de níquel en el proceso de beneficio y tratamiento metalúrgico de la masa de mineral, en parte de la unidad.

2.5. Cantidad de excavadoras en inventario (Estenoz, 1999)

$$N_{inv} = \frac{N_e}{K_{u1}} \quad (9)$$

Donde:

K_{u1} : Coeficiente de preparación técnica;

N_{inv} - Cantidad de excavadoras en inventario.

2.6. Cálculo del tiempo de recorrido total

Este cálculo no incluye el tiempo para la carga del transporte ni el tiempo transcurrido durante la espera del

próximo camión para la entrada en el frente de carga (Pereda & Polanco, 1999):

$$T_v = 60 \left(\frac{L_{ca}}{V_{ca}} + \frac{L_v}{V_v} \right) + T_d + T_m, \text{ min.} \quad (10)$$

Donde:

T_v - Duración del viaje del equipo de transporte o camión, en min.

L_{ca} , L_v - Longitudes respectivas de la vía de transporte para los camiones cuando transitan cargados y vacío, km.

V_{ca} , V_v - Velocidades medias respectivas en la vía, para los trayectos con los camiones cargados y para los camiones vacíos, km.

T_d - Demora del camión durante la descarga del mineral en el punto de descarga; min.

T_m - Tiempo de maniobra del camión en la plataforma de descarga; min.

2.7. Cálculo de la productividad horaria del camión (Estenoz, 1999)

$$Q_c = \frac{60 k_i q_c k_u}{T_x + T_{cb} + T_v}, \text{ m}^3/\text{h} \quad (11)$$

Donde:

Q_c - productividad horaria del camión;

T_v - Duración del viaje del equipo de transporte o camión, en min. En este tiempo no se incluye la duración de las operaciones de carga.

2.8. Cálculo de la productividad del camión por turno considerando el tipo de excavadora (Estenoz, 1999)

$$Q_{ce} = P_c T \eta; \text{ m}^3/\text{turno} \quad (12)$$

Donde:

Q_{ce} - Productividad de explotación del camión en el turno; m^3/turno

2.9. Cálculo del parque de camiones necesarios para la mina (Estenoz, 1999)

$$N_{CT} = \frac{P_m K_{rm}}{P_{ce}} K_r \quad (13)$$

Donde:

Q_m - Productividad media da la mina por turno, en m^3/turno .

k_r - Coeficiente de reserva general, el cual considera todo el proceso de preparación técnica, incluidas las reparaciones y mantenimientos programados, así como averías parciales o generales de los camiones y además imprevistos.

2.10. Determinación del consumo de combustible de los camiones

La productividad de explotación de los camiones, distancia de transportación del material y la productividad general de la mina, permiten determinar el consumo energético de los camiones y valorar el más económico para las condiciones medias de trabajo de la mina (Rodríguez, 2003).

Finalmente se puede mediante la fórmula 14, calcular el consumo energético de los camiones (Estenoz 1999):

$$C_p = \frac{N_v T_v C_{ep}}{60}, \text{ l/turno} \quad (14)$$

Donde:

C_{ep} - Consumo específico de combustible, l/h.

Según investigaciones de Britaev & Zamishlaev, (1984) y Estenoz, (1999), el consumo energético de los camiones mineros depende de su capacidad de carga. La línea general del incremento de la potencia media de los motores en función de la capacidad de la cama se puede representar por la siguiente función (Estenoz, 1999):

$$C_{ep} = 0,004q_c + 0,428q_c + 12,023 ; \text{l/h} \quad (15)$$

Sustituyendo en la fórmula (14) y (15) se obtuvo finalmente el consumo energético medio de los camiones por turno para el trabajo con excavadora de 4, 5 y 6 m³ de capacidad de la cuchara.

3. Discusión y análisis de los resultados

Los resultados obtenidos se fundamentaron en el siguiente análisis:

La productividad de explotación de la excavadora según la capacidad de la cama del camión y la distancia de transportación obtenida por la fórmula (4) se ilustra en la Fig. 2.

La Fig. 2 indica el cálculo de la productividad de explotación de la excavadora según la capacidad de la cama del camión y la distancia de transportación para cucharas de la excavadora de 4, 5 y 6 m³ de capacidad, esto indica que la productividad de explotación va disminuyendo hasta los primeros 6 000 m y a partir se produce un descenso brusco.

En la Fig. 2 se expresa el número de cucharas de la excavadora para la cama de los camiones: $X=q_c/q_e$, La Fig. 3 muestra la cantidad de cucharas de la excavadora para la cama de los camiones en función de la distancia de transportación. Se utilizaron cucharas de la excavadora de 4, 5 y 6 m³ de capacidad. Se puede observar una relación lineal entre el número de cucharas de la excavadora y la distancia de transportación.

La capacidad de la cama del camión para todos los casos, varía en función de la cuchara de la excavadora cuya tendencia al aumento, depende de la distancia de transportación (Fig. 4).

Aquí se expresa que la capacidad de la cama del camión, según la cuchara de la excavadora de 4,5 y 6 m³ de capacidad, aumenta en función de la distancia de transportación.

La productividad del camión disminuye según la distancia de transportación (Fig. 5):

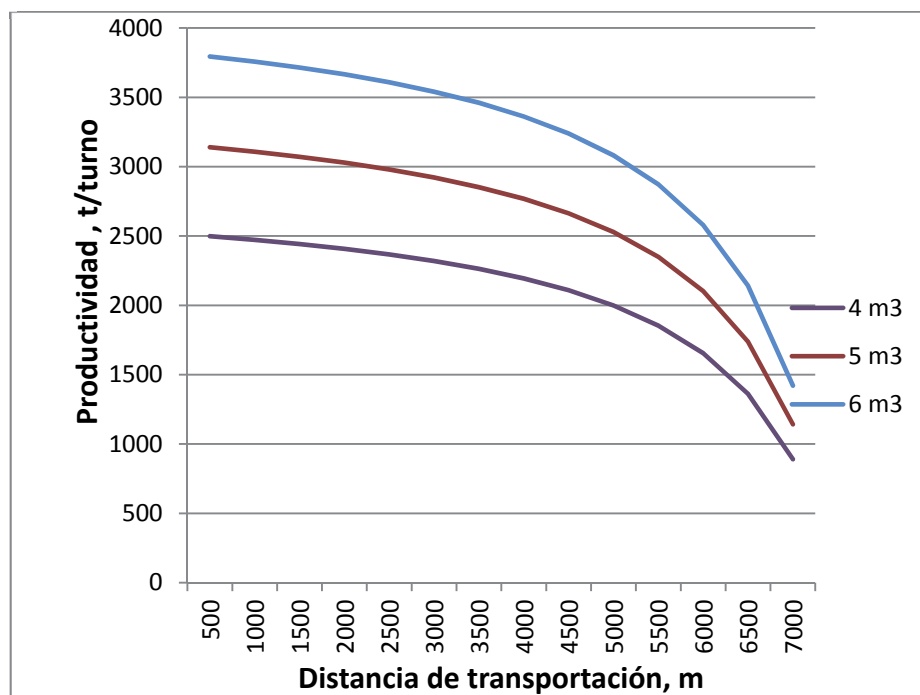


Figura 2. Productividad de explotación de la excavadora según la capacidad de la cama del camión y la distancia de transportación. Fuente: Elaboración propia.

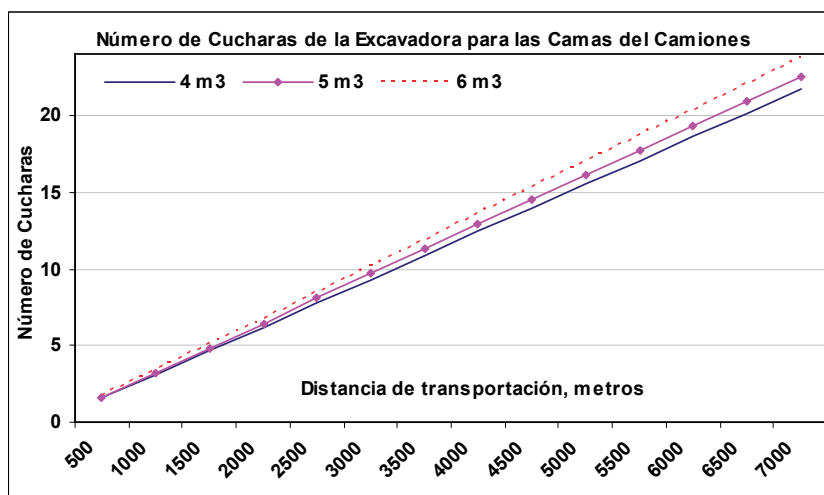


Figura 3 Número de cucharas de la excavadora para la cama de los camiones.
Fuente: Elaboración propia.

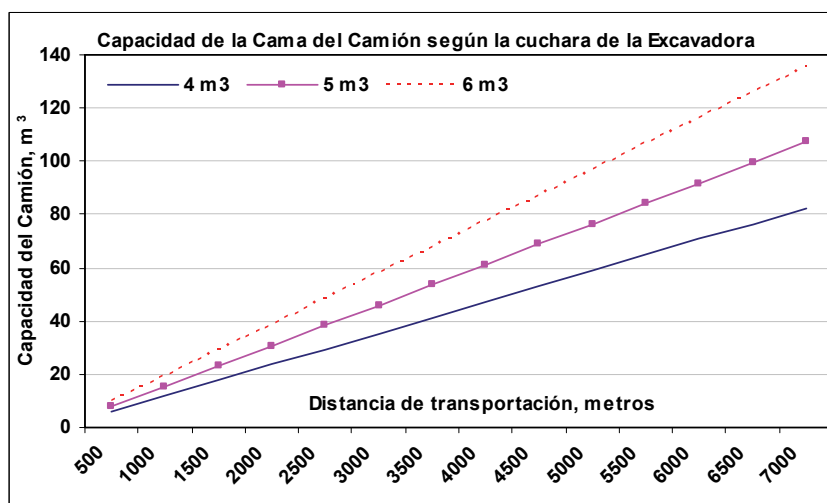


Figura 4. Capacidad de la cama del camión según la cuchara de la excavadora.
Fuente: Elaboración propia.

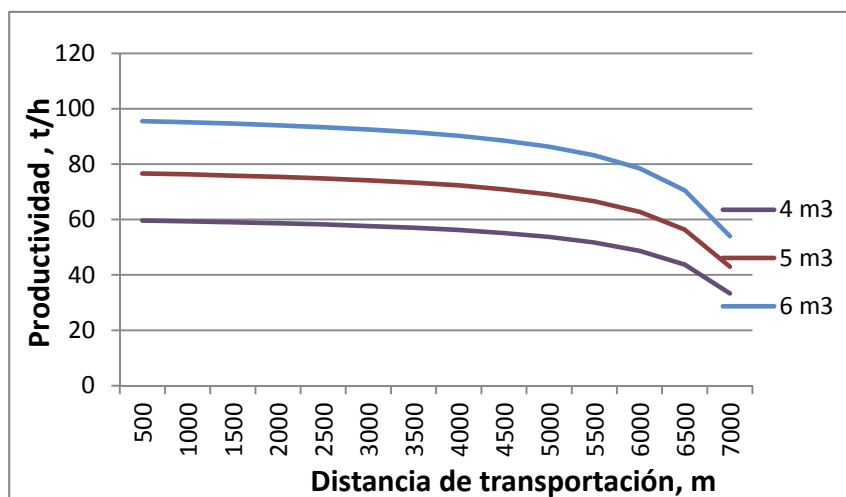


Figura 5. Productividad del camión según la excavadora y la distancia de transportación.
Fuente: Elaboración propia.

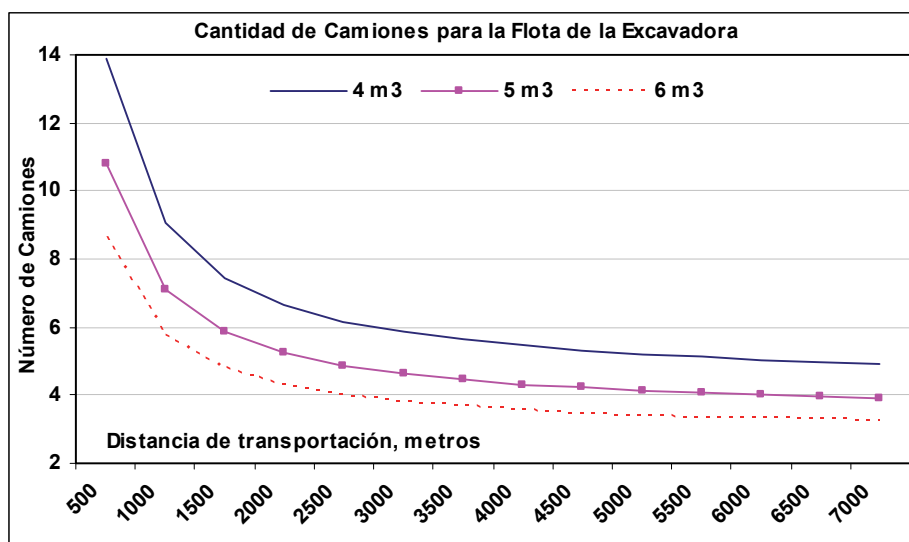


Figura 6. Cantidad de camiones según la distancia de transportación y la excavadora.
Fuente: Elaboración propia.

La Fig. 5 muestra la disminución de la productividad horaria del camión según la capacidad de la cuchara de la excavadora (para 4,5 y 6 m³) y la distancia de transportación.

La Fig. 6 señala como disminuye la cantidad de camiones según se va alejando el frente de carga, hasta llegar a 7 000 m de distancia en función de la capacidad de la cuchara de la excavadora.

Para poder conocer la producción anual de la mina, fue necesario calcular el número total de camiones, donde se produce un aumento gradual de la productividad en los primeros 2 000 m de distancia, luego esta misma productividad comienza a descender hasta los 7 000 m (Fig. 7).

El número total de camiones para el cumplimiento de la producción anual (Fig. 7), se logra aumentando la distancia de transportación y la capacidad de la cuchara de la excavadora para 4, 5 y 6 m³. Parecido a los casos anteriores, hay un aumento de la cantidad de camiones en los primeros metros de distancia de transportación, por lo tanto aumenta la productividad. Luego comienza a disminuir con la distancia de transportación.

Los resultados de la variante analizada del cálculo del consumo de combustible de los camiones se representan en la Fig. 8, donde se muestra el consumo energético de la flota de camiones trabajando con Dragalina de 4, 5 y 6 m³ de capacidad en la cuchara.

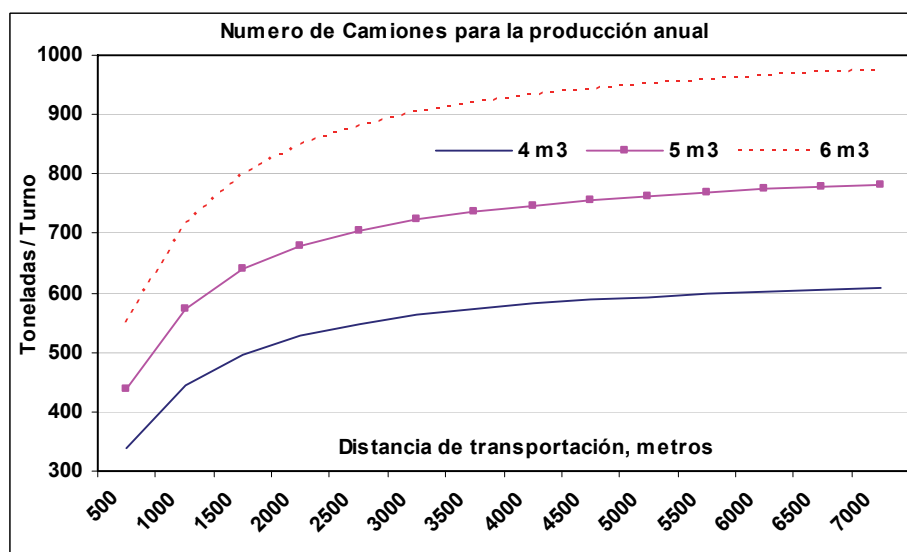


Figura 7. Número total de camiones para el cumplimiento de la producción anual.
Fuente: Elaboración propia.

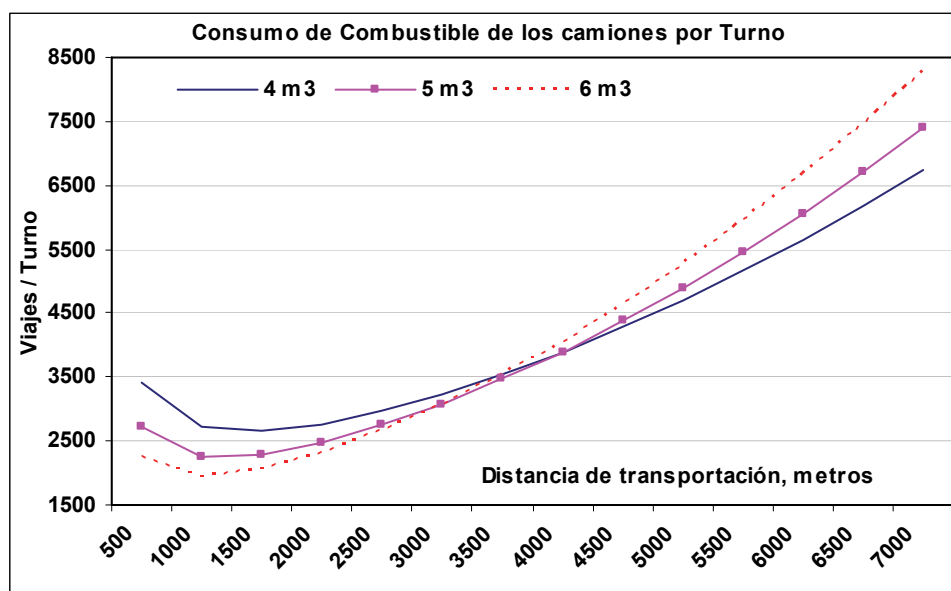


Figura 8. Consumo energético de la flota de camiones trabajando con Dragalina de 4, 5 y 6 m³ de capacidad en la cuchara. Elaboración propia.

Es evidente que con una mayor distancia de transportación, hay un menor número de viajes por turno, y por lo tanto, mayor consumo energético, así los indican las curvas en colores de la Fig. 8, donde expresa que el consumo energético de la flota de camiones disminuye en los primeros 2 000 m y comienza a aumentar hasta los 7 000 m. Se propone que para la transportación del mineral, se usen distancias menores de 2 000 m.

Un análisis similar al caso anterior se realizó para el estudio de la productividad a la variante Dragalina-camión rígido obteniéndose resultados parecidos.

Analizando ambas variantes desde el punto de vista de consumo energético, para 7 000 m de longitud de recorrido, la más racional resultó ser la Dragalina - camión rígido con capacidad de la cuchara de 4 m³ y capacidad de la cama de 30 t, y desde el punto de vista minero técnico, la variante Dragalina - camión articulado con capacidad de la cama de 21.6 t.

4. Conclusiones

El estudio realizado en la Mina de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara permitió determinar el rendimiento del equipo minero óptimo que considera la sincronización de los equipos de arranque-carga-transporte de cualquier tipo y capacidad, en función del volumen y la distancia de transportación del material.

Se desarrolló un método para determinar la relación entre la capacidad de la cuchara de la excavadora, cama del camión y distancia de transportación, que permite disminuir el consumo específico de combustible por toneladas de mineral extraído y transportado, así como alcanzar el mayor grado de homogenización del material en la cama del camión, y finalmente se determinó la variante más efectiva desde el

punto de vista de consumo energético (la variante Camión rígido - Dragalina con capacidad de la cama de 30 t), y desde el punto de vista minero -técnico, resultó ser la variante camión articulado- Dragalina con capacidad de la cama de 21.6 t.

Referencias

- [1] Arrau, J., Avances tecnológicos para máquinas mineras. [en línea], [fecha de consulta 02/12/2004]. Disponible en: <http://www.portalminero.com>
- [2] Belete-Fuentes, O., Máquinas de excavación-carga. Folleto. Editorial G-Art, Guantánamo, Cuba, 2000. 60 P.
- [3] Belete-Fuentes, O., Estenoz-Mejía, S. y Diéguez-García, Y., Vías para seleccionar el equipamiento minero racional considerando el método de explotación, Taller Internacional de la Geología y la Minería del Níquel Cubano en: Memorias del V Congreso de Geología y Minería, La Habana, Cuba, 2003. ISBN 959-7117-11-8.
- [4] Belete-Fuentes, O., Estenoz-Mejía, S. y Diéguez-García, Y., Sincronización de las labores de arranque-carga-transporte de las labores mineras en la Mina de la Empresa Ernesto Che Guevara. Moa. Evento CINAREM 10/2008. ISBN 957-7237-2-1-6.
- [5] Correa-Arroyave, A., Galerías mineras: La modelización analítica como una ayuda geomecánica para el diseño minero. Revista Ingeniería e Investigación, 25, pp. 10-19, 1991.
- [6] Elias, M., Nickel laterite deposits-geological overview, resources and exploitation, in: Giant Ore Deposits: Characteristics, Genesis, and Exploration Cooke, D.R., Pongratz, J., eds, Centre for Ore Deposit Research, Special Publication 4. Univ. of Tasmania, pp. 205-220, 2000.
- [7] Estenoz-Mejía, S. Metodología para seleccionar el equipamiento óptimo en la sincronización de las labores de arranque, carga y transportación de minerales en las canteras, Evento IX Sesión Científica del CIL, Libro de resúmenes, Moa, Cuba, pp. 2-15, 1999.
- [8] García, R., Dúmpers articulados veinte años en el mercado. Revista Rocas y Minerales. XV (188), pp. 90- 92, 1997.
- [9] Pereda, S. y Polanco-Almanza, R., Transporte minero. 2^{da} ed. Editorial Félix Varela. La Habana. 1999, 325 P.

- [10] Xiribimbi, R., Comportamiento del transporte automotor durante el trienio 1996 en la mina de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara. Tesis de grado. Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa, Cuba. 1999, 65P.
- [11] Gutiérrez, R., Influencias de las características del mineral laterítico en los índices de explotación de los camiones articulados VOLVO A40D y A35C en la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara. Tesis de grado. Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa, Cuba. 2003, 60 P.
- [12] Torres, P. Estudio de la efectividad de los equipos de extracción en el yacimiento Moa Oriental. Tesis de Maestría en Minería. Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa, Cuba. 2003. 78 P.
- [13] Registro No. 55128. 2004. Metodología de formación del servicio técnico del equipamiento minero de transporte en las empresas de carbón. Tesis en opción al grado de Master en Ciencias. [en línea], [Fecha de consulta: 28/09/2009]. Disponible en: http://www.bankrabort.com/work/work_55128.html?similar=1
- [14] Rodríguez, A., Mayor tonelaje y más tecnología serán claves del camión minero, 2003. [en línea], [Fecha de consulta: 20/10/2008] Disponible en: <http://html.rincondelvago.com/ccamiónminero.html>.

O. Belete-Fuentes, es graduado de Ing. de Minas en 1986 y de Dr. en Ciencias Técnicas en 1999, ambos del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez", en Holguín, Cuba. Se desempeña como profesor de Topografía Minera y Máquinas Mineras en la facultad de Minas del ISMMM desde 1979, con 36 años de experiencia en la docencia. Ha publicado varios artículos relacionados con la Topografía Minera, y específicamente en el cálculo de los errores que afectan el volumen de mineral extraído. Ha participado en proyectos nacionales e internacionales. Es coordinador de la maestría Topografía Minera y ha obtenido varios premios en investigación otorgados por la Academia de Ciencias Provincial de Cuba. Es miembro del tribunal nacional de defensa de doctorado. Ha dirigido varios doctorados y maestrías.
ORCID: 0000-0002-2491-8030

S. Estenoz-Mejía, es graduado de Ing. de Minas en 1985 en el Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez", en Holguín, Cuba. Se desempeña como especialista de Minas en la empresa Comandante Ernesto Che Guevara de Moa desde 2007. Trabajó de investigador principal en el centro de investigación del Níquel (CEDINIQ) 10 años. Ha participado en proyectos nacionales e internacionales y tiene artículos publicados en revistas de alto impacto.
Orcid: 0000-0002-9068-5001

Y. Diéguez-García, es graduado de Ing. de Minas en 2006 con título de oro y de Dr. en Ciencias Técnicas en 2014, ambos del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez", en Holguín, Cuba. Se desempeña como profesor de fragmentación de rocas con explosivos en la Facultad de Geología y Minería del ISMMM desde el año 2006, posee 10 años de experiencia en la docencia. Ha publicado varios artículos relacionados con la explotación subterránea y a cielo abierto. Ha participado en proyectos nacionales e internacionales. Es coordinador de la Maestría Minería y ha obtenido premios en investigación otorgados por la Academia de Ciencias Provincial de Cuba. Es miembro de la Comisión nacional de la Carrera de Minería y Vicedecano Docente de la Facultad.
ORCID: 0000-0003-0054-5476

Structural analysis of the Zipaquira Anticline (Eastern Cordillera, Colombia)

Helbert García ^a & Giovanni Jiménez ^b

^a Escuela de Geología, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. helbertgarciad@gmail.com

^b Escuela de Geología, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. gjimenezd@gmail.com

Received: April 30th, 2015. Received in revised form: October 9th, 2015. Accepted: November 26th, 2015..

Abstract

We report geological mapping, recollection of kinematic data, fracture data and transverse sections along the Zipaquira Anticline (ZA) used to recognize the deformation mechanisms involved in the kinematic evolution of the ZA. The Zipaquira Anticline (ZA) is an asymmetrical fold with variation in the strike of fold axis and affected by some transverse faults (Transverse Zones) along its extension. The main fracture set in the ZA was formed in a pre-folding stage (J1), controlling the formation and propagation of sin-folding fractures (J2). Another fracture set (J3) was only recognized near the Zipaquira Lineament where several factors converge to deform considerably the rocks (e.g. Salt diapirs). We calculate the stress tensor from kinematic data, resulting in fractures formed in an extensional environment induced by diapir intrusion in the fold core. According to the transverse sections and previous considerations, thickness variation in Upper Cretaceous-Paleocene formations may indicate the onset of the pre-Andean Orogeny and the uplift of separated blocks, controlled by the transverse zones.

Keywords: Fracture analysis, Transverse zones, Neusa Fault, Zipaquira Lineament, Salt diapirs, Andean Orogeny.

Análisis estructural del Anticlinal de Zipaquirá (Cordillera Oriental, Colombia)

Resumen

Se llevó a cabo un análisis estructural a partir de una revisión cartográfica, datos cinemáticos, datos de fracturas y secciones transversales a lo largo del Anticlinal de Zipaquirá (AZ) que permitieran plantear la evolución cinemática del pliegue. El AZ es una estructura que presenta curvatura en su eje axial y tiene un rumbo general en dirección N30E. A lo largo del pliegue se reconoce un patrón de fallas transversales (Zonas Transversales) que lo intersectan en diversos sectores. El análisis de fracturas nos permitió reconocer una distribución de planos perpendiculares a la estratificación que fueron formados con anterioridad al pliegue (J1) y que condicionaron la formación y propagación de un conjunto de fracturas sin-plegamiento (J2). Un tercer patrón (J3) fue reconocido únicamente en cercanías al Lineamiento de Zipaquirá donde diversos elementos interactúan y aumentan la complejidad de la deformación (e.g. diapiros salinos). Se calculó el tensor de esfuerzos demostrando un ambiente distensivo generado por cuerpos salinos en profundidad. Al observar las secciones transversales y las consideraciones previas, se reconocen variaciones de espesor notables en formaciones del Cretácico Superior-Paleoceno que podrían indicar el inicio de la deformación pre-andina y el levantamiento de bloques separados y controlados estructuralmente por las zonas transversales.

Palabras clave: Análisis de fracturas, Zonas transversales, Falla de Neusa, Lineamiento de Zipaquirá, Diapiros salinos, Orogenia Andina.

1. Introducción

La Cordillera Oriental de Colombia (CO) es un cinturón plegado bivergente cuya evolución ha sido influenciada por múltiples factores que afectaron su desarrollo y formación como fallas normales reactivadas, partición de la deformación, entre otros (Jiménez et al., 2014 y referencias). El Anticlinal de Zipaquirá (AZ), localizado en la zona central de la CO (Fig. 1), presenta curvatura y variación en el rumbo de su eje axial, está

limitado en diversos sectores por fallas inversas de alto ángulo consideradas probablemente como fallas normales reactivadas (Camargo, 1995) y cuyo núcleo está intruido por cuerpos salinos del Cretácico Inferior, lo cual lo convierte en un modelo a escala de la CO y un caso de interés para entender los caminos de evolución de una estructura que ha sido afectada por múltiples elementos. Trabajos previos realizados en la zona han estado orientados a estudios estratigráficos y estructurales parciales.

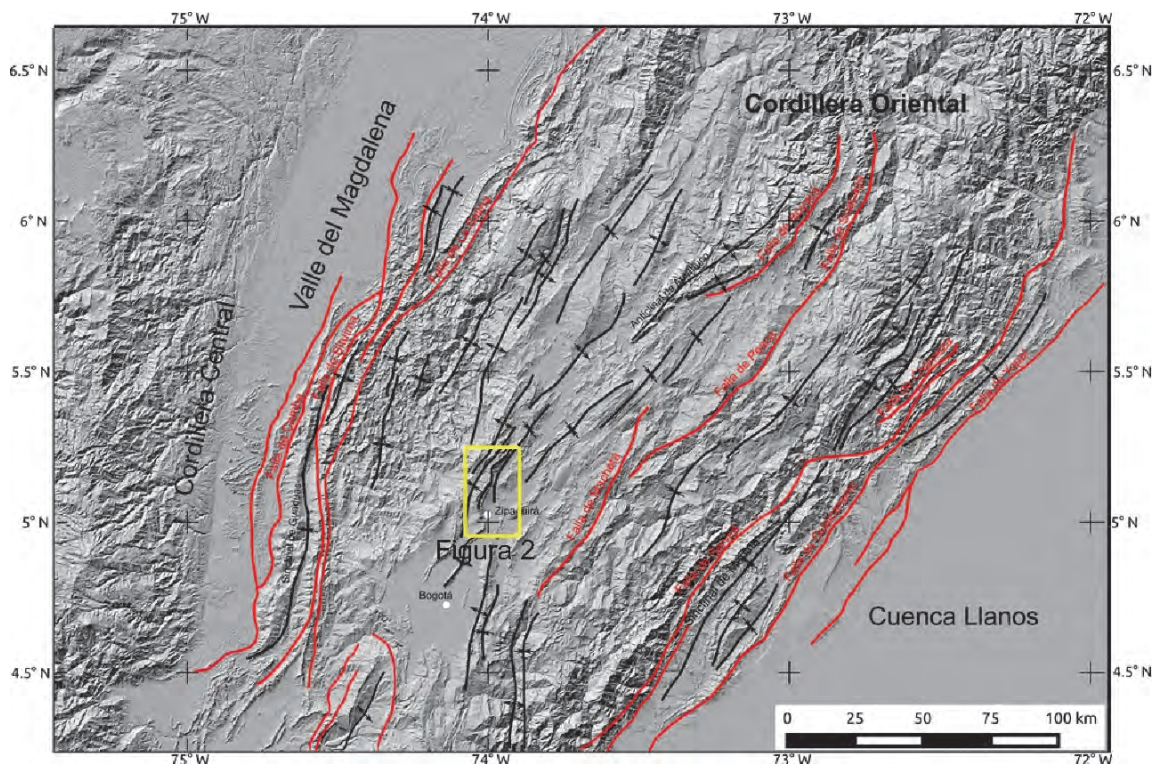


Figura 1. Modelo de sombras donde se muestra la dirección general de las estructuras y los límites estructurales que separan la Cordillera Oriental de las cuencas del Valle del Magdalena y Llanos. La zona de estudio está representada por el recuadro amarillo.

Fuente: Modificado de Bayona et al. (2013).

Julivert (1963) hace un análisis de los factores que controlan la evolución del Anticlinal de Chía al sur de la zona de estudio y establece cuatro factores claves en su evolución: tectónica de revestimiento, haloquinesis, gravedad y erosión

diferencial, además de proponer la presencia de fallas oblicuas que segmentan la estructura. Este patrón oblicuo corresponde a una serie de fallas y lineamientos de dirección NW-SE que generan inflexión en rocas del Cretácico, formación de bloques tectónicos y cuyo movimiento es principalmente sinistral (Camargo, 1995; Velandia y De Bermoudes, 2002; Fierro-Morales y Angel-Amaya, 2008). En algunas partes de la Sabana de Bogotá los lineamientos transversales están siendo cubiertos por sedimentos Plio-cuaternarios o presentan movimientos discretos superficiales (Mojica et al., 2007). El análisis estructural más detallado fue presentado por Castro y Lozano (2003) y Lozano et al. (2003), desarrollado en la parte central del AZ, en el sector del Embalse de Neusa. Utilizando información geológica de superficie, datos estructurales y secciones balanceadas, determinaron que el pliegue y las estructuras alledañas son el producto de cabalgamientos, retrocabalgamientos y cuñas tectónicas, además establecen que la complejidad estructural es producto del alto grado de deformación asociado a dos zonas de despegue en la Formación Chipaque y a rampas laterales. A pesar de los estudios mencionados previamente, ninguno ha considerado las estructuras transversales en la evolución cinemática de la sub-cuenca, en especial del AZ. El análisis de estructuras plegadas a menor escala, controladas por factores que se encuentran a nivel regional como fallas normales y zonas de acomodación reactivadas, fallas transversales, extensos niveles

salinos en la base de la secuencia sedimentaria y fracturas s.l. permitiría conocer los caminos de evolución y formación de las diferentes estructuras y así realizar comparaciones a nivel regional que permitan estimar las fases de desarrollo del orógeno. La curvatura del AZ puede ser analizada por al menos dos hipótesis: la primera hipótesis está asociada con un oroclino, el cual es definido por Carey (1955) como una estructura recta, la cual evoluciona a una estructura curva debido a rotaciones en los ejes verticales y que dichas rotaciones guardan una relación lineal con el rumbo de la estructura. La segunda hipótesis se asocia a un orógeno primario, donde las rotaciones en este caso no tienen relación lineal con el rumbo de la estructura y la curvatura es controlada por factores como anisotropías del basamento, forma de la cuenca, entre otros (Marshak, 2004) o por la influencia de zonas transversales. Respecto a las zonas transversales, Thomas (1990) las define como conectores paralelos u oblicuos a la dirección de transporte tectónico que ejercen un control estructural importante al producir terminación de pliegues, cambios en los niveles de despegue de las fallas, terminación de fallas, curvaturas, entre otros. Estas zonas transversales han sido reconocidas tanto en el Valle Superior del Magdalena (Jiménez et al., 2012) como en el piedemonte oriental de la Cordillera Oriental por Bayona et al. (2008). Teniendo en cuenta lo anterior, este estudio se llevó a cabo en el AZ para entender la evolución cinemática de la estructura, definir si el AZ corresponde a un Oroclino o a un Orogeno Primario, para lo cual se realizó una cartografía geológica, modelos digitales de sombras, colección de datos de fractura, estrías de falla y secciones estructurales transversales al AZ.

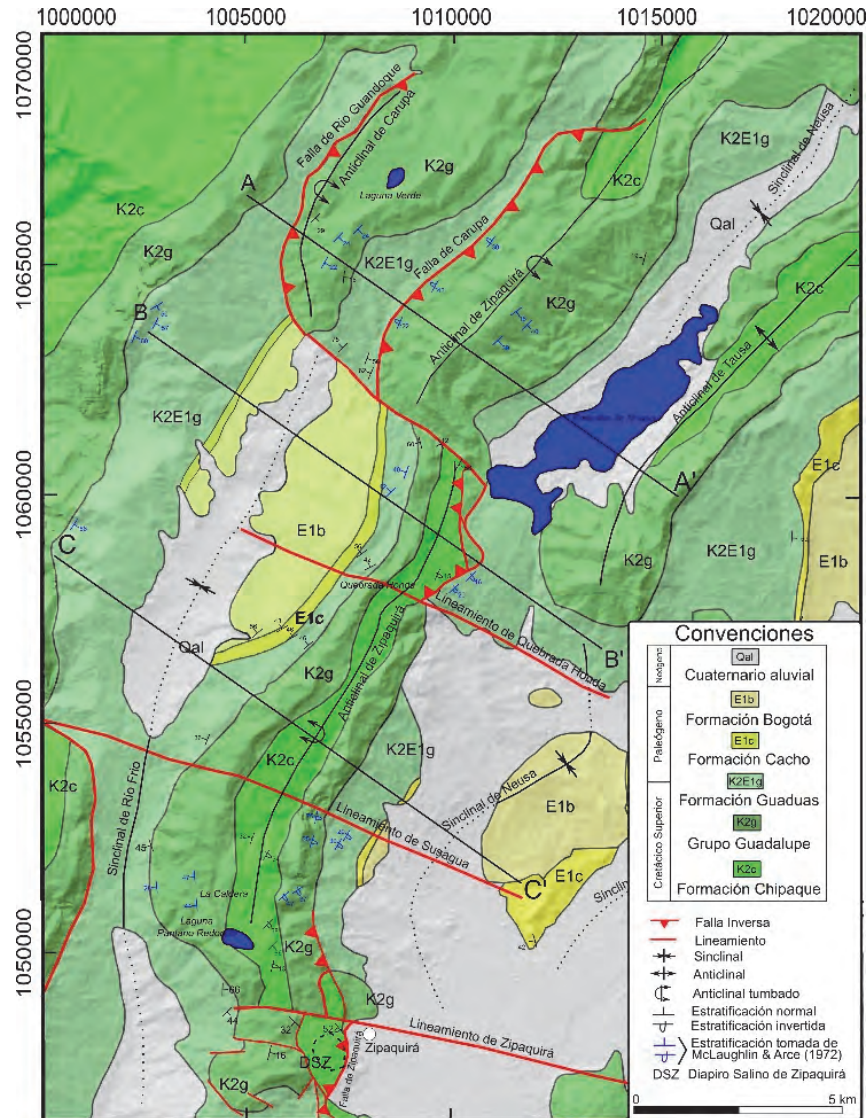


Figura 2. Mapa geológico de la zona de estudio donde se observan las diferentes estructuras regionales como fallas y pliegues, el Diapiro Salino de Zipaquirá (DSZ) y la orientación de las secciones transversales.

Fuente: Modificado de Montoya y Reyes (2003).

2. Marco geológico

La zona de estudio está localizada en la sub-cuenca de Cundinamarca, en el eje axial de la Cordillera Oriental (CO), la cual hace parte de los Andes del Norte. En esta zona se presenta la interacción de las placas Nazca, Caribe (ambas de afinidad oceánica) y Suramericana (de afinidad continental), además de numerosas subplacas y bloques tectónicos que presentan una historia geológica evolutiva que puede ser diferente respecto a la tectónica regional (e.g. Bloque Maracaibo). El bloque norandino ha sido afectado por múltiples eventos orogénicos que registran la actividad entre las placas Suramericana, Farallón (Nazca-Cocos) y Caribe al menos desde el Cretácico Superior con la acreción de los terrenos occidentales y la colisión del Plateau Caribe con la margen noroccidental de Suramérica (Kerr et al., 2005). Esta

colisión ha sido considerada clave para el inicio del levantamiento en la CO, lo cual llevó a la formación de dos cuencas foreland: cuenca Llanos al oriente y cuenca del Valle Medio del Magdalena al occidente. Trabajos recientes han permitido estimar que los primeros pulsos de deformación están asociados a la reactivación de fallas normales heredadas del régimen extensivo Mesozoico, el desarrollo de sub-cuencas sin-orogénicas y magmatismo, como respuesta a la colisión y posterior subducción de la placa Caribe en el Maastrichtiano-Paleoceno (Bayona et al., 2013). Durante el Eoceno continúa la reactivación de fallas y el desarrollo de un régimen compresivo a transpresivo fue evidenciado en la Cordillera Oriental, donde el estilo estructural fue dominado por la formación de abanicos imbricados que fueron erodados y cubiertos por el registro sedimentario del

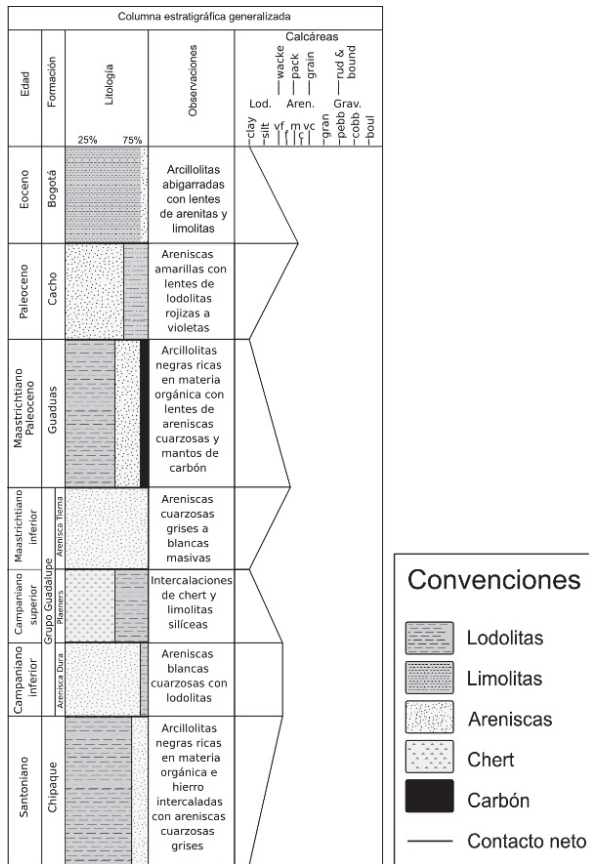


Figura 3. Columna estratigráfica generalizada de la zona de estudio. Las litologías se muestran en forma horizontal y representa el porcentaje de cada tipo de roca en cada unidad litoestratigráfica.

Fuente: Autores.

Oligoceno Superior (Corredor, 2003). En el piedemonte occidental se ve reflejado este evento por el inicio del levantamiento del Anticlinal de los Cobardes (Caballero et al., 2010). Para el Neógeno, se presenta la mayor deformación con una inversión tectónica fuerte de las fallas normales que limitaban el rift Mesozoico, como las fallas de Servitá-Lengupa y Pajarito en el piedemonte oriental (Mora et al., 2010), así como las fallas de Soápaga y Boyacá en la parte axial de la CO, donde han sido consideradas estructuras que afectan basamento (e.g. Kammer, 1996; Kammer y Sánchez, 2006). Ramírez-Arias et al. (2010) demuestra en el Sinclinal de Nunchía el levantamiento final de la Cordillera Oriental durante el Mioceno, siendo reflejado en el cambio de las paleocorrientes y un mayor aporte de componentes líticos sedimentarios durante la deposición de la Formación Guayabo.

El AZ es un anticlinal asimétrico separado en dos estructuras por la Falla de Neusa: Anticlinal de Zipaquirá Norte (AZN) y Anticlinal de Zipaquirá Sur (AZS) (Fig. 2). El AZN tiene vergencia al occidente, con su flanco posterior invertido y cortado por la Falla de Carupa. El núcleo está compuesto por rocas marinas Cretácicas de la Formación Arenisca Dura que comprenden areniscas blancas cuarzosas

con niveles de lodolitas (Fig. 3). Hacia los flancos afloran las formaciones Plaeners, Arenisca Tierna y Guaduas del Cretácico Superior, que representan liditas intercaladas con porcelanitas y chert, areniscas blancas masivas y arcillolitas negras ricas en materia orgánica con mantos de carbón respectivamente (Fig. 3). El AZS tiene vergencia el oriente, con su flanco posterior invertido (Fig. 2). El núcleo es una depresión generada por las rocas incompetentes de la Formación Chipaque, mientras los flancos muestran pendientes abruptas y escarpes estructurales de la Formación Arenisca Dura y Arenisca Tierna. El flanco anterior del AZS muestra franjas de rocas del Paleógeno que comprenden areniscas ocre conglomeráticas con limolitas (Formación Cacho) y arcillolitas abigarradas con lentes de areniscas y limolitas (Formación Bogotá) (Fig. 3). Al occidente de Zipaquirá y al sur del AZS, un diapiro salino intruye las rocas de la Formación Chipaque y se encuentra en fase pasiva (Fig. 2). Tiene una orientación NW-SE con apariencia elipsooidal donde su eje más largo mide 1.9 Km y su eje más corto de 1.1 Km (López et al., 1990).

3. Métodos

Para llevar a cabo el análisis del AZ se realizó como primera parte una revisión cartográfica a escala 1:50.000 donde se delimitaron las unidades lito-estratigráficas aflorantes así como las principales estructuras. Posteriormente se llevó a cabo la toma de datos estructurales (estratificación, fracturas s.l.) teniendo en cuenta la corrección de la declinación magnética del campo magnético terrestre, que para la zona de estudio es de aproximadamente -7° de acuerdo al National Geophysical Data Center del NOAA (<http://www.ngdc.noaa.gov/geomag-web>). Finalmente, se comparó la cartografía geológica hecha por Montoya y Reyes (2003) con la revisión y se complementó con imágenes satelitales Landsat.

Los análisis de fracturas fueron desarrollados en 25 estaciones a lo largo del AZ y en cercanías a las zonas transversales donde se midió el azimuth de rumbo, la inclinación y el tipo de movimiento con respecto al plano para diferenciar diaclasas y fracturas de tensión, de fracturas de cizalla con desplazamientos milimétricos. Las formaciones que abarcan la zona de muestreo son Chipaque, Grupo Guadalupe (Arenisca Dura, Plaeners, Arenisca Tierna) y Cacho. El procesamiento se realizó utilizando el software SG2PS (Sasvári y Baharev, 2014) donde se elaboraron gráficos de rosa que representan el azimuth de rumbo de cada uno de los conjuntos y se llevó a cabo la corrección del pliegue de los mismos. Los gráficos de contornos de polos fueron trabajados en el software OpenStereo (Grohmann y Campanha, 2010) y las estadísticas de la densidad de fracturas fueron obtenidas a partir de la metodología de Fisher que el software ofrece. El análisis de los datos de estrias se realizó en el programa Win-Tensor 5.0.5 (Delvaux y Sperner, 2003) utilizando los procedimientos de diedros rectos mejorado y optimización rotacional para separar los subconjuntos que fueran

mecánicamente coherentes para graficarlos en el software SG2PS. El subconjunto de estrías que mostraron coherencia mecánica se utilizó en el software FaultKin 6 (Allmendinger et al., 2012) para calcular el balón de playa y la solución del plano de falla. Las secciones estructurales transversales fueron construidas a partir de datos de campo integrados con datos de cartografías previas realizadas por McLaughlin y Arce (1972) y Montoya y Reyes (2003).

4. Resultados

Se presentan inicialmente los resultados obtenidos en el análisis de fracturas para los dominios del AZN y del AZS. Desde un punto de vista general se reconocieron cuatro conjuntos de fracturas que fueron clasificadas con respecto a su posición en cada una de las unidades y sus relaciones ortogonales con la estratificación. El conjunto de fracturas dominante muestra un arreglo ortogonal entre sí que a su vez es perpendicular a la estratificación sin importar la inclinación de las capas ni la posición en el pliegue. Este conjunto se denotará como J1. Otro conjunto de fracturas se muestra oblicuo entre sí y a su vez con inclinaciones entre 60 y 78° con respecto a la estratificación, denominado conjunto J2. En el Cerro de la Virgen al NW de Zipaquirá y justo al norte del Lineamiento de Zipaquirá, un patrón de fracturamiento exclusivo de esta zona pudo ser reconocido: J1B, conjunto de fracturas perpendiculares a la estratificación y oblicuas al conjunto J1. Hacia el cabeceo sur del AZN, un tercer conjunto (J3) que no tiene relación ortogonal ni con los planos pre-existentes ni con la estratificación se puede encontrar y muestra orientación al norte, siendo menor del 5% del total de fracturas medidas.

4.1. Fracturamiento en el Anticlinal de Zipaquirá

4.1.1. Anticlinal de Zipaquirá Norte

En el sector del río Guandoque, el patrón de fracturamiento muestra una tendencia hacia el NW-SE con direcciones subordinadas hacia el NNW y SW siguiendo un patrón ortogonal (Fig. 4). Las diaclasas tienen mayor espaciamiento hacia los niveles de areniscas y calizas, mientras que hacia las limolitas y areniscas de grano fino de la Formación Plaeners, el patrón es mucho más denso y menos espaciado. Después de horizontalizar los datos de diaclasas, se observa que el 40% de las fracturas están en posición vertical con inclinaciones mayores a 78° (conjunto J1), mientras que el otro 60% presenta inclinaciones que van desde 55° hasta 70° (conjunto J2) (Fig. 5). Las diaclasas que son verticales tienen un rumbo preferencial E-SE, al igual que la mayoría de las diaclasas secundarias. Muchas de las fracturas están rellenas con óxidos, principalmente hematita supergénica. Se observa en las areniscas de la Formación Plaeners el desarrollo de pequeños desplazamientos y cizalla en algunos planos de fracturamiento.

Hacia el cabeceo sur del AZN se midieron diaclasas en areniscas y rocas silíceas de las formaciones Dura y Plaeners respectivamente. Al igual que en el sector del río Guandoque

las rocas silíceas presentan un arreglo menos espaciado con fracturas que se propagan por los diferentes niveles de chert y limolitas silíceas. Las areniscas son más resistentes y las diaclasas se presentan cada 30 o 40 cm. La principal dirección de las diaclasas es hacia el NE con otro arreglo ortogonal en dirección E (Fig. 4). Después de horizontalizar los planos cerca del 60 % de las fracturas son verticales a sub-verticales con variaciones desde los 78° hasta los 89° y corresponden al conjunto J1, mientras el 35 % varía desde los 70° hasta los 77° y representan el conjunto J2 (Fig. 5). En este sector aparece un tercer conjunto de diaclasas (J3), considerado neoformado por sus relaciones de corte con otras fracturas y la estratificación. No se observa desplazamiento en las fracturas como si sucede en el sector del río Guandoque. En el flanco este del AZN se sigue observando el patrón de fracturamiento ortogonal en dirección SW con algunas variaciones hacia el NW (Fig. 4). Se utilizaron datos recolectados en areniscas y limolitas de la Formación Plaeners, evidenciando un espaciamiento de las fracturas entre 7 y 10 cm en los niveles menos espesos. En algunos sectores se observan fracturas de cizalla con desplazamientos de hasta 5 cm. Después de horizontalizar los planos se observa un predominio en dirección NE con cerca del 75 % de los datos correspondiendo al conjunto de fracturas J1, mientras que el otro 25% tienen valores de inclinación entre los 64 y 73° lo cual estaría asociado al conjunto J2 (Fig. 5).

4.1.2. Anticlinal de Zipaquirá Sur

Hacia el flanco oeste y la charnela del pliegue, al sur de la Falla de Neusa, se observa un cambio entre las principales direcciones de fracturamiento. Mientras que hacia el AZN las fracturas tenían rumbo al NE-SW y al E-WSW, hacia el AZS el principal conjunto está orientado en dirección NW-SE o al E-SE (Fig. 4). Después de horizontalizar los datos, cerca del 90 % de los planos corresponden al conjunto J1 y tienen inclinaciones que van desde los 79° hasta los 88°, mientras que el 10 % restante corresponde al conjunto J2 con inclinaciones promedio de 71° (Fig. 5).

Hacia el sur en el sector de La Caldera, múltiples direcciones de fracturas se presentan subordinadas al rumbo principal, variando desde ESE a WNW (Fig. 4). Al observar el diagrama de polos se nota que el 100 % de los datos corresponde al conjunto J1 (Fig. 5). El clivaje de fractura que afecta los niveles incompetentes de la Formación Chipaque sigue el rumbo preferencial de diaclasas, al igual que algunas fallas con presencia de gouge que cortan el clivaje.

En la dirección principal (120° aprox.) el patrón de fracturamiento está formado por fallas, diaclasas, clivaje de fractura y venas rellenas con hematita supergénica, desarrolladas tanto en las areniscas como en los niveles de lutitas hematitizadas que muestran bandas de deformación.

A medida que se acerca al Lineamiento de Zipaquirá, se realiza una vez más la inversión en el patrón de fracturamiento, volviendo a ser dominante las direcciones al NE-SW con valores subordinados al SE (Fig. 4). En este sector se observaron principalmente diaclasas desarrolladas

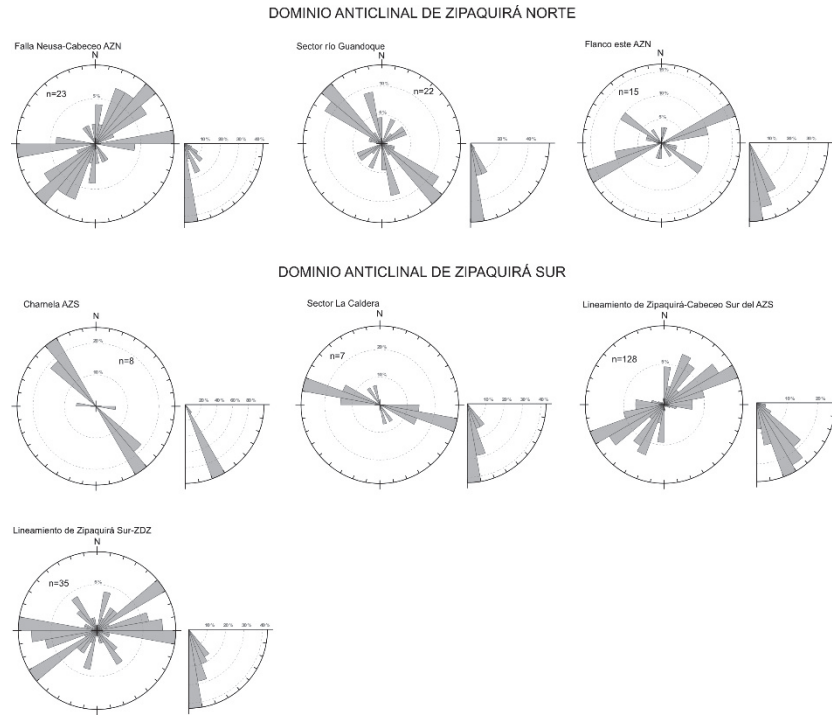


Figura 4. Diagramas de rosas para los dominios del AZN y AZS. En cada una de las proyecciones se representa el azimuth de rumbo e inclinación. Para cada gráfico se muestran los porcentajes de cada circunferencia y el número de fracturas medidos (n). Ver localización de los sectores en la Figura 2. Fuente: Autores.

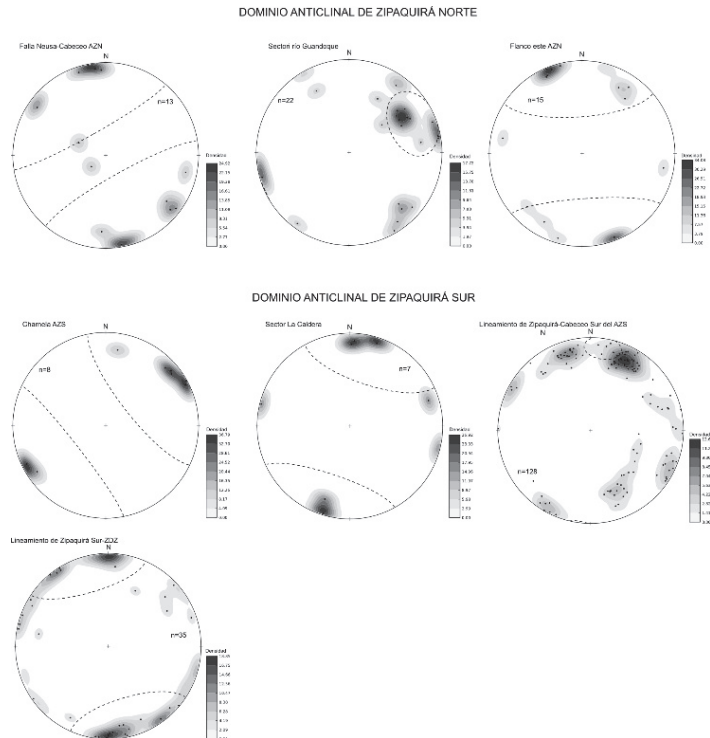


Figura 5. Proyecciones en hemisferio inferior de los contornos de polos de las fracturas después de la corrección por el pliegue. Se observan variaciones en las direcciones de fracturamiento en cada dominio y la presencia de los conjuntos J1 (polos horizontales) y J2 (polos subhorizontales) dependiendo del ángulo con respecto a la horizontal. Se plotó también el número de datos de fracturas por sector (n), el intervalo de confianza de 95% y la escala de densidad de datos.

Fuente: Autores.

con alta frecuencia en las areniscas de las formaciones Dura y Tierra del Grupo Guadalupe. La zona presenta un desarrollo estructural complejo con inversión en la polaridad de las capas, segmentación en fallas menores, fracturamiento intenso y plegamiento a escala mesoscópica. Múltiples fracturas de cizalla normal con desplazamientos de hasta 0.8 cm se observan en las lodolitas de la Formación Chipaque, con rumbo promedio de 111° , siendo subparalelas con el lineamiento. Las diaclasas al ser horizontalizadas muestran que el 60 % corresponden al set J1, mientras que el conjunto J2 tiene un 25 % en el total de las fracturas (Fig. 5). Justo al norte del Lineamiento la secuencia está invertida, los planos de fracturas evidencian cizallamiento y relleno con óxidos de hierro. En el afloramiento se observa deslizamiento por flexura y pliegues a escala mesoscópica, oblicuos al lineamiento y cuyo eje axial tiene un rumbo medio de 170° y cuya orientación permite estimar una cinemática sinistral para el Lineamiento de Zipaquirá. El patrón de fracturamiento exhibe el arreglo ortogonal típico (conjunto J1) con desarrollo de un tercer conjunto de diaclasas oblicuas al J1 y que mantiene una relación perpendicular con la estratificación (J1B) (Fig. 6). En esta zona aparece el conjunto J3, cuya expresión es mínima pero constante en los sectores al norte con un rumbo casi N-S y que alcanza un 15 % del total de las fracturas. El último patrón está asociado a la deformación posterior al plegamiento, producto de deformación de cuerpo rígido.

4.2. Datos cinemáticos en el Anticlinal de Zipaquirá

El desarrollo de planos con cizallamiento es muy común en diversas partes del AZ, sin embargo la presencia de planos estriados o con evidencia de desplazamiento medible es poca. En total se midieron 13 datos de planos estriados y 11 datos de fallas en las cuales se podía observar la cantidad de desplazamiento y/o su cinemática. Después de procesarlos en el software Win-Tensor 5.0.5 (Delvaux & Sperner, 2003) y discriminarlos se obtuvo un subconjunto con coherencia mecánica y que permitió realizar interpretaciones generales acerca del estado de esfuerzos y esbozar un análisis cinemático preliminar siguiendo la metodología propuesta por Marret y Allmendinger (1990).

El subconjunto que incluía la mayoría de datos (6) y que corresponde con los esfuerzos que predominan en el AZ tiene un esfuerzo principal (σ_1) de 109° con una inclinación de 82° , un esfuerzo intermedio (σ_2) de rumbo 215° con inclinación 2° y un esfuerzo mínimo (σ_3) con rumbo 305° e inclinación 8° (Fig. 7). El radio de esfuerzos calculado es de 0.067 que puede ser asociado a un régimen radial extensivo, evidenciando de manera indirecta el emplazamiento de cuerpos salinos en profundidad que llevan a inducir un campo de esfuerzos local con desarrollo predominante de fallas normales.

En la Tabla 1 se muestran los datos de las fallas del subconjunto 1 con los ejes cinemáticos. A partir de los ejes P y T se llevó a cabo el cálculo de la solución del plano de falla por el método de Linked Bingham en el programa Faultkin, obteniendo así los planos nodales P1 con azimuth 24.5° e inclinación

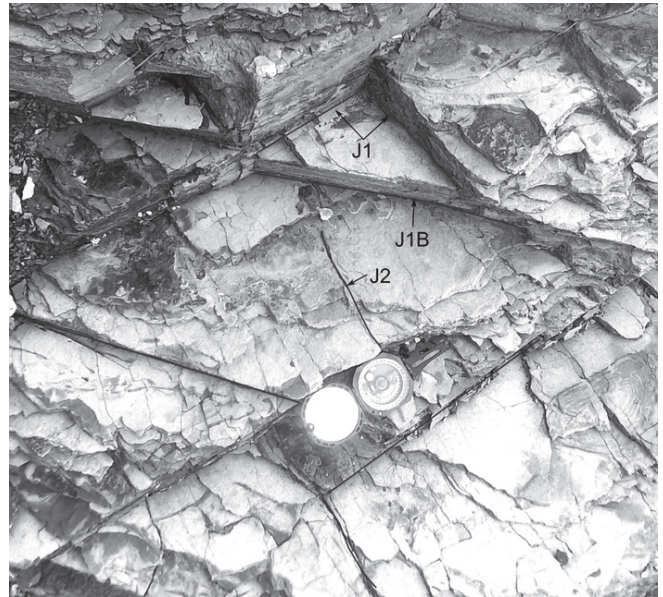


Figura 6. Patrón de fracturamiento al norte del Lineamiento de Zipaquirá donde se observa la estratificación y su relación con los conjuntos de fracturas J1, J2 y J1B.

Fuente: Autores.

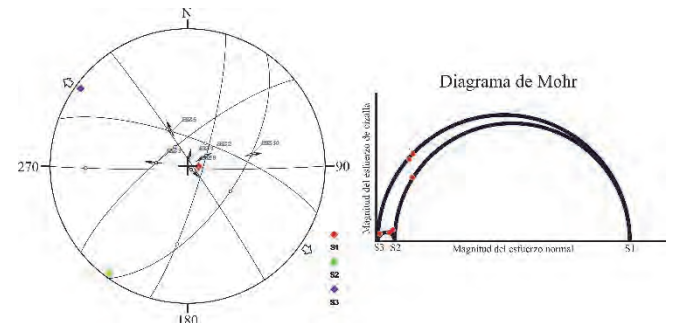


Figura 7. Proyección estereográfica en hemisferio inferior con los planos de falla y el movimiento usando el método de Angelier. Se muestra la orientación de los ejes de esfuerzos y el movimiento predominantemente extensivo en dirección NW-SE. El diagrama de Mohr permite reconocer que el 50% de los planos son neoformados, mientras que el otro 50% están en el campo de los reactivados.

Fuente: Autores

59.1° y el P2 con azimuth 284.1° e inclinación 73.2° (Fig. 8). Es de resaltar que el plano P2 corresponde con las estructuras transversales que intersectan el AZ como la Falla de Neusa y el Lineamiento de Zipaquirá, y que de acuerdo a la orientación de los ejes de presión y tensión puede estimar una cinemática sinistral-normal, al igual que lo habían reportado autores como Velandia y De Bermoude (2002), Fierro-Morales y Angel-Amaya (2008).

4.3. Análisis estructural del Anticlinal de Zipaquirá

En la zona de estudio se definen claramente dos dominios estructurales limitados por la Falla de Neusa: Anticlinal de Zipaquirá Sur (AZS) y Norte (AZN). El AZS es un pliegue asimétrico cuyo eje axial muestra un rumbo $N40^\circ E$. Hacia su núcleo afloran las rocas de la Formación Chipaque,

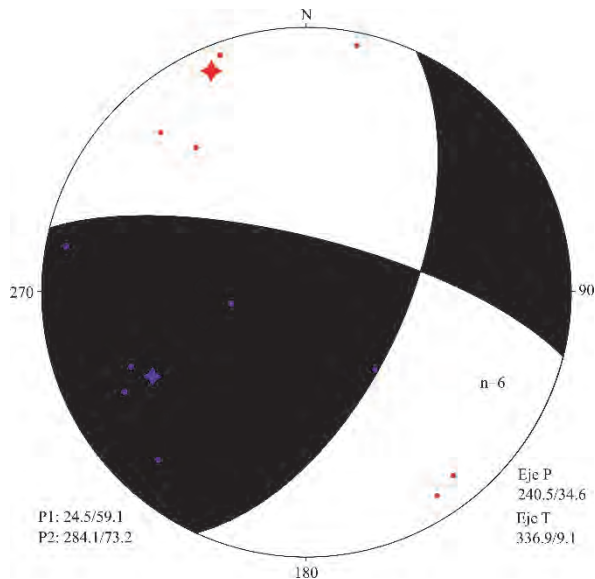


Figura 8. Balón de playa donde se muestra la solución al plano de falla utilizando los ejes de presión (puntos azules) y tensión (puntos rojos). Las estrellas representan el promedio para el eje P (estrella azul) y el eje T (estrella roja).
Fuente: Autores.

generando pendientes bajas redondeadas, rodeado por zonas escarpadas hacia los flancos que corresponden con las rocas competentes del Grupo Guadalupe. Su extensión está limitada hacia el norte por la Falla de Neusa, mientras al sur lo limita la Zona de Deformación de Zipaquirá (ZDZ), donde es controlado por el Lineamiento de Zipaquirá (LZ). Es en este sector donde se muestra la mayor complejidad de la zona de estudio, incluyendo múltiples cuñas con fallas inversas y normales, además de ser el punto donde se presenta la exposición de cuerpos salinos controlados en su emplazamiento por el LZ. El AZS es un anticlinal tumbado, con su flanco este invertido, siendo más notable entre la ZDZ y el Lineamiento de Quebrada Honda (LQH), donde el escarpe de la Formación Arenisca Dura lo hace evidente. Hacia el norte, la Falla de Las Margaritas inicia en el punto de inflexión del eje axial en el LQH, poniendo en contacto la Formación Chipaque con la Formación Guaduas y alcanzando una inclinación de 45° al W a partir de los datos estructurales obtenidos (Fig. 9, sección B-B'). Hacia el cabeceo del AZS, en la Falla de Neusa, la deformación es más

evidente a nivel de afloramiento, donde el fracturamiento es menos espaciado. Fracturas de cizalla con desplazamientos milimétricos son comunes a lo largo del AZS, en su mayoría con cinemática normal. El AZN es un anticlinal tumbado con su flanco oeste invertido (en el AZS es el flanco este el que aparece invertido), y cuyo núcleo está formado por rocas de la Formación Arenisca Dura. El rumbo de su eje axial es generalmente N30E. El flanco este, está formado por la Formación Guaduas, generando zonas con pendientes suaves a moderadas, mientras que el flanco oeste está formado por la Formación Plaeners, pasando hacia el norte a las formaciones Arenisca Dura y Tierna en contacto fallado en la mayor parte de su extensión con la Formación Guaduas. Ése contacto fallado se reconoce por la presencia de la Falla de Carupa, cuya inclinación es de ~35° con vergencia al NW. En el sector de Laguna Verde la Falla de río Guandoque pone en contacto la Formación Plaeners con la Formación Guaduas, mientras que hacia el norte el contacto es entre las formaciones Arenisca Dura y Guaduas. Pendientes estructurales son generadas por los escarpes de la Formación Arenisca Dura evidenciando una inclinación para la Falla de río Guandoque de aprox. 48° (Fig. 9, sección A-A'). Con base en los análisis obtenidos por la cartografía geológica inicial, así como los datos de fracturas y los datos cinemáticos, se obtuvo un reconocimiento de la zona, tanto de fallas como de lineamientos, siendo más importantes éstos últimos. El Lineamiento de Zipaquirá (LZ) (Lineamiento Salinas en Velandia & De Bermouides (2002)), de Quebrada Honda (LQH), de Susagua (LS) y la Falla de Neusa, presentan la evidencia tanto geomorfológica como estructural de un sistema transversal (i.e. zonas transversales) que afecta los pliegues y las fallas al menos en el AZ. El patrón de fracturamiento es uno de los factores que varía a medida que se acerca a los lineamientos: hacia el norte de la Falla de Neusa, en el AZN, el rumbo de las fracturas tiene rumbo dominante hacia el SW, mientras que hacia el sur de la falla, en el AZS este rumbo preferencial es hacia el NW-SE. Hacia el LZ sucede algo similar, ya que el rumbo varía de SW-NE al norte del lineamiento a W-NW al sur del mismo.

Tabla 1.
Datos de fallas y ejes cinemáticos correspondientes al sub-conjunto 1 que muestran coherencia mecánica y a partir de los cuales se realizó la solución del plano de falla. Los datos están en azimuth de rumbo.

Id	azimuth de rumbo	Datos de fallas			Ejes cinemáticos					
		Inclinación	Trend	Plunge	P		B		T	
					Azim	Inc	Azim	Inc	Azim	Inc
ESZ-1	326	88	326	88	281	8	135	80	11	6
ESZ-2	16	81	16	81	241	23	36	65	147	10
ESZ-3	231	77	231	77	138	58	231	2	323	32
ESZ-5	290	74	290	74	247	29	79	61	340	5
ESZ-9	90	88	90	88	222	17	94	64	318	20
ESZ-10	35	60	35	60	261	67	47	20	141	12

Fuente: Autores.

Otro factor notable es la extensión y rumbo de las estructuras: la Falla de Zipaquirá cambia abruptamente de dirección en su eje axial a medida que se acerca al LZ y la ZDZ, pasando de una dirección N-S a NNW, terminando abruptamente justo al norte de la ZDZ. El cambio de rumbo en las estructuras es visible igualmente con el eje axial del AZS y el Sinclinal de Neusa.

Otro factor reconocible en las secciones estructurales (Fig. 9) es la variación en el espesor de las formaciones Guaduas y Cacho, lo cual podría tener un origen sin-genético y estar asociada a un control estructural durante su depositación en el Cretácico Superior-Paleoceno y corresponder con la deformación pre-andina propuesta por Bayona et al. (2013). Los rasgos geomorfológicos y estructurales más notables que demuestran la influencia de la zona transversal del Neusa (Falla de Neusa) sobre la evolución de la zona de estudio pueden ser resumidas en: (i) Cambios en la vergencia de los pliegues, siendo NW para el AZN y SE para el AZS, (ii) terminación de fallas inversas y cambios en los niveles estratigráficos de despegue como la Falla de Las Margaritas, Falla de Carupa y Falla de río Guandoque, (iii) variaciones en la acomodación de la deformación bajo un mismo acortamiento, generando un pliegue anticlinal tumbado hacia el sur, mientras hacia el norte la deformación está acomodada en dos anticlinales tumbados cortados por fallas inversas de alto ángulo (Anticlinal de Carupa y AZN cortados por la fallas de río Guandoque y Carupa respectivamente).

5. Discusión

De acuerdo a la cartografía geológica y al análisis estructural obtenido de los datos cinemáticos y de fracturas s.l. uno de los factores que controlaron la evolución del AZ ha sido la presencia de éstas fallas transversales, identificadas en este trabajo como los Lineamientos de Zipaquirá (LZ), Lineamiento de Susagua (LS), Lineamiento de Quebrada Honda (LQH) y la Falla de Neusa (FN). Estudios regionales en la Sabana de Bogotá reportan sistemas de fallas con dirección NW-SE, transversales al rumbo general de la CO (e.g. Camargo, 1995; Velandia & De Bermoudes, 2002; Fierro & Amaya, 2008). Sarmiento-Rojas (2001) reconoce la presencia de paleo-fallas con dirección NW-SE que actuaban como zonas de transferencia separando las sub-cuencas mesozoicas y sirviendo de límite estratigráfico, marcando diferencias notables en los espesores de las secuencias sedimentarias cretácicas. De acuerdo a la cartografía geológica y al análisis estructural obtenido de los datos cinemáticos y de fracturas s.l. se puede estimar que uno de los factores que afectaron y controlaron la evolución del AZ ha sido la presencia de éstas fallas transversales, identificadas en este trabajo como los Lineamientos de Zipaquirá (LZ), Lineamiento de Susagua (LS), Lineamiento de Quebrada Honda (LQH) y la Falla de

Neusa (FN). Evidencias geomorfológicas, estructurales y paleomagnéticas que describen la influencia de las estructuras transversales con el desarrollo de pliegues y fallas longitudinales han sido propuestas por Jiménez et al. (2012) en el Anticlinal de la Hocha y el Sinclinal de San Jacinto en el Valle Superior del Magdalena.

El primer rasgo reconocible en el control estructural generado por las zonas transversales es la curvatura del eje axial del AZ a medida que es intersectado por cada una de las fallas o lineamientos (Fig. 2). Otro rasgo importante es la terminación de las fallas inversas y la conformación de estructuras en cola de caballo, siendo claro con las fallas de Carupa y río Guandoque. La revisión del patrón de fracturamiento permite identificar que en la mayoría (más del 90%) de los sitios, tanto las diaclasas como otros tipos de fracturas muestran una orientación preferencial ortogonal a la estratificación.

Este patrón (J1) muestra diaclasas que son perpendiculares entre si y que han tenido influencia en el desarrollo de planos de debilidad que han servido como punto de ruptura para la formación de fracturas asociadas al plegamiento y deformación reciente. Sólo en los afloramientos cercanos a la Zona de Deformación de Zipaquirá (ZDZ) aparece un tercer conjunto de fracturamiento ortogonal a la estratificación y oblicuo al conjunto J1. Al horizontalizar los polos de las fracturas se observa que la mayoría de las diaclasas han sido de origen diagenético o al menos pre-plegamiento, cuando las capas estaban aún en posición horizontal a sub-horizontal. Bergbauer & Pollard (2004) proponen un modelo de fracturas en los anticlinales Oil Mountain y Emigrant Gap (Wyoming, USA), donde encuentran dos conjuntos de diaclasas J1 y J2, formados en una etapa pre-plegamiento, lo cual permitió que a medida que avanzara la deformación, las diaclasas pre-existentes controlaran el campo de esfuerzos local, influenciando el desarrollo y propagación de nuevas fracturas en una dirección paralela a sub-paralela, independiente de la inclinación de las capas a medida que sufrían el plegamiento.

Este modelo también propone que algunas de las diaclasas han acomodado algo de desplazamiento a lo largo del rumbo de la estructura, además aportan que la deformación de cuerpo rígido (deformation) ha sido dominante en los flancos del pliegue, donde no hay evidencia de deformación interna (strain). La diferencia de este modelo con aquellos propuestos previamente (e.g. Stearns, 1968) es considerar la formación e influencia de fracturas anteriores al plegamiento. Teniendo en cuenta las condiciones de formación y evolución de la CO, el modelo propuesto por Bergbauer y Pollard (2004) se acerca más a la complejidad estructural observada, incluso Sánchez-Villar et al (2011) identifican patrones de fracturamiento con relaciones similares al modelo pre-plegamiento en el piedemonte oriental de la CO.

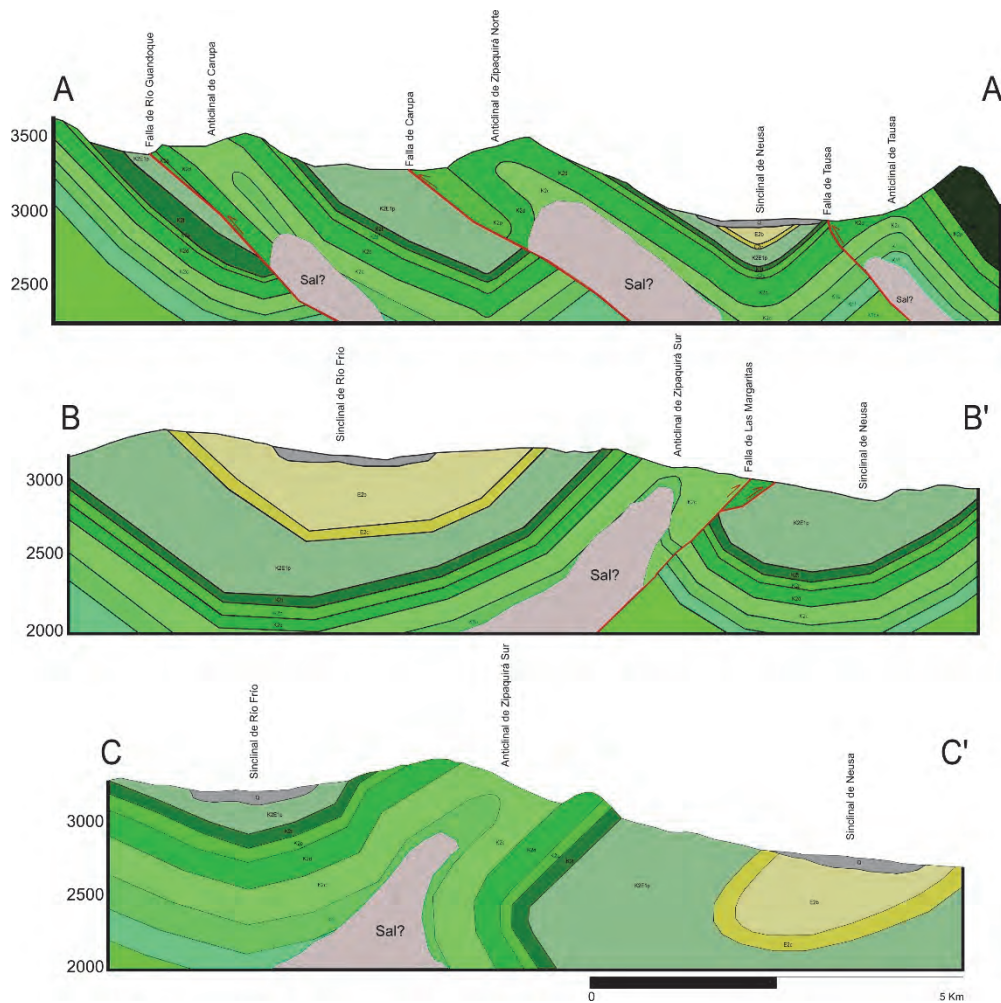


Figura 9. Secciones transversales elaboradas a lo largo del AZ donde se muestran las relaciones entre las diferentes estructuras y las unidades aflorantes. Nótese las variaciones laterales en los espesores de las formaciones Guadua y Cacho. La escala vertical está exagerada en 2x para resaltar las diferencias geomorfológicas entre el AZN y el AZS. Ver localización de las secciones en la Figura 2.
Fuente: Autores.

Siguiendo el modelo de Bergbauer & Pollard (2004) se puede estimar por lo tanto que el conjunto J1 encontrado a lo largo del AZ fue un factor anisotrópico fundamental para el desarrollo de las fracturas (J2) asociadas al inicio del levantamiento de la CO y la formación del pliegue, mientras que hacia las zonas con intensa deformación como la ZDZ,

tanto el LZ como la anisotropía pre-existente influenciaron la deformación frágil que afectó la zona. Aunque el conjunto J1 presenta la misma relación ortogonal con la estratificación tanto en el AZS como en el AZN, su dirección es diferente en los dos dominios. Como se muestra en los resultados, la Falla de Neusa y el LZ han actuado de límite estructural, controlando las fracturas J1. Mientras las diaclasas pre-formadas dominaron la orientación preferencial de las diaclasas sin o pos-pliegue (J2), las estructuras transversales controlaron la extensión y formación de las diaclasas J1. A partir de lo anterior se propone que los lineamientos y fallas transversales reconocidas fueron formadas con anterioridad al plegamiento y al desarrollo

inicial de las fracturas, mostrando así, que éstas estructuras heredadas han estado actuando en forma pasiva al menos desde el Cretácico, donde aportaron en la fase extensiva como zonas de relevo. Estas zonas transversales serían la (i) Zona Transversal del Neusa, (ii) Zona Transversal de Quebrada Honda, (iii) Zona Transversal de Susagua y (iv) la Zona Transversal de Zapaquirá.

La Zona Transversal de Zapaquirá es la de mayor relevancia estructural en la zona de estudio, definida por el Lineamiento de Zapaquirá y la Falla de Zapaquirá. La Zona Transversal de Zapaquirá hace parte de la terminación sur del AZS. De acuerdo al análisis cinemático, estas estructuras transversales tienen un componente normal, asociado a un régimen extensivo. En el presente estudio se propone que el sistema de fracturamiento ortogonal a la estratificación está relacionado con la carga litostática; al desarrollarse este fracturamiento aumenta la diferencia de energía potencial sobre el cuerpo salino y la liberación de presión en la roca de sobrecarga causa la intrusión (diapirismo activo) del Diapiro

Salino de Zipaquirá. Este mecanismo es reconocido para la intrusión de sal en niveles estratigráficos superiores (e.g. Hudec y Jackson, 2007; Fossen, 2010).

6. Conclusiones

El Anticlinal de Zipaquirá presenta una evolución cinemática compleja, debido a que múltiples factores controlan su extensión y geometría como lo son las zonas transversales, los niveles salinos y las fracturas preformadas. Estas zonas transversales, i.e. los lineamientos en dirección NW-SE y la Falla de Neusa, han actuado al menos desde el Cretácico determinando la orientación y propagación de las fracturas, mientras que para el Mioceno, facilitaron el ascenso de diapiros, la formación de dos dominios estructurales cuya evolución geológica fue diferenciada (AZS y AZN), la curvatura del AZ y sirvieron de límite estructural de las fallas longitudinales.

El 90% de las fracturas presentes a lo largo del AZ fueron formadas pre-plegamiento posiblemente por carga litostática (J1), ejerciendo una anisotropía mecánica durante la fase de crecimiento del pliegue y controlando la orientación de las nuevas fracturas (J2). Sólo hacia las zonas complejas como la Zona de Deformación de Zipaquirá se observa un tipo de fracturas N-S neoforzado (J3).

El predominio de una cinemática extensiva radial en diferentes sectores del AZ permiten inferir un emplazamiento diapírico en el núcleo de la estructura facilitado por las zonas transversales que de acuerdo a la solución de plano de falla muestran una cinemática normal-sinistral, lo cual favorecería la creación de espacios de acomodación para los cuerpos salinos por liberación de la presión de sobrecarga.

Agradecimientos

Los autores queremos agradecer por el apoyo económico brindado por la ACGGP y la Corporación Geológica ARES a través del Fondo Corrigan 2014, sin el cual está investigación no se hubiera desarrollado. A Agustín Cardona y Santiago Hincapié y finalmente a los revisores anónimos por sus valiosos comentarios.

Bibliografía

- [1] Allmendinger, R., Cardozo, N. and Fisher, D., Structural geology algorithms: Vectors and tensors in structural geology, Cambridge University Press, Cambridge, 2012. DOI: 10.1017/CBO9780511920202.
- [2] Bayona, G., Cortés, M., Jaramillo, C., Ojeda, G., Aristizabal, J.J. and Reyes-Harker, A., An integrated analysis of an orogen-sedimentary basin pair: Latest Cretaceous-Cenozoic evolution of the linked Eastern Cordillera orogen and Llanos foreland basin of Colombia, GSA Bulletin, 120 (9), pp. 1171-1197, 2008. DOI:10.1130/B26187.1.
- [3] Bayona, G., Cardona, A., Jaramillo, C., Mora, A., Montes, C., Caballero, V., Mahecha, H., Lamus, F., Montenegro, O., Jimenez, G., Mesa, A. and Valencia, V., Onset of fault reactivation in the Eastern Cordillera of Colombia and proximal Llanos Basin; response to Caribbean-South American convergence in early Paleogene time, In: Thick-Skin-Dominated Orogens: From initial inversion to Accretion, editado por M. Nemcok, A. R. Mora, J. W., Cosgrove, Geological Society of London, Special Publication, 377, 2013, 31 P. DOI:10.1144/SP377.5.
- [4] Bergbauer, S. and Pollard, D., A new conceptual fold-fracture model including pre-folding joints, based on the Emigrant Gap anticline, Wyoming. Geological Society of America Bulletin, 116 (3), pp. 294-307, 2004. DOI: 10.1130/B25225.1
- [5] Caballero, V., Parra, M. y Mora, A., Levantamiento de la Cordillera Oriental de Colombia durante el Eoceno tardío-Oligoceno temprano: Proveniencia sedimentaria en el Sinclinal de Nuevo Mundo, cuenca del Valle Medio del Magdalena, Boletín de Geología, 32 (1), pp. 45-77, 2010.
- [6] Camargo, G., Elementos estructurales del área de la Sabana de Bogotá y alrededores. VI Congreso Colombiano del Petróleo. Bogotá. 1995. 8 P.
- [7] Carey, W., The Orocline concept in Geotectonics, Papers and Proceedings of the Royal Society of Tasmania, 89, pp. 255-288, 1955.
- [8] Castro, W. y Lozano, A., Modelamiento geométrico y análisis de la evolución estructural del sector central del Anticlinal de Zipaquirá (Zipaquirá, Cundinamarca). Tesis de Pregrado. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. 2003. 111 P.
- [9] Corredor, F., Eastward extent of the Late-Eocene-Early Oligocene onset of deformation across the northern Andes: Constraints from the northern portion of the Eastern Cordillera fold belt, Colombia. Journal of South American Earth Sciences, 16, pp. 445-457, 2003. DOI:10.1016/j.jsames.2003.06.002.
- [10] Delvaux, D. and Sperner, B., New aspects of tectonic stress inversion with reference to the TENSOR program, en Nieuwland, D. New insights into structural interpretation and modelling, Geological Society of London, Special Publication, 212, pp. 75-100, 2003. DOI: 10.1144/GSL.SP.2003.212.01.06.
- [11] Fierro-Morales, J. y Angel-Amaya, J., Tectónica activa y sismicidad en la Sabana de Bogotá (Colombia-Suramérica). XIII Congreso Latinoamericano de Geología. Perú. 2008. 6 P.
- [12] Fossen, H., Structural Geology, Cambridge University Press, 1st edition, New York, 2010. DOI: 10.1017/CBO9780511777806.
- [13] Grohmann, C.H. and, Campanha, C.A., OpenStereo: Open source, crossplatform software for structural geology analysis, AGU Fall meeting. San Francisco (USA). 2010. 2 P.
- [14] Hudec, M. and Jackson, M., Terra infirma: Understanding salt tectonics, Earth-Sciences Reviews, 82, pp. 1-18, 2007. DOI: 10.1016/j.earscirev.2007.01.001.
- [15] Jiménez, G., Rico, J., Bayona, G., Montes, C., Rosero, A. and Sierra, D., Analysis of curved folds and fault/fold terminations in the southern Upper Magdalena Valley of Colombia. Journal of South American Earth Sciences, 39, pp. 184-201, 2012. DOI: 10.1016/j.jsames.2012.04.006.
- [16] Jiménez, G., Speranza, F., Faccena, C., Bayona, G. and Mora, A., Paleomagnetism and magnetic fabric of the Eastern Cordillera: Evidence for oblique convergence and non-rotational reactivation of a Mesozoic intracontinental rift. Tectonics, 33, pp. 1-28, 2014. DOI: 10.1002/2014TC003532.
- [17] Julivert, M., Los rasgos tectónicos de la región de la Sabana de Bogotá y los mecanismos de la formación de las estructuras, Boletín de Geología, 11, pp. 5-21, 1963.
- [18] Kammer, A., Estructuras y deformaciones del borde oriental del Macizo de Floresta, Geología Colombiana, 21, pp. 65-80, 1996. DOI: 10.15446/gc.
- [19] Kammer, A. and Sánchez, J., Early Jurassic rift structures associated with the Soapaga and Boyaca Faults of the Eastern Cordillera, Colombia: Sedimentological inferences and regional implications. Journal of South American Earth Sciences, 21, pp. 412-422, 2006. DOI: 10.1016/j.jsames.2006.07.006.
- [20] Kerr, A. and Tarney, J., Tectonic evolution of the Caribbean and northwestern South America: The case for accretion of two Late Cretaceous oceanic plateaus. Geological Society of America, 33(4), pp. 269-272, 2005. DOI: 10.1130/G21109.1
- [21] López, C., Briceño, A. y Buitrago, J., Edad y origen de los diapiros de sal de la Sabana de Bogotá. Tesis de Maestría. Universidad Nacional

- de Colombia. Bogotá, Colombia. 1990, 40 p.
- [22] Lozano, A., Castro, W. y Linares, R., Modelamiento y análisis estructural del anticlinal de Zipaquirá y su aplicación a la interpretación a zonas de piedemonte. VIII Simposio Bolivariano-Exploración Petrolera en las Cuencas Subandinas. 2003, 11 P.
 - [23] Marret, R. and Allmendinger, R., Kinematic analysis of fault-slip data, *Journal of Structural Geology*, 12(8), pp. 973-986, 1990. DOI: 10.1016/0191-8141(90)90093-E.
 - [24] Marshak, S., Salients, recesses, arcs, oroclines and syntaxes-A review of ideas concerning the formation of map-view curves in fold-thrust belts, en McClay, K.R. ed., *Thrust tectonics and hydrocarbon systems*: AAPG Memoir 82, pp. 131-156, 2004.
 - [25] McLaughlin, D. y Arce, M., Mapa geológico del cuadrángulo K11 (Zipaquirá). INGEOMINAS, Bogotá, Colombia, 1975.
 - [26] Mojica, J., Arévalo, O.J. e Ibáñez-Mejía, M., Fallas plioceno-cuaternarias ocultas bajo los sedimentos de la zona urbana de Bogotá: Importancia para la evaluación de la amenaza sísmica potencial. *Memorias XI Congreso Colombiano de Geología*. Bucaramanga, Colombia, 2007, 16 P.
 - [27] Montoya, D. y Reyes, G., Geología de la Plancha 209 Zipaquirá. INGEOMINAS, Bogotá, Colombia, 2003, 156 P.
 - [28] Mora, A., Horton, B., Mesa, A., Rubiano, J., Ketcham, A., Parra, M., Blanco, V., García, D. and Stockli, D., Migration of Cenozoic deformation in the Eastern Cordillera of Colombia interpreted from fission track results and structural relationships: implications for petroleum systems. *AAPG Bulletin*, 94, pp. 1543-1580, 2010. DOI: 10.1306/01051009111.
 - [29] Ramírez-Arias, J.C., Mora, A. y Parra, A., Indicadores sedimentológicos de la evolución tectónica durante el Mioceno en el Sinclinal de Nunchía, piedemonte de la Cordillera Oriental de Colombia. *Boletín de Geología*, 32(2), pp. 29-44, 2010.
 - [30] Sarmiento-Rojas, L., Mesozoic Rifting and Cenozoic basin inversion history of the Eastern Cordillera, Colombian Andes; Inferences from tectonic models. *Ecopetrol-Netherlands Research, School of Sedimentary Geology*, Bogotá, Publication 295, 2001.
 - [31] Sasvári, Á. and Baharev, A., SG2PS (Structural Geology to Post Script Converter) - A graphical solution for brittle structural data evaluation and paleostress calculation, *Computers and Geosciences*, 66, pp. 81-93, 2014. DOI: 10.1016/j.cageo.2013.12.010.
 - [32] Stearns, D.W., Certain aspects of fracture in naturally deformed rocks, en: Riecker, R., ed., *Rock mechanics seminar*, Beldford, Terrestrial Sciences Laboratory, pp. 97-118. 1968.
 - [33] Thomas, W., Controls on location of transverse zones in thrust belts, *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 83(3), pp. 727-744, 1990.
 - [34] Velandia, F. y De Bermoudes, O., Fallas longitudinales y transversales en la Sabana de Bogotá, Colombia. *Boletín de Geología*, 24(39), pp. 37-48, 2002.

H. García, es Geólogo egresado en el año 2015 de la Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. Su principal interés es la integración de la geología estructural, cartografía geológica y magnetismo de rocas para entender los mecanismos de deformación en estructuras curvas y heredadas, así como rotación y traslación de bloques en los Andes del Norte. Actualmente trabajando en el Proyecto Vial Mulaló-Loboguerrero como Geólogo de Campo.
ORCID: 0000-0002-7714-7161.

G. Jiménez, es Geólogo egresado en el año 2005 de la Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. Realizó su Maestría en la Universidad Nacional de Colombia-Bogotá (2008) y el Doctorado en la Università degli studi Roma TRE (2013). Geólogo con experiencia e interés en geología estructural, paleomagnetismo, modelamiento análogo y estratigrafía del Cenozoico de la Cordillera Oriental. Como geólogo el principal interés y el área de trabajo ha sido en el cálculo de rotaciones y traslaciones de bloques, evolución de estructuras curvas a diferentes escalas usando el paleomagnetismo, estudio de zonas transversales y cartografía geológica.
ORCID: 0000-0001-9274-1874.

Simulation of processing minerals plants in Colombia through MODSIM®

Moisés Oswaldo Bustamante-Rúa^a, Alan José Daza-Aragón^b, Pablo Bustamante-Baena^c
& Manuel Julián Barros-Daza^d

^aFacultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. mobustam@unal.edu.co

^bFacultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. ajdazaa@unal.edu.co

^cFacultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. pabustamanteba@unal.edu.co

^dFacultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. mjbarrosd@unal.edu.co

Received: May 5th, 2015. Received in revised form: November 30th, 2015. Accepted: December 9th, 2015.

Abstract

The aim of this study was the analysis of two particular scenarios of the mining industry such as kaolin and coal, to determine the usefulness of MODSIM® software in the simulation of mining-metallurgical processing plants. To do this, started from some review of the literature and information obtained as a result of the trips were made to mines that were studied. Among the results, it was clear that the use of this software provides great advantages in learning efficiency in plants mineral processing, as was observed in the batteries of hydrocyclones for separation of kaolin where some problems arise in this operation; while in the specific coal washing process, a good separation is achieved. This is of vital importance in mineral processing plants, since it shows the efficiency of the equipment and, in turn, facilitates the adoption of corrective measures to improve the process, and therefore the final recovery.

Keywords: software; simulation; plants; minerals processing; MODSIM®; coal; aggregates; kaolin.

Simulación de plantas de procesamiento de minerales a través de MODSIM®

Resumen

Se presentan los resultados del estudio y análisis de dos escenarios particulares en la industria minera como lo son el caolín y el carbón, para determinar la utilidad del software MODSIM® en la simulación de plantas de procesamiento minero-metalúrgicas. Para esto, se partió de datos obtenidos de información tanto bibliográfica como de la obtenida directamente en mediciones que se realizaron a estas minas. Se pudo analizar que el uso de este software aporta grandes ventajas a la hora de conocer la eficiencia en las plantas de beneficio de minerales. En las baterías de hidrociclones para la separación de caolín, se evidencian algunos problemas en la operación; mientras que en el proceso de lavado de carbón, se logra una buena separación. Esto es de vital importancia en las plantas, puesto que permite conocer la eficiencia de los equipos y además, facilita la toma de medidas correctivas para mejorar el proceso.

Palabras clave: software, simulación, plantas, minerales, beneficio, MODSIM®, carbón, agregados, caolín.

1. Introducción

Uno de los principales problemas a los cuales están expuestas las plantas de beneficio de minerales en su operación, está ligado a la falta de eficiencia de cada uno de los equipos y de la planta global en el proceso de recuperación de minerales. Este problema se debe en gran parte a la toma de decisiones incorrectas al momento de diseñar la planta, como puede ocurrir si se hace una mala

distribución y sobre dimensionamiento de los equipos, si se tiene una sobrecarga o carga inferior a la debida en medios moledores, altos tiempos de residencia que influyen directamente en el consumo de energía y en general, un conjunto de variables de operación que no son totalmente controladas y por tanto, tienden a generar una gran afectación en la recuperación del mineral de interés [1,2].

El uso de herramientas como el software MODSIM® adquiere un alto grado de importancia en esta problemática,

puesto que pueden ayudar a mejorar la eficiencia en la recuperación de una planta en específica, de acuerdo a sus exigencias y a los equipos que esta puede manejar. MODSIM® es un software especializado en la simulación minero metalúrgica de plantas de beneficio de minerales, el cual otorga grandes ventajas al proceso, puesto que permite predecir con simples simulaciones los resultados que se van obtener y por otro lado, permite tener control en caso de tener variables erróneas en alguna operación en específica, para que estas se puedan corregir a tiempo y no genere una mayor afectación en la recuperación [1,2].

2. Metodología

Para conocer la utilidad del software MODSIM®, se procedió inicialmente con la revisión bibliográfica para saber si anteriormente ya se habían realizado estudios de plantas específicas en Colombia implementando este software. Se estudiaron dos tipos de plantas de beneficio, una típicamente de recuperación de arcillas caoliníticas (Saavedra Gómez & Bustamante Rúa, 2008) y otra planta típica de lavado de carbones térmicos (Cerrejón, 2015).

Este proceso parte en el momento en que la materia prima es depositada por medio de un cargador a una tolva. En la parte inferior de esta se encuentra una banda transportadora que guía el material a un tromel, que saca la grava mayor a 4 cm y homogeniza el material. El resto del material llega a una cuba que envía el material al primer hidrociclón de fondo plano (1006). El sobre flujo se dirige a la primera batería de hidrociclones (2002), mientras que el material que se va por el bajo flujo se dirige al proceso de arenas silíceas, en el cual se encuentran dos hidrociclificadores. El primero es alimentado con el bajo flujo del Hidrociclón (1006), el rebose del hidrociclificador va para una cuba la cual alimenta el segundo Hidrociclón (1012), el bajo flujo del hidrociclificador va a un segundo hidrociclificador, el rebose de este segundo se dirige a una cuba la cual envía el material a un tercer Hidrociclón, pero este es de fondo cónico (1016B), el bajo flujo de este se dirige a una zaranda la cual nos entrega como producto la arena gruesa [3].

Los tres sobre flujos de los hidrociclones 1006, 1012 y 1016B, se dirigen a la primera batería de hidrociclones (2002), a partir de esta etapa comienza el proceso del caolín. El material llega a la primera batería (2002) conformada por 12 hidrociclones el sobre flujo de la batería (2002), se dirige a otras dos baterías de hidrociclones (2004A y B). El bajo flujo del 2004A y B va a una cuba la cual alimenta la batería (2006), y el sobre flujo de la batería 2004A y B es material final. El sobre flujo de la batería (2006) se dirige a una cuba la cual alimenta la última batería de hidrociclones (2010), el bajo flujo de la 2006 son colas, mientras que el sobre flujo de la batería 2010 es material final y el bajo flujo va a la cuba que envía el material a la batería 2006 [3].

La modelación se efectuó sobre el sistema de baterías de hidrociclones que son: la 2002, 2004A, 2004B, y 2006, en estas baterías se efectúa el proceso de caolín. Para esto fue

necesario, realizar el diagrama de flujo del proceso de la planta en MODSIM®.

Otra planta que fue objeto de estudio, fue la de lavado de carbón de la mina Cerrejón que está ubicada entre los municipios de Maicao al norte y Barrancas al sur. El yacimiento está dividido en tres zonas definidas así: Zona Norte, Zona Centro las cuales se encuentran en explotación y Zona Sur que se encuentra en exploración. La mina cubre aproximadamente un área de 78.000 hectáreas [4].

Dentro de las actividades que se desarrollan en esta mina para la extracción del carbón se tiene: un descapote, en el cual se retira cuidadosamente la capa vegetal y se remueve la capa de suelo, la cual se almacena en pilas para la rehabilitación futura de áreas intervenidas en la explotación. Posteriormente se realizan perforaciones y voladuras, en las cuales todo el material estéril excavado es volado utilizando explosivos a base de nitrato de amonio. Para esto, implementan el sistema de voladura bajo manto que busca minimizar la necesidad de perforar y cargar en taludes inclinado. Seguidamente, se procede al cargue y acarreo del material estéril, lo cual en su mayoría es realizado por 1 pala, (eléctrica, hidráulica o electrohidráulica), ayudado algunas veces por cargadores frontales. Se utilizan también para la operación 1 o 2 tractores de orugas, y una flota de camiones de 240 y/o 320 toneladas. Por otro lado, se desarrolla el cargue y acarreo de carbón, utilizando cargadores frontales que lo depositan a los camiones carboneros CAT 789C (190 toneladas). Este carbón es llevado a la planta de trituración, donde se reduce de tamaño por medio de trituradoras de rodillos, con tamaños de salida de 2 pulgadas hasta 6 pulgadas. Hay dos plantas con capacidad de 3000 ton/h y 1500 ton/h respectivamente. Por último, se realiza el proceso de lavado de carbón para quitarle la ceniza presente en la superficie del material. En la visita no se pudo dar información de este proceso ya que los ingenieros encargados de esta parte no se encontraban en la mina en ese momento. Por tal razón, la simulación se hizo en base a la información suministrada de la mina [3].

La modelación en MODSIM®, se realizará específicamente sobre el lavado de carbón, puesto que es el proceso final, y es donde se busca constatar si se desarrolla una correcta separación de las corrientes, entre el material contaminante y el carbón, ambos con diferente granulometría.

3. Resultados y discusión

3.1. Planta de caolín

Para las corrientes 1, 2 y 3, las cuales corresponden a la alimentación, al bajo flujo y al sobre flujo respectivamente del primer hidrociclón (2002), se tiene el resultado de la modelación que se muestra en la Fig.1.

Para los flujos 5, 6 y 7, que corresponden a la batería de hidrociclones (2004 A y B), y en las cuales se obtiene el primer producto final, se tienen los resultados de la Fig. 2.

Y para la corrientes 13, 14 y 15, que corresponden al hidrociclón (2010), se tienen los resultados de la Fig.3.

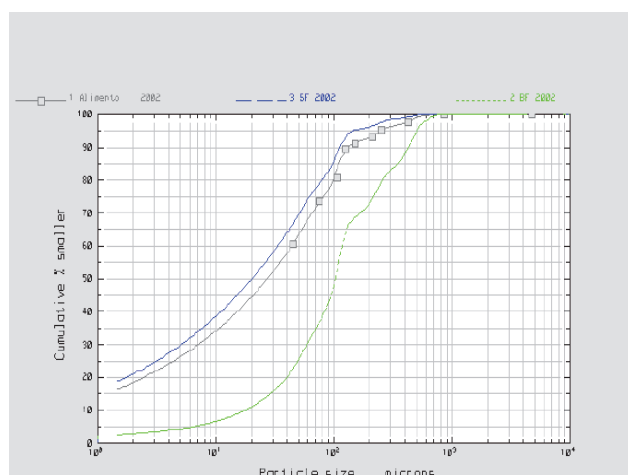


Figura 1. Resultado de la simulación, Tamaño de partículas Vs pasante acumulado.

Fuente: [3]

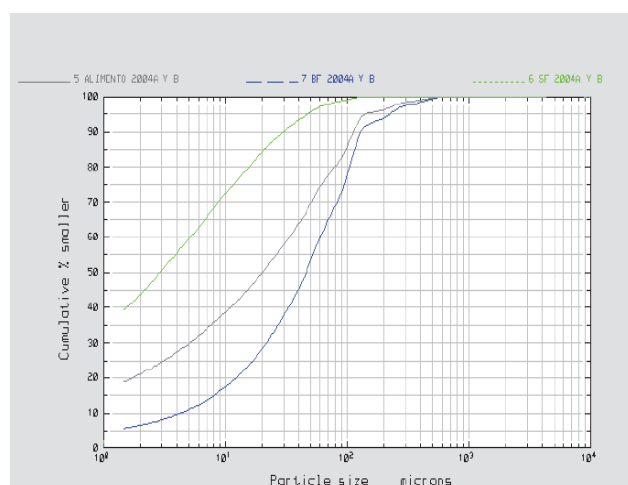


Figura 2. Resultado de la simulación, Tamaño de partículas Vs pasante acumulado.

Fuente: [3]

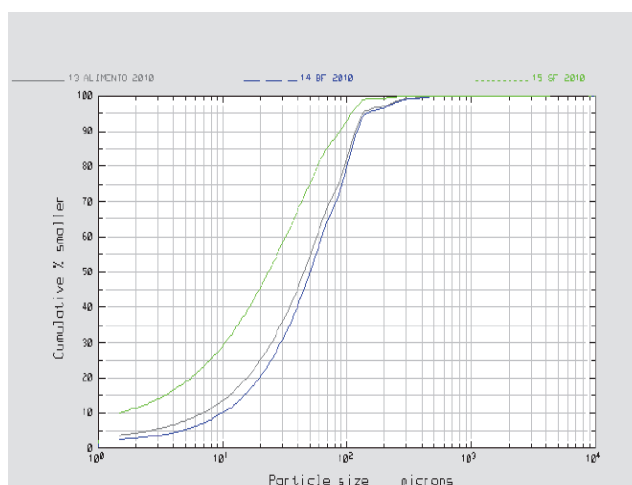


Figura 3. Resultado de la simulación, Tamaño de partículas Vs pasante acumulado.

Fuente: [3]

Para los flujos 5, 6 y 7, que corresponden a la batería de hidrociclones (2004 A y B), y en las cuales se obtiene el primer producto final, se tienen los siguientes resultados: En los resultados de la corriente número 6 como se puede ver en la figura 2, perteneciente al sobre flujo de la batería 2004A y B, para un tamaño de partícula de $.465E-04$ metros (o equivalentemente de malla 325 o 46 micras) se obtiene un retenido del 5.15% (o equivalentemente a una pasante igual a 94.85%); mientras que en la planta real se tiene un retenido sobre esta malla está en el intervalo de 2.00% a 3.00% [3].

Como se puede apreciar, los resultados obtenidos por el MODSIM® están muy ajustados, aunque la diferencia es alrededor del 2%. Para esta misma corriente se obtiene en la simulación un caudal de sólidos aproximado de 5 Ton/hr; mientras que en la realmente en la planta se tiene un caudal de sólidos de 3.5 ton/hr, obteniéndose una diferencia de 1.5 ton/hr entre ambos resultados [3].

En los resultados mostrados de la corriente número 15, la cual representa el sobre flujo de la batería 2010, que es material final, el retenido sobre malla 325 es de 23 %, en la Torre Eral este retenido varía entre un (6.00-7.00) %, lo que muestra un desfase aproximado de 17%. Esto se debe a la diferencia que se encuentra en las primeras corrientes. El caudal de sólidos dado por el MODSIM® en esta corriente es de 4.40 ton/hr, mientras que en la planta se logra un valor de 3 Ton/hr. Por tanto el desfase es aproximadamente de 1.30 ton/hr [3].

Esto muestra una gran inconsistencia con los datos reales, lo cual se puede deber a varios factores, como malas mediciones reales, la idealización del proceso por parte del MODSIM® eal no tener introducirle todas las variables de operación, entre otros [3].

En este sentido, es importante analizar tanto en la planta física como en el software, los causantes de las diferencias entre ambos resultados, para así tener la certeza realmente de las condiciones con que se está operando. Esta es una gran ventaja que aporta MODSIM®, ya que permite comparar resultados y a su vez, determinar si se están correctas mediciones en la planta.

3.2. Planta de lavado de carbón

Al desarrollar esta modelación del proceso de lavado de carbón en el software MODSIM®, se obtuvo el resultado que se muestra en la Figura 4.

Por lo anterior, de acuerdo a la información que se ingresó al software para la modelación, se tiene que el lavado de carbón se puede dar como una distribución de tamaños de partículas, haciendo énfasis que las partículas pequeñas tienden a deprimirse y el carbón flota por su naturalidad como hidrófobo. Con este método de lavado se puede disminuir el porcentaje de cenizas del 7-8% al 2-3% y se aumentaría el poder calorífico promedio del carbón que son de 1500-1800, lo cual lo haría más apetitoso comercialmente. Este análisis se obtuvo gracias a las ventajas que aporta la simulación con MODSIM®, teniendo en cuenta aspectos como las variables de entrada y la elección del modelo indicado. Cabe resaltar,

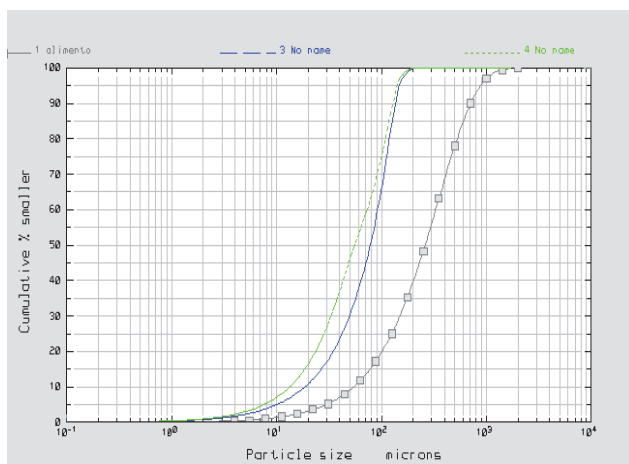


Figura 4. Resultado de la simulación, Tamaño de partículas Vs pasante acumulado.

Fuente: Los Autores

que actualmente este software no se usa en la empresa para de medir la calidad de carbón, pero se espera que la herramienta pueda ser aprovechada en un futuro.

4. Conclusiones

En la figura. 1 que representa la DTP de la batería de hidrociclones que recibe el material inicial para el caso de la simulación de la planta de procesamiento de caolín, se puede observar los granulométricos de los resultados obtenidos por el software MODSIM®, porcentaje acumulado vs. Tamaño de partícula. Esta gráfica es muy importante, ya que muestra las tres corrientes de las baterías, las cuales a su vez expresan la buena o mala separación de las baterías. Por tal razón, entre más separadas estén las curvas, será mucho mejor la clasificación de la batería. En este caso, como se puede evidenciar claramente que las corrientes de alimentación, sobre flujo y bajo flujo están separadas, lo que nos indica una buena separación en la batería.

En la figura. 2, la cual representa la batería que entrega el primer material final, no sucede lo mismo, puesto que si se observan las tres corrientes, se logra analizar que las curvas de alimentación y sobre flujo están muy pegadas. Esto quiere decir que la separación no se realiza correctamente y por tanto no es buena.

En la figura. 3, la cual hace referencia a la batería que entrega el segundo material final, se puede ver que las curvas de sobre flujo y bajo flujo están poco separadas. Esto ocurre debido a que la batería inmediatamente anterior, había entregado un material fino.

Los resultados del hidrociclón (2006) a pesar de que fueron arrojados por el software con la simulación, no se presentaron en este trabajo, puesto que sólo se buscó mostrar aquellos resultados representativos que demostraran la utilidad de MODSIM®. Por esta razón solo se consideró solamente el primer hidrociclón (2002), la baterías 2004 A y B, y el último hidrociclón.

Con el uso de MODSIM®, se pudo hacer una comparación entre los resultados obtenidos realmente en la

planta de caolín y los que se obtuvieron producto de la simulación con el software, siendo estos últimos un poco diferentes a los reales. Esto se debe principalmente a que la información suministrada por la empresa fue algo limitada, y a su vez a la idealización que realiza el software en algunos casos si no se le ingresa completamente todos los datos que requiere.

Para el caso de lavado de carbón, se puede evidenciar en la figura. 4 que también se logra una separación entre las partículas pequeñas y las partículas de carbón. Esto era de suponerse, puesto que el carbón por su carácter hidrófobo, tiende a flotar y separarse de las demás partículas.

Es muy importante hacer énfasis que en la medida en que se le suministre una información más completa al software, garantizando a su vez que esta sea correcta, se podrán obtener mejores resultados, los cuales pueden aproximarse mucho más a la realidad. Esto quiere decir que MODSIM® es muy útil, aunque puede ser mejorada.

Agradecimientos

Programa Nacional De Semilleros De Investigación, Creación E Innovación De La Universidad Nacional De Colombia 2013-2015, proyecto 25661 de la Universidad Nacional de Colombia, e Instituto de Minerales CIMEX.

Referencias

- [1] King, R.P. Modeling and simulation of mineral processing systems, 2 Ed., Colorado, USA SME, 2012, pp. 1-5.
- [2] King, R.P. Modular simulator for mineral processing plants. 7th Ed., Salt Lake City, USA, Mineral Technologies International, 2003, pp. 1-2.
- [3] Saavedra-Gómez, O.I y Bustamante-Rúa M.O., Simulación de una planta de caolín a través de MODSIM®, Trabajo de grado, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, 2008, 43 P.
- [4] Cerrejón minería responsable, nuestra empresa - Calidad del producto, [Online] 2015. Disponible en: <http://www.cerrejon.com/site/nuestra-empresa/calidad-del-producto.aspx>

M.O. Bustamante-Rúa, es Ing. de Minas y Metalurgia de la Universidad Nacional de Colombia, MSc en Ciencias de la Ingeniería con Mención en Metalurgia Extractiva - Mención - Mineralurgia de la Universidad de Concepción -Chile, DSc. en Ciencias de la Ingeniería con Mención en Metalurgia Extractiva - Minería de la Universidad de Concepción - Chile. Profesor Titular de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, Director e Investigador del Instituto de Minerales CIMEX - Facultad de Minas, de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín ha dirigido e integrado proyectos de investigación en las áreas de concentración y beneficio de minerales, modelación y optimización matemática de procesos y operaciones mineras, reología de suspensiones y pastas, ha publicado artículos en revistas científicas y participado como expositor en congresos y simposios nacionales e internacionales. Además ha sido director de diversas tesis de Maestría y Doctorado.
ORCID: 0000-0002-1692-991X

A.J. Daza-Aragón, es ingeniero de Minas y Metalurgia de la Universidad Nacional de Colombia, finalizó sus estudios en 2015. Estudiante Auxiliar del Instituto de Minerales CIMEX, donde participó en dos semilleros en asociación con el Programa Nacional de Semilleros de Investigación, Creación e Innovación de la Universidad Nacional de Colombia 2013-2015: Recuperación de oro ultrafino y modelación de plantas minero-metalúrgicas

a través del software MODSIM. Sus intereses actualmente se centran en procesamiento de minerales.

ORCID: 0000-0001-7596-9666

M.J. Barros-Daza, es Ingeniero de Minas y Metalurgia de la Universidad Nacional de Colombia, finalizó sus estudios en 2015. Ganador del Concurso Mejores Trabajos de Grado de Ingeniería de Minas y Metalurgia del Año 2015. Es estudiante auxiliar del Instituto de Minerales CIMEX, donde también participo en dos semilleros acerca Recuperación de oro ultrafino y modelación de plantas minero-metalúrgicas a través del software MODSIM. Sus intereses actualmente se centran en procesamiento de minerales, minería subterránea en ventilación minera y flotación de minerales.

ORCID: 0000-0002-3481-4331

P. Bustamante-Baena, es Ingeniero de Minas y Metalurgia de la Universidad Nacional de Colombia, finalizó sus estudios en 2014. Ganador del Concurso Mejores Trabajos de Grado del Año 2015, fue estudiante auxiliar del Instituto de Minerales CIMEX. Donde también participo en dos semilleros en asociación con COLCIENCIAS de: Recuperación de oro ultrafino y modelación de plantas minero-metalúrgicas a través del software MODSIM. Sus intereses actualmente se centran en procesamiento de minerales.

ORCID: 0000-0002-8409-5531

Aggregated conceptual model of sediment transport for mountain basins in Antioquia- Colombia

Santiago Cataño-Álvarez ^a & Jaime Ignacio Vélez-Upegui ^b

^aDepartamento de Geociencias y Medio Ambiente, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. scatanoa@unal.edu.co

^bDepartamento de Geociencias y Medio Ambiente, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. jivelezu@unal.edu.co

Received: September 03th, 2015. Received in revised form: November 30th, 2015. Accepted: December 9th, 2015.

Abstract

An aggregated model to estimate mean denudation rates of tropical mountain basins with limited data is presented, which is calibrated for Antioquia (Colombia); based on the transport equation of Engelund-Hansen. Two complementary approaches are purposed: (1) alluvial river reach model, dependent on discharge, slope and hydraulic geometry and (2) hillslope model dependent on discharge minus base flow, slope, drainage density and flow convergence degree. Both models are closed with a regression for the Shields parameter, depending on sediment yield ($t/km^2/yr$) and an erodibility factor, which is considered robust due to the diversity of scale, morphology and weather of the 23 basins analyzed. Both model approaches predicts inside a +/- 50% margin of error the sediment yields of 70% of the basins, those with less peculiarities; correcting it with a bed load portion, additional to the suspended transport measured, analytically estimated and proved with field data.

Keywords: tropical mountain basins; hillslope erosion; sediment yield; sediment transport; bed load; alluvial rivers; gravel rivers.

Modelo conceptual agregado de transporte de sedimentos para cuencas de montaña en Antioquia- Colombia

Resumen

Se presenta un modelo agregado para estimar tasas medias de producción de sedimento en cuencas tropicales de montaña con información escasa, calibrado para Antioquia (Colombia); basado en la ecuación de transporte de Engelund-Hansen. Dos enfoques complementarios se proponen: (1) modelo de cauce aluvial, según caudal, pendiente y geometría hidráulica y (2) modelo de ladera, según caudal menos flujo base, pendiente, densidad de drenaje y grado de convergencia del flujo. Ambos modelos cierran con una regresión para el parámetro de Shields, en función del rendimiento sólido ($t/km^2/año$) y un factor geológico, que se considera robusta por la diversidad de escala, morfología y clima de las 23 cuencas analizadas. Ambos enfoques del modelo predicen dentro de +/- 50% de error el rendimiento sólido del 70% de las cuencas, las de menos particularidades; corrigiéndolo con una porción por el fondo, adicional al transporte en suspensión medido, estimada analíticamente y probada con mediciones.

Palabras clave: cuencas tropicales de montaña; erosión de laderas; producción de sedimentos; transporte de sedimentos; carga de fondo; ríos aluviales; ríos de gravas.

1. Introducción

Las cuencas de Antioquia drenan hacia el río Magdalena o el Océano Pacífico, siendo dos de las vertientes más erosivas en Sudamérica [19]. Esto es un reto para el aprovechamiento del gran potencial hidráulico de la región [16], pues por ejemplo debe controlarse la colmatación, que afecta la regulación del recurso [26], la hidráulica en zonas de toma [28] y la calidad del agua aprovechada.

Ahora bien, la complejidad del transporte de sedimentos está en las múltiples variables que lo afectan, con alta

variabilidad espacio temporal [26] a diferentes escalas y en la interrelación de los procesos. Por tanto no hay consenso en una teoría universal que prediga este transporte en los ríos [17], lo que implica alta incertidumbre en las estimaciones [34]. 90% de las cuencas en el mundo carecen de una medición sistemática y confiable de sedimentos [19] y, a nivel de Antioquia, [9] dice que los estudios de sedimentos requieren un análisis regional que combine las variables físicas de más incidencia, en especial para los frecuentes ríos de lecho no aluvial - cohesivo o rocoso. Entonces la modelación es la alternativa para estos estudios, ante

información deficiente y demanda de estimaciones para diseño de obras y decisiones regionales.

La producción media de sedimentos se ha modelado con ajustes empíricos, p. ej. USLE [47], que requiere un factor de ajuste diferente para cada región [46], dificultando la extrapolación del método para cuencas sin datos. A escala de cuencas grandes (más de 10000km²) han estimado vía correlación la producción media según área, litología, clima, relieve (p. ej. [42]), vegetación y retención en llanuras [19]. Si bien los modelos dan idea sobre la posible influencia relativa de las variables, su enfoque empírico y de gran escala resulta en hipótesis de procesos demasiado generalizadas para la escala regional –cuencas medianas, de 10 a 10000 km²- de interés aquí. Por otra parte, pocas cuencas cuentan con información intradiaria [23], [43], para ajustar modelos estadísticos de más corto plazo [15], [20], como el caso de la curva de calibración concentración vs caudal.

El incremento de la capacidad de cálculo ha permitido que, donde puedan obtenerse mapas hidrológicos y de parámetros de potencial erosivo, se apliquen modelos distribuidos. Estos ligan los procesos hidrológicos como causa de los sedimentológicos; de esta forma que en ladera se considera el potencial de la escorrentía superficial y en el cauce el del caudal total del río [43], [44]. Estos modelos parecen ser la posibilidad de mayor robustez y comprensión del proceso, aunque se han calibrado en geografías diferentes a la montaña tropical de Antioquia (p. ej. [5], [23], [43]). Por tanto, la parametrización de modelos distribuidos puede omitir procesos esenciales en este tipo de geografía, excesivo esfuerzo de cálculo y demanda de información para aplicaciones regionales, así como problemas de equifinalidad al calibrar [23].

De ahí que el modelo de este trabajo, basado en los métodos de [7], sea agregado y con consideraciones especiales para cuencas tropicales de montaña. La agregación del modelo parte de la distinción entre procesos de ladera y cauce, y de asumir equilibrio de mediano plazo en cauces aluviales [22]. Se estima de forma redundante la producción media en enfoques tanto de ladera como de cauce para ríos aluviales, y sólo desde ladera para los ríos no aluviales. Por la complejidad y diversidad de las cuencas en la región y por la especial necesidad de proponer soluciones en escenarios de información escasa, se hallan vía ajuste de regresión –pero con supervisión de su coherencia física– algunos parámetros como la resistencia al flujo y la relación entre fuerza del flujo y resistencia del suelo. El planteamiento puede extrapolarse a las cuencas medianas de Antioquia y los Andes Tropicales del Colombia, para estimar órdenes de magnitud del transporte de sedimento en escala de meses a décadas. Estas estimaciones serían útiles para la prevención y el manejo de los problemas fluviales ya citados, que no requieren tanto revisar la localización de las fuentes de sedimento dentro de la cuenca [26].

2. Materiales y métodos

2.1. Información disponible

Sobre hidráulica y sedimentos se tienen curvas de calibración concentración-caudal a partir de aforos descritos

en [17], geometría hidráulica en el sitio de la estación y batimetrías de algunos embalses de EPM [25], [31], [39]. De geomorfología se tiene el modelo digital de elevación para el trazo de cuencas (Figura 1), un mapa geológico regional a escala 1:400000 y uno de red de drenaje a escala 1:25000.

Los datos hidrológicos constan de series diarias de caudal y precipitación, medidas por el IDEAM durante un mismo período (Tabla 1). El régimen diario de caudales se traduce a instantáneo, según el factor corrector propuesto por [7]. Para las cuencas sin información de caudales se usa el mapa de caudal medio a partir de mapas hidroclimáticos [2],[3].

2.2. Estimación del transporte real medio

2.2.1 Transporte en suspensión

La curva de calibración concentración-caudal ($c=aQ^b$) convierte la curva de duración de caudales instantáneos (CDQ) en caudales sólidos instantáneos en suspensión (CDQss). Por tanto, el transporte medio en suspensión (Q_{ssm}) se determina con la media de la distribución dada por la CDQss, al integrarla sobre sus percentiles (p):

$$Q_{ssm} = \int_0^1 Q_{ssp} dp \quad (1)$$

$$\text{Con } Q_{ssp} = c_{ssp} Q \text{ y } c_{ssp} = a Q_p^b \quad \forall \quad p \in (0,1)$$



Figura 1. Ubicación de cuencas con aforos líquidos y sólidos simultáneos. Fuente: Los autores

Tabla 1.

Cuencas con aforos simultáneos de caudal y sedimento. Fuente: los autores

#	Código	Cota (msnm)	Río	OP	Área (km ²)	No. aforos liq+sol	Modelo Ladera		Mod Cauce aluvial?	Notas
							t_ini	t_fin		
1	1201706	30	Apartadó	I	88	101	-	-	si	-
3	1201708	50	Carepa	I	159	97	-	-	si	-
4	1201701	50	Chigorodó	I	185	110	-	-	si	-
5	1201702	20	León	I	1190	106	-	-	-	>50% cuenca en llanura aluvial
6	1202701	140	Mulatos	I	309	33	-	-	si	-
7	1111701	650	Riosucio	I	695	99	1992	1997	no	abajo de descarga de PCHs Vuelta y Herradura
8	1111703	300	Riosucio	I	2973	58	1990	1992	no	-
9	1111704	90	Riosucio	I	3548	102	1998	2003	no	-
10	1201705	20	Zungo	I	46	82	-	-	si	-
18	1202709	600	Nechí	I	1381	78	1996	2002	no	minería aluvial
19	2623708	600	San Andrés	I	359	89	-	-	no	-
20	2623711	2370	San Andrés	I	128	53	2008	2012	no	-
21	2623702	480	Aurrá	I	230	176	-	-	no	-
22	2619703	670	San Juan	I	1098	183	1992	2012	no	-
24	2621701	680	Tonusco	I	316	189	1995	2011	-	curva $h=aQ^b$, con $b=0.1$; $R^2=0.1$: anómala.
25	2624701	80	Man	I	360	129	2005	2011	si	-
26	2624705	110	Tarazá	I	955	116	-	-	no	-
27	2308718	1900	Concepción	I	119	108	1989	2005	-	Duda ubicación estación
28	2308716	820	Nus	I	372	89	1989	1995	si	minería aluvial
30	2307702	150	Cocorná	I	603	101	1985	2005	si	-
31	2308719	380	Sam.Norte	I	1509	78	-	-	no	-
43	2701707	2440	Grande	E	474	51	-	-	no	-
44	2701703	2170	Grande	E	1050	35	-	-	no	aforos pre-emb.RGII
46	2701773	2320	Q.Orobajo	E	32	31	-	-	si	CDQ rescalada
47	2701708	1740	Guadalupe	E	386	25	-	-	no	aforos pre-emb.Troneras
48	2701712	1790	Guadalupe	E	269	20	-	-	si	CDQ rescalada
49	2623712	1670	Nechí	E	248	35	-	-	no	CDQ rescalada
50	2702720	430	Nechí	E	1591	25	-	-	no	minería aluvial
51	2618705	2030	Buey	E	144	32	-	-	no	CDQ importada del río Sonsón
52	2618707	2140	Piedras	E	149	37	-	-	no	En bocatomá
53	2308755	1040	Churimo	E	144	48	-	-	-	sin CDQ para rs real
54	2701736	1060	Porce	E	2570	112	-	-	-	rs alterado por emb.RGII
55	2701739	1430	Riachón	E	122	43	-	-	si	CDQ importada del río Nus
56	2701740	820	Porce	E	3063	103	-	-	-	rs alterado por emb.RGII
57	2701802	940	Porce	E	2812	72	-	-	-	rs alterado por emb.RGII
58	2701741	560	Porce	E	3674	64	-	-	-	rs alterado por emb.RGII
59	2701762	1470	Q.Caracolí	E	20	23	-	-	-	Sólo 5 aforos con $Q>Q_{medio}$, CDQ desde Nus
60	2701768	110	Porce	E	4106	60	-	-	-	rs alterado por emb.RGII
61	2701753	1700	Riachón	E	87	37	-	-	si	CDQ importada del río Nus

Convenciones: Q.Orobajo=Quebrada Orobajo, op=operador, I=IDEAM, E=EPM, liq+sol=líquido y sólido (sedimento en suspensión), t_ini y t_fin definen el período para el cual la información tenía una porción de faltantes suficientemente baja para calibrar el modelo hidrológico, curva $h=aQ^b$: relación nivel-caudal en la sección de aforo, emb.=embalse, CDQ=curva de duración de caudales, rs=rendimiento de sedimento en la cuenca (t/km²/año), RGII=Riogrande II

Fuente: Los autores

2.2.2. Porción del transporte por fondo

Como el modelo predice transporte total, pero la información es de sedimento en suspensión, se estima la porción en suspensión Q_{ss}/Q_s con un ajuste simplificado de la ecuación de [10], considerando un perfil de concentración en el flujo equilibrado. Este planteamiento se aplica a cada percentil de caudal de la curva de duración, ajustando una ley potencial de variación de tamaño medio de sedimento con el caudal para tramos aluviales, para finalmente ponderar según la porción de sedimento transportado por cada percentil [7]. Para tramos no aluviales se ajusta una ley que aproxime la tendencia para ríos de grava presentada por [36].

2.3. Estimación del transporte con el modelo

2.3.1. Hipótesis generales

Con base en la revisión de literatura y la información disponible, el modelo de producción a escala de cuenca y en el mediano plazo debe considerar:

- Equilibrio en el cauce por tramos, sólo donde este se considere aluvial. Allí suministro=capacidad.
- Enfoque alternativo de modelación, en ladera, útil en especial para los cauces no aluviales.
- Método analítico que considere balance de energía y acople entre disipación y transporte.
- Geometría de la cuenca estacionaria, desde la escala de paisaje hasta la de tramo de cauce.
- Pocos parámetros, físicamente interpretables, p. ej. geometría hidráulica, densidad de drenaje, etc.
- Regionalizar la resistencia a la erosión con la naturaleza geológica del suelo y la erosión misma producida por un flujo de una potencia dada.
- Carga total de sedimento fluyendo en el cauce, considerando las porciones por fondo y en suspensión.

2.3.2. Selección del enfoque del modelo: cauce o ladera

Los tramos aluviales del cauce tienen una sección con capacidad de transporte ajustada al suministro desde las fuentes en la ladera, en general desde flujos en zonas concentradas, p. ej. cárcavas. Las desviaciones en los patrones área (A) vs pendiente (S) indican alteraciones de ese balance [6]. Un criterio de clasificación del cauce como aluvial es el índice morfológico $SA^{0.4}$ [14], donde el exponente es similar al de la geometría hidráulica aguas abajo para el nivel en ríos de gravas [30]. El valor umbral es cualitativo –para el caso <0.09 para que el cauce sea aluvial- a partir de la morfología de los valles en Google Earth, dado que lecho es aluvión tiende a darse donde el valle aluvial es notablemente amplio.

2.3.3. Modelo de cauce

Junto con geometría hidráulica constante y suministro=capacidad, se asumen para el modelo de transporte de sedimento en cauce las siguientes ideas del modelo de [13]:

- En general el sedimento es tipo arena (0.05 a 2mm)
- La potencia del flujo se gasta en disipación y en transporte de agua y sedimento
- balance de energía de Bagnold [15]-, lo que se ha probado en ríos aluviales (p. ej. [29]).
- La potencia del transporte es proporcional a la velocidad de corte $u^*=(\tau/\rho)^{0.5}$ y al exceso de esfuerzo efectivo $\tau^*-\tau_c^*$, con $\tau_c^*\sim 0.06$ el crítico para movilizar.
- En ríos aluviales aplica la tendencia de laboratorio entre esfuerzos de transporte y disipación.
- El factor de disipación f es proporcional a h'/L , con h' siendo la altura de la irregularidad del lecho y L su espaciamiento aguas abajo. Esto es válido si la lámina sobre la irregularidad es al menos similar a h' .

Con esto, resulta la siguiente relación entre números adimensionales de transporte y esfuerzo:

$$fq_s^* = 0.1\tau_*^{2.5} \quad (2)$$

$$\text{Con } \tau_* = \frac{\tau}{\gamma(G-1)D} \approx \frac{hS}{(G-1)D}, \quad q_s^* = \frac{Q_s}{B\sqrt{(G-1)gD^3}}$$

Siendo D el diámetro del sedimento, γ el peso específico del fluido y g la aceleración de la gravedad. El exponente 2.5 para τ^* aplica para un gran rango de estados de transporte, donde la porción en suspensión es comparable con la de fondo [13].

Reemplazando esos números adimensionales y simplificando se tiene:

$$Q_s = \left[\frac{0.1}{2\sqrt{g(G-1)^2}} \right] \frac{Bh^{1.5}S^{1.5}v^2}{D} \quad (3)$$

Y en términos de geometría hidráulica, con α_i siendo el coeficiente y β_i el exponente de la relación para una variable hidráulica $= \alpha_i Q^{\beta_i}$:

$$Q_s = r_s A = \frac{r_s}{r_{ss}} r_{ss} A = \left[\frac{0.1\alpha_h\alpha_h^{1.5}\alpha_v^2}{2\sqrt{g(G-1)^2}} \right] \frac{Q^{q*}}{D} \quad (4)$$

$$\text{Con } q_* = \beta_b + 1.5\beta_h + 2\beta_v$$

Siendo las demás variables conocidas, D debe hallarse para cada cuenca con dato de transporte resultando τ^* calibrado, que al relacionar las fuerzas motoras y resistentes se asume puede regionalizarse en función del propio rendimiento sólido de cada cuenca $rs=Q_s/A$:

$$D = \frac{hS}{(G-1)\tau_*}, \quad \tau_* = m_1 r_s^{m_2} \quad (5)$$

Donde m_1 puede estar relacionado con la roca parental, dado el predominio de suelos residuales en la región.

2.3.4. Modelo de ladera

Se asumen las mismas ideas que para el modelo de cauce, basadas en el planteamiento de [13], con las siguientes

adaptaciones que ahora consideran el flujo no sobre el río sino sobre las cárcavas de la ladera:

- El caudal medio que mueve el sedimento es la agregación $Q_{sup}=r_{sup}A$ de las salidas superficial y subsuperficial del modelo hidrológico conceptual SHIA agregado [45].
- Hay suministro suficiente de suelo residual para el transporte en los eventos sobre la cárcava
- Se da efecto *bulldozer*: removilización de depósitos de ladera dejados por eventos menores [5].
- La densidad de drenaje ρ_d se asume de 4km/km^2 , según el mapa de líneas azules, similar a los 5km/km^2 con el área crítica de Tarboton [32], simplificando su variabilidad espacial [35]. El valor está entre 2 y 7 km/km^2 , rango que establecen los estudios de la región [[8], [24], [40]]. Con esto, la longitud de cauces es: $L_{dt} = \rho_d A$.
- La suma sobre la cuenca del ancho de flujo concentrado desde la ladera a los cauces corresponde sólo con cierta porción p_b (del orden de 1 a 0.1%, según Google Earth) de la longitud de las márgenes de los cauces $2L_{dt}$.
- El flujo en ladera se concentra en cárcavas rectangulares –por lo que, en el tiempo, el ancho no varía con el caudal–, con una profundidad h calculada por continuidad de masa: $h = Q_{sup} / (2p_b\rho_d A)$, dada la escorrentía efectiva Q_{sup} , el ancho de flujo de todas las cárcavas $2p_b\rho_d A$ y una velocidad v .
- La velocidad v sigue una ley de resistencia al flujo dada por el coeficiente de fricción f , relacionado con el índice de potencia $h_{bll}S$ de los eventos efectivos para el transporte, cercanos a banca llena. Se asume por simplificar que f es constante en el tiempo –válido para resistencia de lecho móvil [44], donde $v \sim h^{0.5}$ –, variando sólo regionalmente. Sin embargo se dejan libres para ajustar los parámetros de la ley potencial de regionalización $f = \alpha_f (h_{bll}S)^{\beta_f}$, considerando que según [6] la variación de f aguas abajo puede no ser la misma en ladera que en cauce.
- La profundidad h_{bll} , con la que se estima la resistencia f , puede calcularse con parametrización media de geometría hidráulica de cauces $h_{bll} = a_1(Q_{bll})^{a_2}$, con $a_1=0.3$ y $a_2=0.4$.
- El caudal de banca llena en una cárcava Q_{bll} puede estimarse extrapolando la regionalización disponible para cauces [7], entonces $Q_{bll} = 15Q_{bll}^{0.74} = 15 r_{sup} A_c^{0.74}$. A_c es el área drenada crítica por una cárcava a partir de la cual comienza el flujo en cauce, por lo que a través de la sección de la cárcava con $A = A_c$ se estima fluye todo el sedimento producido en la ladera.
- Para el caso de transporte en ladera se propone que la relación adimensional de transporte sea la usada para el cauce, pero con menor sensibilidad del transporte a la capacidad del flujo: exponente 2 en vez de 2.5. Esto debido a que para flujos someros el exponente de las ecuaciones de transporte disminuye [13], porque el transporte en ladera tiene mayor interacción con el fondo que el transporte en cauce. Con esto, resulta la siguiente relación entre números adimensionales de transporte y esfuerzo:

$$fq_s^* = 0.1\tau_s^* \quad (6)$$

Reemplazando los números adimensionales y simplificando se tiene:

$$Q_s = \left[\frac{0.1}{2\sqrt{g}(G-1)^{1.5}} \right] \frac{BhSv^2}{D^{0.5}} \quad (7)$$

Expresando la profundidad h por continuidad de masa y simplificando:

$$Q_s = r_s A = \left[\frac{0.1}{2\sqrt{g}(G-1)^{1.5}} \right] \frac{r_{sup}ASv}{D^{0.5}} \quad (8)$$

Ahora bien, se propone una regionalización análoga a la del modelo de cauce:

$$D = \frac{hS}{(G-1)\tau_s} = \frac{r_{sup}S}{2vp_b\rho_d(G-1)\tau_s}, \quad \tau_s = m_3 r_s^{m_4} \quad (9)$$

Donde m_3 puede estar relacionado con la roca parental, dado el predominio de suelos residuales en la región.

Reemplazando 9 en 8 resulta la siguiente ecuación implícita:

$$r_s = \left[\frac{0.1(2p_b\rho_d)^{0.5}m_3^{0.5}}{2g^{0.5}(G-1)} \right] r_{sup}^{0.5} S^{0.5} v^{1.5} r_s^{0.5m_4} \quad (10)$$

Para determinar v se recurre a la regionalización propuesta para el factor de resistencia del flujo f :

$$f = \frac{8ghS}{v^2} = m_5 (h_{bll}S)^{m_6} = m_5 (h_{bll}S)^{m_6} \quad (11)$$

Considerando que $h_{bll}=f_1(Q_{bll})$ y $Q_{bll}=f_2(r_{sup},A_c)$ y despejando v :

$$v = 8^{0.33} m_5^{-0.33} 3^{-0.33m_6} 15^{-0.13m_6} g^{0.33} (2p_b\rho_d)^{-0.33} \times r_{sup}^{0.33-0.13m_6} S^{0.33-0.33m_6} A_c^{-0.1m_6} \quad (12)$$

Reemplazando 12 en 10, y resolviendo para r_s :

$$r_s = (C_2 r_{sup}^{r^{**}} S^{S^{**}} A_c^{Ac^{*}})^{1/T^{*}} \quad (13)$$

$$[r_s] = \frac{\text{ton}}{\text{km}^2 \cdot \text{año}}, [r_{sup}] = \frac{\text{m}^3}{\text{s} \cdot \text{m}^2}, [A_c] = \text{m}^2, [S] = \frac{\text{m}}{\text{m}}, \gamma_s = 2.6 \frac{\text{ton}}{\text{m}^3}$$

$$C_2 = 31.5 * 10^{12} \left(\frac{0.1}{2} \right) (G-1)^{-1} m_3^{0.5} 8^{0.5} m_5^{-0.5} 3^{-0.5m_6} \times 15^{-0.2m_6} \gamma_s$$

$$r^{**} = 1 - 0.2m_6, \quad Ac^{*} = -0.15m_6, \quad S^{*} = 1 - 0.5m_6, \quad T^{*} = 1 - 0.5m_4$$

2.3.5. Síntesis de la estrategia

El modelo tiene una fase preliminar de calibración en cuencas con datos transporte y una fase final de aplicación en cuencas sin información. En la calibración, con el fin de aplicar el modelo para regionalizar el parámetro de resistencia

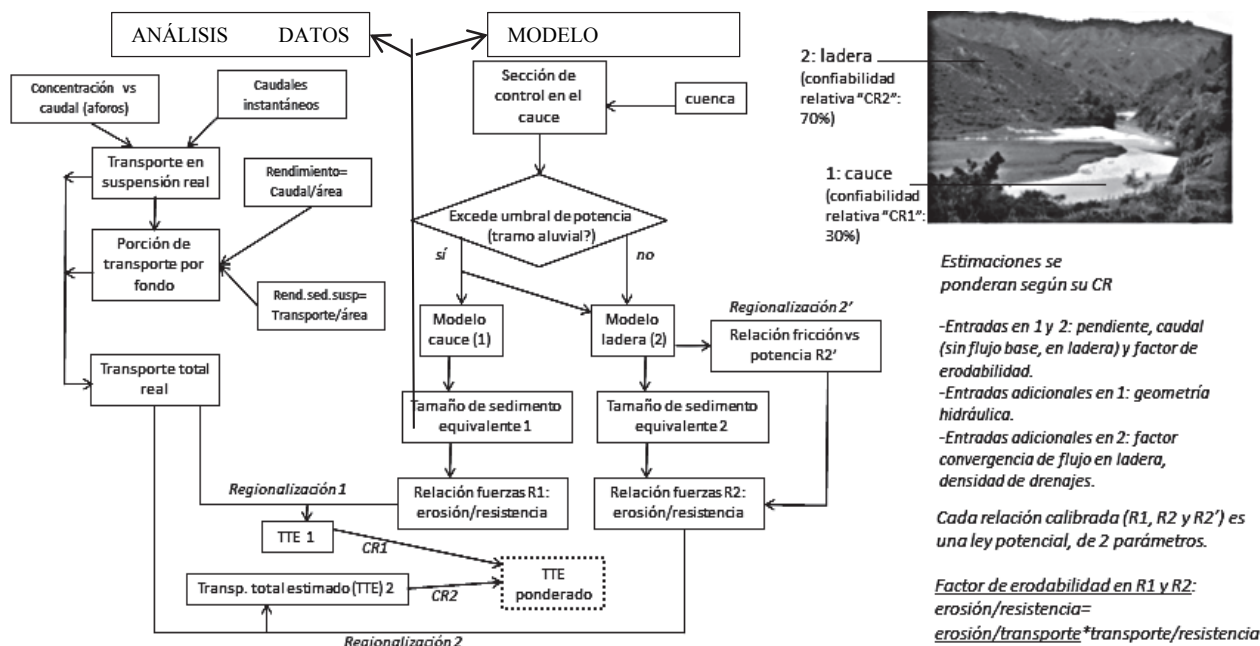


Figura 2. Metodología de calibración del modelo.
Fuente: Los autores

a la erosión de Shields tanto en ladera como en cauce, debe resolverse un proceso paralelo de cálculo de la producción media real, incluyendo el transporte de fondo, a partir de la información de aforos sólidos (Figura 2). El uso del modelo en cuencas sin datos ya aprovecha dicha regionalización de la resistencia a la erosión para estimar el transporte medio, enfocando en ladera, cauce o ambos según aplique para el tipo de cauce en el sitio de análisis de la cuenca (Figura 3). En caso de aplicar tanto el modelo de ladera como el de cauce, los resultados se ponderan para un resultado final de producción media estimada, dando más peso al modelo de cauce, que tiene una menor cantidad de supuestos y mejor validación en la literatura.

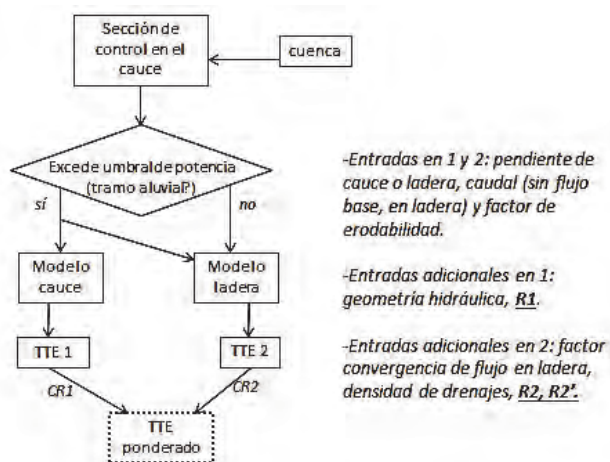


Figura 3. Metodología de aplicación del modelo en cuencas sin datos.
Fuente: Los autores

3. Resultados

3.1. Estimación del transporte real medio

Para comparar la producción de sedimento entre cuencas se estudia el rendimiento de sedimento en suspensión $rss = Q_{ssm}/A$, siendo A el área de cuenca. Respecto a una base de datos de producción mundial, Antioquia se enmarca dentro de una producción media a alta (ver óvalo en la Figura 4). La producción de sedimento no decae con el área, como tiende a ser a nivel global; al contrario, tiende a crecer dado que en las cuencas aguas abajo predomina en general el terreno montañoso, clima cálido húmedo con buen exceso de precipitación respecto a lo evaporado y por tanto laderas con buen desarrollo de suelos y suministro de sedimentos. Puede influir además la mayor antropización de cuencas en zonas bajas.

Para corregir el transporte en suspensión, convirtiéndolo a transporte total para calibrar el modelo, se procesa la información de batimetrías (Tabla 2), obteniendo el transporte anual en la cuenca a partir de relacionar las diferencias de volumen depositado con el período entre mediciones.

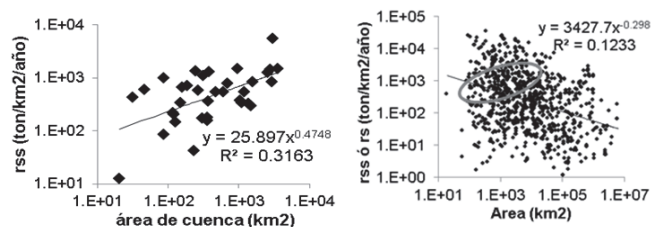


Figura 4. Escalamiento espacial de la producción media de sedimento. Izquierda: datos de Antioquia. Derecha: datos del mundo, con los de Antioquia resaltados con el óvalo.
Fuente: los autores

Tabla 2.

Información de aforos sólidos y batimetrías para estimar la porción media de sedimento en suspensión. Fuente: los autores.

emb.	V.emb (Hm ³)	EA	Colm.emb (Hm ³ /año)	Prod.cca (Hm ³ /año)	Acca (km ²)	rs (t/km ² /a)	Lapso rs (años)	Lapso rss (años)	est. rss	rss (t/km ² /a)
PolI	230	0.95	3.0	3.2	3062	1238	2002-2007	1996-2010	54	969
						1238		2001-2010	57	1129
RGII	240	0.95	1.0	1.1	1072	982	2001-2006	1981-2001	43	541
						982		1957-1982	44	376
						982		1981-1997	46	426
Tron	36	0.90	0.3	0.4	386	950	2005-2012	1956-1960	47	1313
						950		1995-2001	48	582

Convenciones: “EA” es la eficiencia de atrapamiento de sedimento en el embalse, según el método de Brunne [5]. “Colm emb” es el volumen sedimentado en el embalse sobre el número de años entre batimetrías, con base en información SIG de EPM. “Prod cca” es la tasa de producción de sedimento en la cuenca afluente al embalse (Prod cca)= (Colm emb)/EA. “Est rss” es el número de la estación (según la Tabla 1) con aforos de sedimento en suspensión, con la que se estima la porción Qss/Qs real, con Qss de aforos y Qs de embalse.

Fuente: Los autores

La Fig. 5 muestra que el ajuste modelado sigue la tendencia mundial de una menor porción de carga de fondo en ríos con alta concentración de sedimento suspendido, indicando que los ríos de mayor transporte tienen más finos y/o mayor turbulencia, la cual es aún más alta en ríos de gravas por lo que la porción por fondo resulta menor que en los ríos de arenas. La mayor subestimación de Qss/Qs sucede en la estación 57 Diamante, sobre el río Porce cuya cuenca está muy antropizada –implicando un suministro alto de finos [48]. En cambio, la mayor sobreestimación se da en la estación 44 Templete, cuyo periodo de medición fue muy anterior al del embalse, cuando tal vez podía haber un mayor suministro de gruesos por el menor nivel base de la cuenca. Ahora bien la estación 47_G2, tiene incoherentemente $rss > rs \rightarrow Qss/Qs > 1$ se ubica en una sección encañonada no aluvial, lo que implica condiciones del perfil de flujo mucho más heterogéneas que las de ríos de arenas.

3.2. Estimación del transporte con el modelo

3.2.1. Modelo de cauce

Para aplicar el modelo se sustituyen las variables de la Tabla 3 en la ecuación 4, para hallar un diámetro medio equivalente por cuenca y así, con la ecuación 5, calcular τ^* . Este ajusta bien con el rendimiento sólido, aunque la predicción del modelo mejora si se incluye un factor de erodabilidad FG –variando entre 0.1 y 1-, que es el promedio ponderado en el área de unos factores que difieren según la litología sea ígnea (0.1), metamórfica (0.3), sedimentaria (0.7) o depósito (1.0). La litología se usa en esta propuesta por ser información de escala gruesa fácilmente disponible, aunque información de formaciones superficiales sería más coherente para el ajuste. FG se interpreta como la relación τ/τ_d entre el esfuerzo para transportar el sedimento y el requerido para desprenderlo, siendo τ_t el esfuerzo que se regionaliza en este trabajo –al adimensionalizarlo con el diámetro-. Tiene sentido que FG baje en suelos cohesivos, generalmente por meteorización de rocas cristalinas, que son de menor grano pero menor erodabilidad dada la cohesión química [4].

El diámetro calibrado en cauces no aluviales suele ser mayor, pues el parámetro Shields es menor (Figura , arriba). Los grandes diámetros equivalentes en los tramos no aluviales, que cumplen suministro=capacidad, muestran el exceso de capacidad en estas secciones para tamaños menores, más realistas.

En la Figura -abajo- se compara el rs real con el simulado con la calibración del parámetro Shields y la combinación de las ecuaciones 4 y 5. El rs real es $Qss/Qs * rss$, con Qss/Qs según la Fig. 5. Un 11/16=70% de las cuencas tienen un error dentro de +/- 50% de la tasa rs real. El error se debe no sólo a la simplificación de procesos físicos sino a la incertidumbre de los datos [11]. Estas son posibles causas de los mayores errores:

- Las cuencas 54_Gavino y 57_Diamante son del río Porce, con un 40% de su escorrentía represada hace 20 años por el embalse Río Grande II y una respuesta hidrológica y de erosión alterada por la canalización de cauces, el 5% de la cuenca urbanizada y la gran densidad de obras de infraestructura.

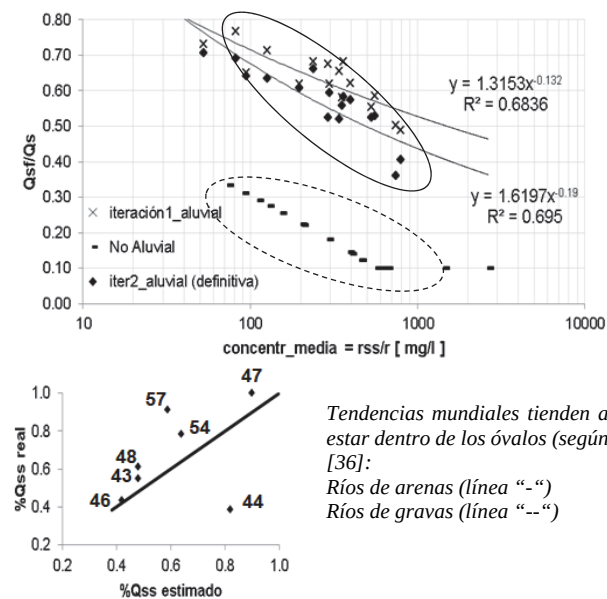


Figura 5. Arriba: Porción media de sedimento transportado por fondo ($Qsf=1-Qss$) en ríos no aluviales y aluviales -iter1 con Q_{medio} , iter2 con régimen de Q-. Abajo: Validación según batimetrías de embalses en la región, con el número de la cuenca en cada punto.

Fuente: Los autores

Tabla 3.

Variables de entrada de cuencas en las que se calibra el modelo de cauce aluvial.

cca #	aluv?	r (l/s/km ²)	A (km ²)	S	Ah	av	ab	βh	βv	βb	rss (ton/año/km ²)
1	si	59	88	3E-03	0.21	0.33	15	0.45	0.36	0.20	983
3	si	37	159	4E-03	0.22	0.43	11	0.40	0.31	0.29	658
4	si	76	185	3E-03	0.18	0.42	14	0.40	0.28	0.33	716
6	si	16	309	3E-03	0.20	0.38	13	0.44	0.33	0.24	173
7	no	53	695	2E-02	0.24	0.49	8	0.42	0.21	0.37	772
8	no	68	2973	5E-03	0.09	0.29	37	0.60	0.30	0.10	830
9	no	82	3548	1E-02	0.14	0.80	9	0.46	0.23	0.31	1467
10	si	48	46	5E-03	0.22	0.35	13	0.26	0.46	0.28	602
18	no	51	1381	1E-02	0.24	1.30	3	0.33	0.16	0.51	324
19	no	38	359	6E-02	0.29	0.35	10	0.24	0.53	0.23	155
20	no	51	128	4E-02	0.27	0.43	9	0.46	0.23	0.31	147
21	si	16	230	1E-02	0.21	0.43	11	0.36	0.48	0.17	42
22	no	52	1098	2E-02	0.21	0.90	5	0.44	0.22	0.34	341
25	si	59	360	2E-03	0.57	0.66	3	0.29	0.14	0.57	177
26	no	102	955	1E-02	0.13	0.64	12	0.51	0.25	0.24	1461
28	si	47	372	3E-03	0.13	0.90	9	0.37	0.19	0.44	355
30	si	86	603	2E-03	0.59	0.75	2	0.24	0.12	0.64	537
31	no	125	1509	1E-02	0.73	0.07	17	0.38	0.51	0.12	291
43	si	51	474	9E-03	0.33	0.25	12	0.48	0.45	0.07	541
46	si	38	32	2E-02	0.33	0.52	6	0.32	0.59	0.09	426
48	si	63	269	8E-03	0.12	0.38	20	0.71	0.30	0.00	582
54	si	42	2570	5E-03	0.52	0.12	15	0.40	0.51	0.11	969
55	si	51	122	8E-03	0.44	0.25	9	0.31	0.60	0.09	203
57	si	45	2812	5E-03	0.28	0.14	26	0.48	0.43	0.09	1129
61	si	51	87	5E-03	0.40	0.32	8	0.42	0.54	0.04	85

Fuente: Los autores.

- La cuenca 21 Aurrá, si bien se clasificó como aluvial, puede tener procesos diferentes a los de valle aluvial de arenas, donde se ha probado la aplicabilidad de la ecuación de [13]. Esto debido a que el tramo está sobre un abanico, de mayor potencia y sedimento más grueso.
- Las cuencas 4 y 6 son de los ríos Chigorodó y Mulatos, en el piedemonte de la Serranía de Abibe, por lo que hay transición entre río de montaña y llanura. Así, puede haber procesos no considerados en las hipótesis del modelo. De hecho, las demás cuencas de Urabá, de similar morfología, tienen errores altos.

3.2.2. Modelo de ladera

Se sustituyen las variables de la Tabla 4 en la ecuación 8, reemplazando la velocidad v por su estimación mediante la ecuación 12, donde los parámetros m_5 y m_6 de regionalización del factor de resistencia al flujo f se estiman de forma que la calibración de diámetros equivalentes D para las cuencas produzca el mejor ajuste de rs respecto a los datos. Al resultar $m_5=27000$ y $m_6=0$, se muestra respectivamente una alta disipación en zonas cercanas al umbral ladera-cauce y una independencia del área umbral de generación de cauce A_c que valida la simplificación de densidad de drenaje constante (4km/km² según el mapa de líneas azules). El factor de concentración del flujo $pb=0.005$ produce una hidráulica de ladera realista, con niveles del orden de pocos cm y velocidades alrededor de 1 cm/s.

A continuación, según la ecuación 9, se determina el parámetro de Shields medio equivalente τ^* para cada cuenca (Figura , arriba), a partir del diámetro hallado. De nuevo,

como en el cauce, el mejor ajuste resulta con rs y la predicción mejora significativamente al considerar el factor de erodabilidad FG.

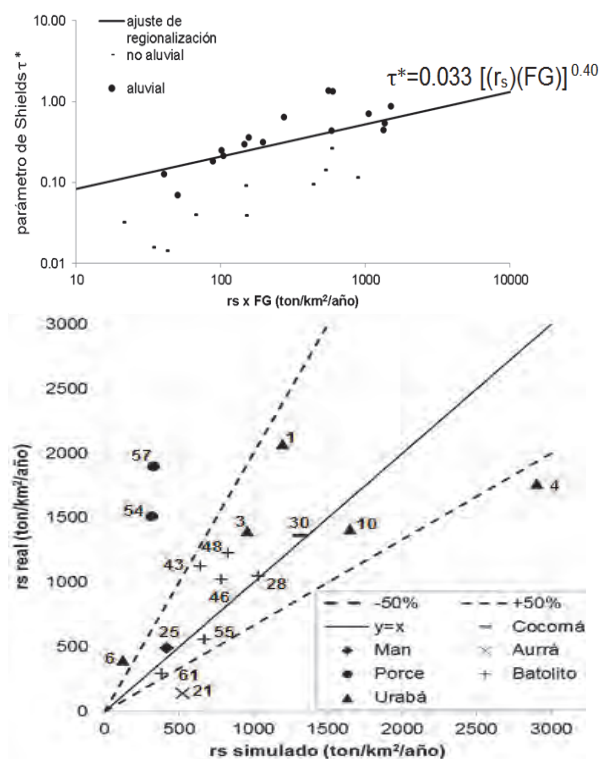


Figura 6. Arriba: Calibración del parámetro Shields equivalente con el modelo de cauce aluvial. Abajo: Ajuste del modelo de cauce respecto a los datos, con el número de la cuenca que representa.

Fuente: Los autores.

Tabla 4.

Variables de entrada de cuencas en las que se calibra el modelo de ladera.

Fuente: los autores.

cca #	r _{sup} (l/s/km ²)	r (l/s/km ²)	r _{sup} / r	S _{lad}	rs (t/a/km ²)
7	23	53	0.43	0.49	880
8	23	68	0.33	0.49	970
9	23	82	0.28	0.48	1630
18	17	51	0.34	0.35	417
20	28	51	0.55	0.24	214
22	29	52	0.56	0.51	437
25	48	59	0.81	0.19	491
27	25	61	0.41	0.31	303
28	21	47	0.44	0.33	1047
30	43	86	0.49	0.32	1366

Convenciones: r_{sup}= suma de la escorrentía superficial y subsuperficial media de ladera, según el modelo hidrológico agregado SHIA. S_{lad}: pendiente media de las laderas de cada cuenca.

Fuente: Los autores.

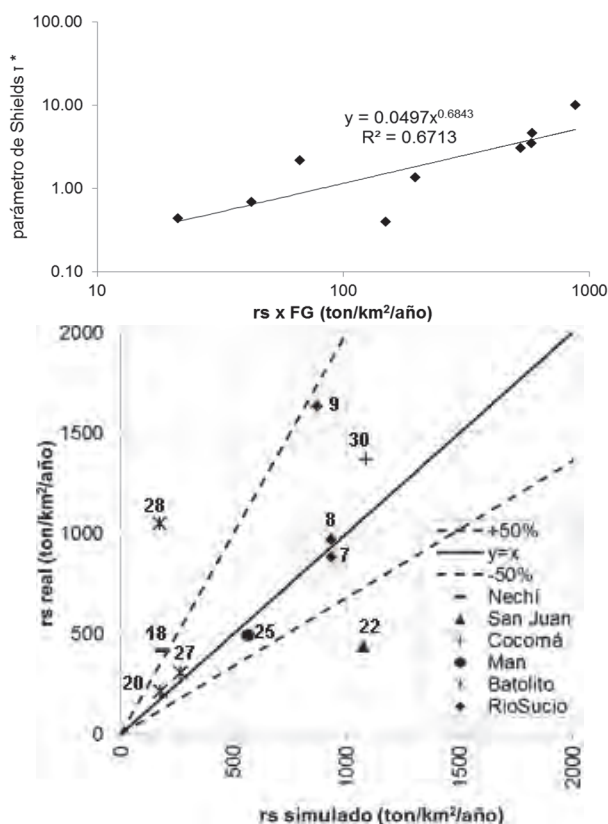


Figura 7: Arriba: Calibración del parámetro de Shields equivalente con el modelo de ladera. Abajo: Ajuste del modelo de ladera respecto a los datos. El número junto a cada punto muestra de cuál cuenca es la estimación. Fuente: Los autores.

Al comparar el rs real con el simulado (Figura 7, abajo), obtenido con el ajuste del parámetro de Shields y la ecuación 13, se nota que 7/10=70% de las cuencas tienen un error en la estimación dentro de una banda de $\pm 50\%$ de la tasa rs real, lo que indica una precisión similar a la del modelo de cauce. En cuanto a probables causas físicas de los errores excesivos: la

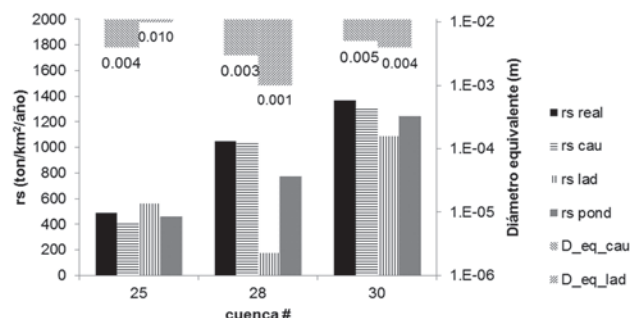


Figura 8. Cuencas modeladas tanto por enfoque de cauce como de ladera, y propuesta de ponderación de resultados.

Fuente: Los autores.

cuenca 18_Nechí tiene minería aluvial notable que suministra finos en al menos un afluente importante, la cuenca 28_Nus tiene un amplio valle aluvial entre dos escarpes, que pudo provocar una subestimación del potencial erosivo de la parte inicial de las laderas al considerarse sólo la pendiente media; y la cuenca 22_San Juan es la de mayor pendiente –más de 0.5– con lo que puede haber propiedades no consideradas en el modelo como laderas con afloramiento rocoso, o sea sin suministro de sedimento.

3.2.3. Ponderación de resultados

Dado que las cuencas 25_Man, 28_Nus y 30_Cocomá se estudiaron con ambos modelos –ladera y cauce– sus resultados se comparan con la Fig. 8. Esto fue posible pues el tramo de estudio era aluvial y había información para estimar la escorrentía de ladera. Se observa que el modelo de cauce simula satisfactoriamente, dentro de $\pm 20\%$ de error, la producción de las 3 cuencas, pero el de ladera subestima en más de 20% en la cuenca 30 y en más de 50% en la cuenca 28. Aun así, los diámetros equivalentes calibrados no son sistemáticamente mayores o menores en el modelo de ladera, estando en el mismo orden de magnitud que los estimados con el de cauce. Por tanto, el mayor error en el modelo de ladera puede explicarse por la mayor cantidad de supuestos, y por tanto de constantes regionales y parámetros; por lo que se propone como estimación práctica de la producción de sedimento una ponderación en la que pese más el modelo de cauce: p. ej. 70% la estimación de cauce y 30% la de ladera. Esto asume que la cuenca en la que se quiere conocer un aproximado de la producción media de sedimento tiene un cauce principal con un valle aluvial notorio en al menos una zona, donde pueda asumirse un tramo aluvial y aplicarse el modelo de cauce. En algunas cuencas muy pendientes, con un cauce principal sin tramos aluviales notables, se sugiere aplicar la ponderación a nivel de subcuencas con tramos aluviales, con el fin de reducir el error (p. ej. cuenca22_San Juan).

4. Discusión

La hipótesis de equilibrio de mediano plazo –años a décadas– permite delimitar una idea simplificada de modelo

conceptual, donde no se considera la evolución del paisaje – largo plazo- ni los almacenamientos estacionales de sedimento –corto plazo-. Con esto se asume la idea central del modelo, de suministro=capacidad en tramos aluviales, lo que permite tener una estimación redundante del transporte promedio: tanto en el propio cauce como desde la ladera. Al especificar que el modelo es para cuencas de montaña se aclara que: (1) no aplica para almacenamientos mayores al corto plazo en llanuras aluviales extensas y (2) considera que la producción de sedimento desde la ladera se refleja en la capacidad de transporte de su zona final –previa al cauce- de flujo concentrado. Al tratarse de cuencas tropicales el problema de la erosión de ladera pasa a depender sólo de la capacidad del flujo, pues se asume un suministro ilimitado por la alta meteorización.

El modelo es flexible respecto a su parametrización. Por ejemplo, aunque con el enfoque de cauce la geometría hidráulica se toma de la información de aforos, diversa bibliografía existe [21] para tomar valores generalizados del ajuste de esas leyes potenciales de geometría dado un caudal; sin embargo hay tendencias regionalizables coherentes que emergen de los aforos [7] y cabe recomendar su estudio con más datos. Para el enfoque de ladera puede implementarse una variabilidad regional de lo que aquí se asumió constante: convergencia de flujo y densidad de drenaje. Además en ambos modelos, la ecuación de capacidad basada en energía de [13] puede cambiarse por otro planteamiento de capacidad de transporte más adecuado para regiones como Antioquia con predominio de ríos de gravas [15].

El ajuste de regionalización para el cierre del modelo implica que la resistividad a la erosión no es sólo función del tamaño de grano sino de la química y estructura heredadas en el suelo, propiedades resumidas con el factor FG. Sin embargo, para donde se tenga información, las propiedades superficiales –morfología y suelos- pueden dar cuenta de la cohesión y resistividad a la erosión del suelo de forma más acertada que la litología, dado que la meteorización de suelos tropicales implica alteraciones minerales profundas que no siempre reflejan propiedades de la roca madre.

Los tamaños equivalentes resultantes, del orden de mm, son consistentes con los tamaños medidos en ríos similares [30],[37], sin embargo el transporte es muy complejo y no lineal como para interpretar el diámetro calibrado con el modelo de forma literal. A partir de algunos estudios se observa una mayor varianza de tamaños y un mayor tamaño medio a mayor energía del río, efecto de procesos de transporte de materiales más heterogéneos durante eventos poco frecuentes en cuencas pequeñas de alta pendiente [48]. Con esto se invita a estudios posteriores que consideren esta complejidad de variación espacio-temporal de tamaños, si se tienen datos de granulometría.

El problema de la medición del transporte, que se hace sólo para el material en suspensión, procura mitigarse analíticamente con el modelo, considerando los pocos datos de embalse disponibles en Antioquia. Se llega a una relación inversa entre la porción de transporte por fondo y la concentración, lo que puede tener causas físicas no inherentes

directamente con la concentración, sino más bien con la potencia y la turbulencia del flujo; sin embargo concuerda con bases de datos mundiales. Al estimar el transporte total de sedimento en el cauce, procura considerarse la producción no sólo por flujo erosivo en convergencias de ladera –de tamaños más finos- sino por erosión en masa –de tamaños más gruesos- [12], lo que es muy frecuente con los deslizamientos en los Andes Tropicales.

5. Conclusiones

Aunque la precisión del modelo implica sugerir un factor de seguridad de al menos 2 para la tasa de transporte de sedimentos estimada con el modelo, la complejidad de los procesos de transporte de sedimento y la carencia de modelos analíticos universales permite considerarlo como una herramienta útil que reduce la incertidumbre actual en la aproximación de la denudación media regional de cuencas tropicales de montaña, cuya información hidrológica y del terreno disponible para la ingeniería práctica de la región es limitada.

De hecho, la propuesta de ponderación de los resultados de ladera y cauce puede contribuir a una reducción adicional del error, que puede robustecerse con una estimación conceptualmente basada de los factores de ponderación.

Sin embargo, se sugiere profundizar en la investigación no sólo de la magnitud media sino del régimen de transporte [27], esto es, la variabilidad temporal de carga y tamaños en diferentes cuencas de montaña tropicales no sólo de Antioquia sino de los Andes de Colombia, donde hay alto potencial de aprovechamiento del recurso hídrico pero una amenaza manifiesta de su sostenibilidad [1],[26],[41].

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento al proyecto MGSAL de la gobernación de Antioquia por la financiación del estudio y a las instituciones IDEAM y EPM por la información suministrada de aforos y batimetrías respectivamente. Asimismo, a Juan José Montoya Monsalve y Paula Lizeth Correa Velásquez por sus aportes en la interpretación de la información.

Referencias

- [1] ANLA. Resolución No. 0828. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014.
- [2] Álvarez, O., Vélez, J.I. y Poveda, G., Nuevos campos de precipitación promedia anual para Colombia. XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Cartagena de Indias, Colombia, 2008^a.
- [3] Álvarez, O., Vélez, J.I. y Poveda, G., Incertidumbre asociada con el balance hídrico de largo plazo. XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Cartagena de Indias, Colombia, 2008b.
- [4] Borah, D., Krug, E. and Yoder, D., Sedimentation Engineering. Chapter 17: Watershed sediment yield. ASCE, 2008, 1132 P.
- [5] Bussi, G., Implementation of a distributed sediment model in different data availability scenarios. Thesis Dr. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España, 2014.
- [6] Canfield, H.E., Use of geomorphic indicators in parameterizing an event-

- based sediment-yield model. Thesis Dr. University of Arizona, USA, 1998.
- [7] Cataño, S., Modelo conceptual agregado de transporte de sedimentos para cuencas de montaña en Antioquia. Tesis MSc. en Ingeniería-Recursos Hidráulicos. Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia, 2015.
- [8] CORNARE, Plan de ordenamiento y manejo de la parte alta de la microcuenca de la quebrada Los Dolores, municipio de Abejorral, 2009.
- [9] CTA. Actualización del estado del arte del recurso hídrico en el departamento de Antioquia 2007-2009. Convenio interinstitucional Cátedra del Agua, Medellín, 2010.
- [10] Dade, W.B. and Friend, P., Grain-size, sediment-transport regime, and channel slope in alluvial rivers. *Journal of Geology*, 106, pp. 661-675, 1998. DOI: 10.1086/516052
- [11] De Vente, J. et al., Predicting soil erosion and sediment yield at regional scales: where do we stand?. *Earth-Science Reviews*, 127, pp. 16-29, 2013. DOI: 10.1016/j.earscirev.2013.08.014
- [12] Di Silvio, G., A Northern perspective. Erosion and sediment dynamics from catchment to coast. International Hydrological Programme. UNESCO, 2008.
- [13] Engelund, F., Hansen, E., A monograph on sediment transport in alluvial streams. Technical University of Denmark. Copenhagen. 1967, 64 P.
- [14] Flores, A.N., Bledsoe, B.P., Cuhaciyan, C.O. and Wohl, E.E., Channel - reach morphology dependence on energy, scale, and hydroclimatic processes with implications for prediction using geospatial data. *Water Resources Research*, 42, W06412, 2006. DOI: 10.1029/2005WR004226
- [15] García, M.H., Sedimentation Engineering. Chapter 2: Sediment transport and morphodynamics. ASCE, 2008. DOI: 10.1061/9780784408148
- [16] Gobernación de Antioquia, Plan de desarrollo de Antioquia 2012-2015. Línea estratégica – Antioquia es verde y sostenible, 2012.
- [17] IDEAM. Protocolo para el monitoreo y seguimiento del agua. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Colombia, 2007.
- [18] IGAC, Estudio general de suelos y zonificación de tierras del departamento de Antioquia, 2007.
- [19] Kettner, A., Restrepo, J. and Syvitski, J., A spatial simulation experiment to replicate fluvial sediment fluxes within the Magdalena River Basin, Colombia. *Journal of Geology*, 118, pp. 363-379, 2010. DOI: 10.1086/652659
- [20] Kirkby, M.J. and Morgan, R.P.C., Soil Erosion. John Wiley & Sons Ltd. 1980, 374 P.
- [21] Knighton, D., Fluvial forms and processes- a new perspective. Oxford University Press. 1998, 383 P.
- [22] Mesa, O.J., Estudio del equilibrio en ríos. Proyecto 1118-050004-88 de Colciencias. Universidad Nacional de Colombia- Facultad de Minas, 1990.
- [23] Montoya, J.J., Desarrollo de un modelo conceptual de producción, transporte y depósito de sedimentos. Tesis Dr. Universidad Politécnica de Valencia, España, 2008. DOI: 10.4995/thesis/10251/8303
- [24] Montoya, Y. y Montoya, B., Caracterización morfométrica de la microcuenca de la quebrada Los Andes, El Carmen de Viboral, Antioquia, Colombia. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 2009.
- [25] Moreno, L., Evaluación del control de la sedimentación en el embalse Troneras. Tesis Msc. Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, 2007.
- [26] Morris, G. and Fan, J., Reservoir Sedimentation Handbook. McGraw-Hill. 2010, 805 P.
- [27] Nagle, G. et al, Management of sedimentation in tropical watersheds. *Environmental Management*, 23(4), pp. 441-452, 1999. DOI: 10.1007/s002679900199
- [28] Novak, P., Moffat, A.I.B., Nalluri, C. and Narayanan, R., Hydraulic Structures- Fourth edition. Taylor & Francis Group, 2007.
- [29] Pacheco-Ceballos, R., Transport of sediments: analytical solution. *Journal of Hydraulic Research*, 27(4), pp. 501-518, 1989. DOI: 10.1080/00221688909499126
- [30] Parker, G., Sedimentation Engineering. Chapter 3: Transport of gravel and sediment mixtures. ASCE, 2008.
- [31] Perea, I., Modelación del delta de sedimento en un embalse que presenta rápidas fluctuaciones de nivel. Tesis Msc., Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, 2013.
- [32] Ramírez, J., Extracción automática de redes de drenaje a partir de modelos digitales de terreno. Tesis grado, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, 2002
- [33] Restrepo, J.D. and Kjerfve, B., Water discharge and sediment load from the western slopes of the Colombian Andes with focus on Río San Juan. *Journal of Geology*, 108, pp 17-33, 2000. DOI: 10.1086/314390
- [34] Restrepo, J.D. et al., Factors controlling sediment yield in a major South American drainage basin: The Magdalena River, Colombia. *Journal of Hydrology*, 316, pp. 213-232, 2006. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2005.05.002
- [35] Tucker, G. et al, Statistical analysis of drainage density from digital terrain data. *Geomorphology*, 36, pp. 187-202, 2001. DOI: 10.1016/S0169-555X(00)00056-8
- [36] Turowski, J., Rickenmann, D. and Dadson, S., The partitioning of the total sediment load of a river into suspended load and bedload: A review of empirical data. *Sedimentology*, 57, pp. 1126-1146, 2010. DOI: 10.1111/j.1365-3091.2009.01140.x
- [37] UNAL. Análisis de la problemática de sedimentos en el río Herradura. Escuela de Geociencias y Medio Ambiente. Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, 2007.
- [38] UNAL. Atlas HidroSIG Antioquia- Guía explicativa. Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, 2012.
- [39] UNAL. Simulación hidrológica y de sedimentos de las cuencas abastecedoras del embalse Riogrande II. Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, 2014.
- [40] Universidad del Valle. Caracterización de ríos tributarios del río Cauca. Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente, 2001.
- [41] UPME. Estudio para determinar la vulnerabilidad y las opciones de adaptación del sector energético colombiano frente al cambio climático, 2013.
- [42] Vanmaercke, M. et al, Sediment yield in Europe: spatial patterns and scale dependency. *Geomorphology*, 130, pp. 142-161, 2011. DOI: 10.1016/j.geomorph.2011.03.010
- [43] Velázquez, N., Simulación de sedimentos a partir de un modelo conceptual y distribuido no lineal. Tesis MSc. Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, 2011.
- [44] Vélez, J.I., Desarrollo de un modelo hidrológico conceptual y distribuido orientado a la simulación de crecidas. Tesis Dr. Universidad Politécnica de Valencia, España, 2001.
- [45] Vélez, J.I., Restrepo-Tamayo, C. y Correa, P.L., Aplicaciones de un modelo hidrológico agregado en Colombia. XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Punta del Este, Uruguay. 2010.
- [46] Walling, D.E., The sediment delivery problem. *Journal of Hydrology*, 65, pp. 209-237, 1983. DOI: 10.1016/0022-1694(83)90217-2
- [47] Wischmeier, W. and Smith, D., Predicting rainfall erosion- a guide to conservation planning. Agriculture handbook 537. U.S. Department of Agriculture, 1978.
- [48] Wohl, E., Mountain rivers revisited. Water resources monograph 19. American Geophysical Union, 2010.

S. Cataño-Álvarez, es MSc. en Ingeniería de Recursos Hidráulicos, en 2015 de la Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín ORCID: 0000-0003-3844-5761

J.I. Vélez-Upegui, es PhD en Investigación sobre modelación distribuida hidrológica y ambiental, con el grupo de Investigación en Hidráulica e Hidrología dirigido por Juan. B Marco S., entre 2005-2006. de la Universidad Politécnica de Valencia, España. Es profesor de la Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Colombia ORCID: 0000-0002-2042-9459

Geotechnical characterization of the silt from the terrace of the municipality of Olaya in Antioquia, Colombia

Óscar Echeverri-Ramírez^a

^a Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. oecheve@unal.edu.co

Received: September 21th, 2015. Received in revised form: October 30th, 2015. Accepted: December 9th, 2015.

Abstract

In April of 2014 arose a movement mass of soils which make up the terrace of the municipality of Olaya (Department of Antioquia). This document presents the results of characterization physical, mechanical and hydro-mechanical behavior of silty soils in such training, in order to evaluate the possible causes of the movement. Were confronted the hypothesis raised by the competent entities that once evaluated the problem and was determined from this research that the soil, for the conditions on the ground, experiences an apparent cohesion as a result of the generation of pore pressures negative, however, when the material comes in contact with water, this cohesion is lost quickly leads to the shear resistance of the material only depend on the angle of internal friction.

Keywords: pore pressure; suction; shear strength; slope stability; Olaya terrace; mass movement.

Caracterización geotécnica de los limos de la terraza del municipio de Olaya, Antioquia, Colombia

Resumen

En el mes de abril del 2014 se presentó un movimiento en masa de los suelos que conforman la terraza del municipio de Olaya (departamento de Antioquia). En este documento se presentan los resultados de la caracterización física, mecánica y del comportamiento hidromecánico de los suelos limosos de dicha formación, con el fin de evaluar las posibles causas del movimiento. Se confrontaron las hipótesis planteadas por las entidades competentes que en su momento evaluaron la problemática y se determinó a partir de esta investigación que el suelo, para las condiciones *in situ*, experimenta una cohesión aparente como resultado de la generación de presiones de poros negativas, no obstante, cuando el material se pone en contacto con agua, dicha cohesión se pierde rápidamente, conllevando a que la resistencia al corte del material dependa solo del ángulo de fricción interna.

Palabras clave: presión de poros; succión; resistencia al corte; estabilidad de taludes; terraza Olaya; movimiento en masa.

1. Introducción

El martes 22 de abril de 2014 en el municipio de Olaya se presentó un fenómeno de movimiento en masa del terreno que compone el talud izquierdo del cauce de la quebrada La Barbuda, como resultado del movimiento 13 casas que se localizaban en la corona del talud sufrieron destrucción total y varias edificaciones quedaron con serios problemas estructurales. El municipio de Olaya es un municipio que hace parte del occidente antioqueño. Se encuentra localizado geomorfológicamente en una terraza aluvial, la cual se caracteriza por presentar una altura aproximada de 50 metros con respecto al nivel del río Cauca.

En este artículo se presentan los resultados de la caracterización física, mineralógica, mecánica e hidromecánica

de los materiales limosos que conforman la terraza de Olaya, así como la caracterización geológica del sitio, con el propósito de determinar posibles causas del deslizamiento ocurrido en la zona. Se dan a conocer los resultados de los ensayos de laboratorio del material que compone la terraza Olaya y finalmente se realiza un análisis en conjunto de los ensayos de laboratorio para validar las hipótesis planteadas.

2. Generalidades de la zona de estudio

La zona de estudio se encuentra localizada en el casco urbano del municipio de Olaya, ubicado al occidente del departamento de Antioquia, a unos 100 km de la ciudad de Medellín. El municipio se encuentra sobre la margen derecha

del río Cauca, en la cota 500 msnm, con coordenadas N=1.225.008 y E=808.080 (Datum Bogotá), Fig.1.

El sitio de estudio corresponde a un talud vertical, Fig. 2, resultado de un movimiento en masa ocurrido en la cabecera municipal del municipio de Olaya en el mes de abril de 2014. Las coordenadas de la parte baja donde ocurrió el movimiento son: N=1.225.081 y E=808.024, en la cota 475 msnm, [1].

La zona posee un clima semiárido, con humedad relativa, precipitaciones y temperaturas promedio de 74 %, 967 mm/año y 27°C, respectivamente. En la zona se presentan dos periodos climáticos correspondientes a la época húmeda (marzo a mayo y septiembre a noviembre) y a la época seca (junio a agosto y diciembre a febrero) [4-6]. En cuanto a las zonas de vida o formaciones vegetales del área de estudio corresponden principalmente a un Bosque Seco Tropical (Bs-T) [2]. El principal drenaje corresponde a la quebrada La Barbuda.

3. Antecedentes

La cabecera municipal de Olaya se apoya sobre una terraza fruto del depósito de materiales por la acción del río Cauca luego de la formación del embalse generado por el deslizamiento El Guásimo [4,5].

El día 22 de abril de 2014, alrededor de las 7:00 p.m., se presentó en la zona urbana del municipio de Olaya un movimiento en masa que afectó el costado norte de la calle 10 de este municipio, Fig. 2, resultando la destrucción total de 13 viviendas y la edificación donde funcionaba la Registraduría del municipio. Además, dicho movimiento en masa, dejó en condiciones críticas de estabilidad el antiguo edificio de la Alcaldía Municipal y todas las viviendas ubicadas al frente del Palacio Municipal entre la calle 10 y la quebrada La Barbuda [1].

El movimiento en masa se generó por un hundimiento súbito del terreno sobre la margen izquierda de la quebrada La Barbuda, presentándose un desplazamiento vertical de aproximadamente 16 metros de altura y dejando como huella una pared vertical, Fig. 2. El grupo de trabajo que atendió la emergencia, por parte de la Gobernación de Antioquia, estimó un volumen de material desplazado por el movimiento de aproximadamente 90.000 metros cúbicos, además la diferencia de altura entre la quebrada La Barbuda y la calle 10 donde se ubica la Alcaldía es de 26 metros [1].

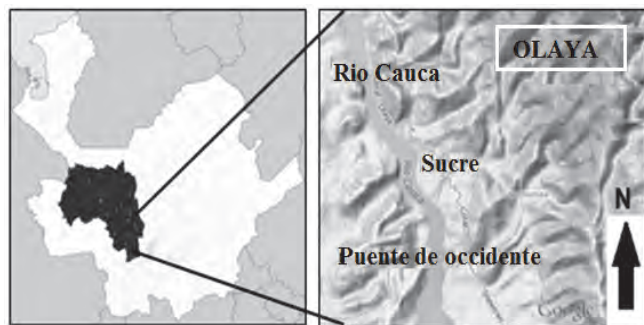


Figura 1. Ubicación del municipio de Olaya, Antioquia, Colombia
Fuente: modificado por el autor [1] [2]



Figura 2. Movimiento en masa en el municipio de Olaya, Antioquia, Colombia
Fuente: [1]

La anterior situación no es la primera vez que ocurre en la zona, puesto que diferentes eventos de movimientos en masa han ocurrido en el municipio de Olaya, el 29 de abril de 2008 y el 10 de junio de 2009 [1].

4 Aspectos geológicos y geomorfológicos

Regionalmente en la zona de estudio se presentan las unidades geológicas denominadas como: Esquistos verdes (Pev), Anfíbolitas de Sucre (Pzas), Diorita de Heliconia (Kdhb-Kdha), Batolito de Sabanalarga (Kdhs-Kdhsc-Khs), Rocas ultramáficas de Sucre (Jus), Depósitos Aluviales (Qal) y Depósitos de vertiente (Qd) [6].

En la zona de estudio se tienen principalmente depósitos aluviales asociados al río Cauca, y a las quebradas La Tunala y La Barbuda. El material concerniente a la terraza Olaya se caracteriza por presentar intercalaciones de materiales de limos y arenas finas, con algunos lentes de grava. Dentro del material limoso se aprecian además costras ferruginosas de color naranja. El material limoso, sobre el cual se centra la atención del presente artículo, presenta una coloración amarillo-naranja, se encuentra levemente húmedo y presenta consistencia firme a dura. En las zonas donde se encuentra en contacto con el material arenoso se observan óxidos de hierro de color naranja.

De otro lado, en la zona de estudio se tienen las siguientes unidades geomorfológicas [6]:

Terraza la Barbuda: esta terraza se encuentra asociada a la quebrada la Barbuda localizada en su margen derecha, en todo el frente de la terraza Olaya. Se caracteriza por presentar material gravo-arenoso, su tope es plano a levemente colinado, cubierto de vegetación.

Terraza Olaya: se caracteriza por presentar tope plano, con aproximadamente 50 m de altura con respecto al río Cauca, presentan escarpes verticales, sin embargo ha sido intervenida debido al movimiento en masa ocurrido en abril de 2014 en el municipio de Olaya, por lo cual actualmente se

observa un conjunto de bermas. Estas geoformas presentan inclinaciones menores de 5 grados, i.e., de llanas a suaves.

Abanicos aluviales: Asociados a la quebrada La Barbuda ubicada en la margen derecha del río Cauca y La Tunala en la margen izquierda. El abanico asociado a la quebrada La Barbuda, se encuentra ubicado en el piso de la terraza Olaya, donde actualmente se tiene actividad antrópica como la siembra de cultivos. Estas geoformas presentan inclinaciones menores de 5 grados, i.e., de llanos a suaves.

5. Hipótesis de trabajo y plan de ensayos de laboratorio

Entre las hipótesis de las causas del movimiento manejadas por las diferentes entidades competentes, en su momento, se encuentra en primer lugar que los materiales objeto de estudio no presentan parámetro de cohesión, por lo tanto su grado de estabilidad depende exclusivamente del parámetro de ángulo de fricción interna.

En segundo lugar, la causa del movimiento presentado estaría asociada a la sensibilidad del terreno a la generación de procesos erosivos y movimientos en masa. Durante las visitas de campo no fue posible verificar la incidencia directa de factores tales como: socavación de la margen izquierda de la quebrada La Barbuda y/o infiltración de aguas provenientes de las redes de acueducto y alcantarillado presentes a lo largo de la calle 10 del municipio; aunque no se descartó que éstos hubieran podido contribuir con el evento [1].

Considerando lo anterior, el plan de ensayos de laboratorio fue diseñado para verificar las hipótesis mencionadas, i.e., determinar los parámetros de resistencia en diferentes condiciones de drenaje y tratar de cuantificar, de alguna manera, la sensibilidad del material a la generación de procesos erosivos y pérdida de resistencia mecánica en presencia de agua. A continuación se listan los ensayos de laboratorio ejecutados:

5.1. Caracterización física

- Contenido de humedad natural. [7]
- Gravedad específica de los sólidos. [8]
- Granulometría por lavado sobre la malla No 200. [9]
- Límites de consistencia. [10]

5.2. Caracterización mineralógica

- Difracción de rayos “X”: para determinar la presencia de minerales sensibles a la presencia de agua. [14].
- Microscopía Electrónica de Barrido (MEB): permite estudiar la microestructura y confirmar la presencia de minerales específicos a partir de imágenes detalladas. [14].

5.3. Caracterización mecánica

- Corte directo consolidado drenado (CD) [12].
- Corte directo no consolidado no drenado (UU) saturado y no saturado: este ensayo no cuenta con una norma estándar para su ejecución, dadas sus limitaciones. Sin

embargo, dicho ensayo fue ejecutado para evaluar el comportamiento del suelo no consolidado, bajo aplicaciones de carga rápida y sin drenaje [11] [12].

- Ensayo triaxial convencional a compresión consolidado drenado (CD) [15].
- Ensayo de compresión inconfina [16].
- Doble-edómetro: Consiste en la ejecución simultánea de dos ensayos edométricos simples, uno en condiciones de humedad natural y otro en condiciones saturadas, a partir de los cuales se generan dos curvas de compresibilidad del suelo y con base en las diferencias en la relaciones de vacíos se calcula el índice de colapso [17] [18].
- Desagregación: Con este ensayo se pretende examinar la estabilidad de una muestra de suelo natural ante la inmersión en agua, lo cual puede ser asociado a fases del proceso erosivo [19] [20].
- *Pinhole test*: Este ensayo se realizó para tratar de evaluar el comportamiento del suelo ante una posible infiltración de aguas provenientes de redes de acueducto y alcantarillado [21] [20].
- Ensayo de succión con papel filtro trayectoria mixta: Este ensayo permite medir la succión tanto matricial como total del suelo [22], [24,25].

6. Análisis de resultados

6.1. Propiedades índices

Para caracterización física del material del sitio se realizaron ensayos de clasificación siguiendo las metodologías del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). Estos ensayos se realizaron sobre tres especímenes tomados de un mismo bloque de suelo en estado natural. En la Tabla 1 se presentan los resultados obtenidos.

Se observa que el suelo en su estado natural presenta un bajo porcentaje de humedad, tal y como se observó en la visita de campo. Sin embargo, no se puede comprobar por medio de los límites de Atterberg la consistencia firme a dura de la muestra, dado que el material resultó no plástico, i.e., no se pudo ejecutar el ensayo de límite de plasticidad por el método de Casagrande.

De igual manera, se observa un bajo porcentaje de saturación del orden de 40%.

Tabla 1.

Resumen de propiedades físicas y clasificación del suelo

Muestra	Gs	e	S	Wnat (%)	% Finos	IP (%)	SUCS
M1	2.94	0.67	0.39	9	69	NP	ML
M2	2.90	0.66	0.40	9	58	NP	ML
M3	2.95	0.63	0.41	9	58	NP	ML

Gs: gravedad específica de los sólidos, e: relación de vacíos, S: saturación, Wnat: humedad natural, IP: índice de plasticidad, NP: no plástico.

Fuente: el autor.

6.2. Granulometría

Por tratarse de un suelo donde el material fino-granular predomina y con el fin de clasificar el suelo de la zona de estudio, el ensayo de granulometría que se realizó fue lavado sobre la malla No 200. Los resultados se presentan en la Tabla 1 y en la Fig. 3. De los resultados se puede notar un porcentaje de finos promedio de 64 %, además, el material grueso-granular en menor proporción (36 %) corresponde a arena fina (25 %) y arena media (11 %).

6.3. Análisis mineralógico del suelo

6.3.1. Difracción de Rayos X (DRX)

El resultado del ensayo de DRX se presenta en la Fig. 4. De la figura se observa predominio en minerales como el cuarzo y la albita, en menor proporción anfibolita y se refiere la existencia de montmorillonita y vermiculita, arcillo minerales moderadamente expansivos. En el ensayo duploedométrico se verifica la relevancia de la montmorillonita y la vermiculita en el comportamiento del suelo.

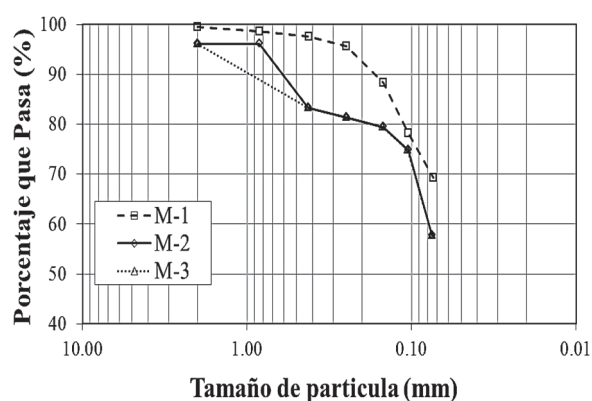


Figura 3. Curva granulométrica del material grueso-granular retenido en la malla No 200

Fuente: el autor.

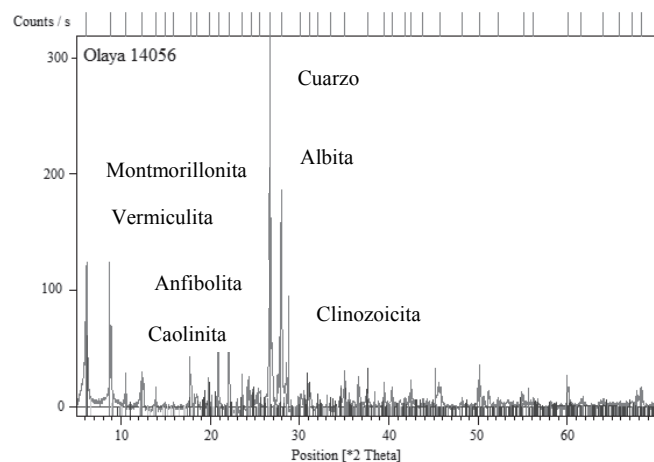


Figura 4. Resultados del ensayo de DRX

Fuente: el autor.

6.3.2. Microscopia Electrónica de Barrido (MEB)

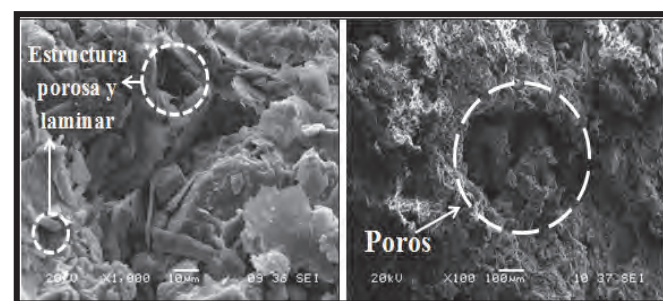
A partir del ensayo de Microscopia Electrónica de Barrido (MEB) se obtuvieron imágenes, Fig. 5, en las cuales se puede observar el arreglo estructural del suelo controlado por la mineralogía del mismo. De la Fig. 5 se observa un arreglo homogéneo con presencia de poros debido al empaquetamiento de los minerales de arcilla presentes reportados en el ensayo de DRX.

6.4. Ensayo de corte directo

6.4.1. Corte directo consolidado drenado (CD)

El ensayo de corte directo CD fue realizado con varios especímenes de suelo natural, los cuales fueron sometidos a diferentes esfuerzos de confinamiento, dependiendo de las condiciones *in situ*. Los resultados se presentan en la Fig. 6.

De la Fig. 6, se puede inferir que el material objeto de estudio no presenta parámetro de cohesión, tal y como se planteó en la hipótesis de trabajo, por tanto se puede afirmar que la resistencia al corte del material, para condiciones largo plazo, depende únicamente del parámetro de ángulo de fricción interna. Es importante recalcar que para casos de estabilidad de taludes, la condición largo plazo es la más



a. MEB, zoom 1000 μm

b. MEB, zoom 100 μm

Figura 5. Resultados de la microscopia electrónica de barrido

Fuente: el autor.

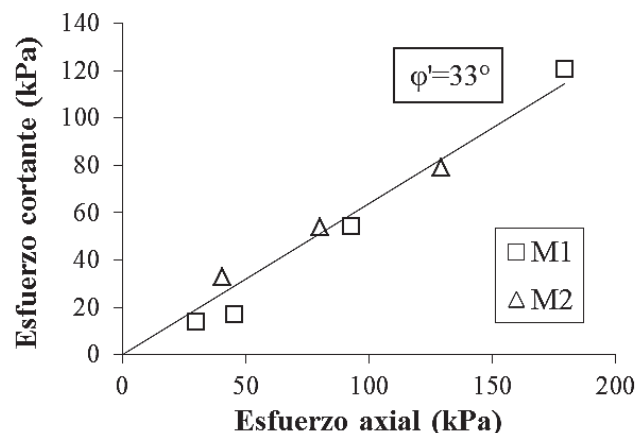


Figura 6. Resultado del ensayo de corte directo CD

Fuente: el autor.

crítica y el ensayo de laboratorio que mejor representa dicha condición es el ensayo de corte directo CD.

6.4.2. Corte directo no consolidado no drenado (UU)

Anteriormente el ensayo de corte directo UU era frecuentemente utilizado en la mecánica de suelos aplicada para evaluar la resistencia al corte de suelos empleados para fundaciones, también para evaluar la estabilidad de taludes a corto plazo, entre otros casos. Sin embargo, la anterior práctica no es la más adecuada puesto que los equipos que hasta la fecha son empleados para realizar dicho ensayo presentan muchas limitaciones, las cuales no permiten en el laboratorio controlar las variables que se requieren para representar las condiciones en campo [13]. No obstante, no se puede desconocer que la condición no consolidada no drenada es la más crítica cuando se quiere evaluar suelos para fundaciones.

Considerando lo anterior, este ensayo se realizó con el fin de tener una idea de cómo puede verse afectado el comportamiento del suelo empleado como fundación cuando hay presencia de agua, para condiciones de corto plazo. En este orden de ideas, el ensayo se realizó sobre dos muestras de suelo en estado natural, una en condiciones de humedad natural y otra saturada, Fig. 7. En dicha figura se puede observar que la resistencia al corte del suelo a corto plazo se puede ver muy afectada por la presencia de agua.

Cabe resaltar que los resultados del ensayo de corte directo UU fueron analizados con respecto a esfuerzos totales. Se observa una pérdida significativa de la cohesión cuando se satura el suelo, de 128 kPa a 28 kPa.

6.5. Ensayo triaxial axisimétrico (CD)

La envolvente de falla resultado del ensayo triaxial convencional CD se presenta en la Fig. 8. Los parámetros de resistencia efectivos obtenidos por medio de este ensayo son coherentes a los obtenidos en el ensayo de corte directo CD, puesto que por la condición de carga es de esperarse que los obtenidos por el ensayo triaxial sean un poco mejores que los obtenidos por el ensayo de corte directo.

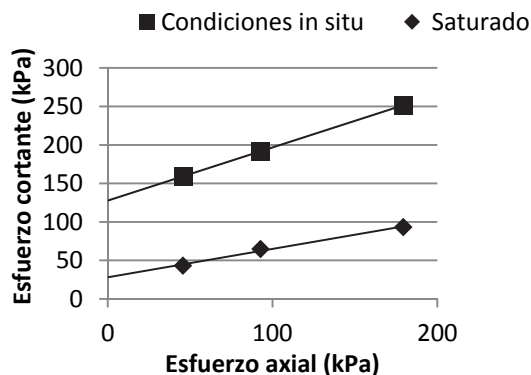


Figura 7. Resultados del ensayo de corte directo UU, realizado para condiciones *in situ* (a humedad natural) y para condiciones saturadas. Fuente: el autor.

Sin embargo, si lo que se quiere es evaluar el comportamiento del suelo para condiciones de largo plazo se recomienda emplear los resultados obtenidos por el ensayo triaxial convencional CD.

6.5. Ensayo compresión inconfiada

El ensayo se realizó sobre tres muestras de suelo natural, labradas del mismo bloque, Fig. 9. De la figura se puede observar que el material exhibe un comportamiento rígido, dado que muestra poca deformación axial para las cargas impuestas.

De este ensayo se obtuvo la resistencia al corte no drenado del material, 200 kPa, considerando el aporte por fricción. De acuerdo con lo anterior en la Tabla 2 se presenta un resumen de los parámetros de resistencia drenados y no drenados obtenidos.

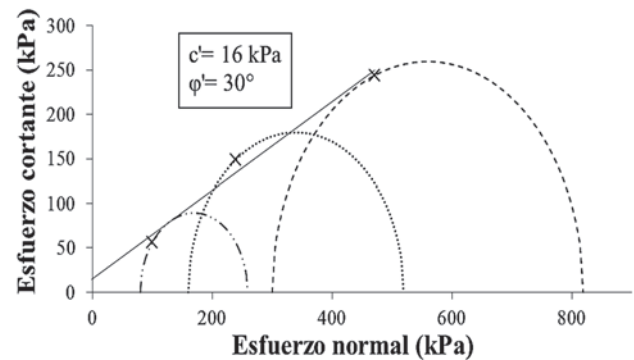


Figura 8. Envolvente de falla resultado del ensayo triaxial convencional CD. Fuente: el autor.

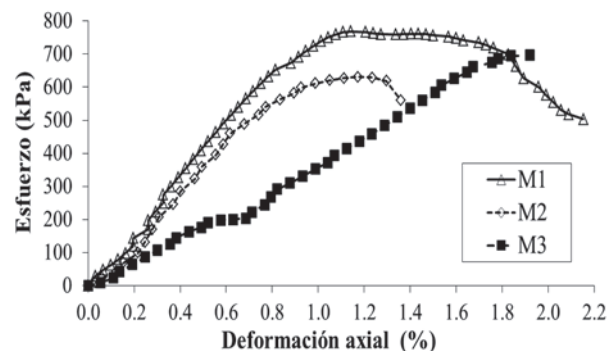


Figura 9. Curva de esfuerzo deformación. Resultado de ensayo a compresión inconfiada. Fuente: el autor.

Tabla 2

Resumen de parámetros de resistencia

Condición	Su (kPa)	c' (kPa)	φ' (°)	Observación
No drenado	200	N/A	33	Parámetros corto plazo
Drenado	N/A	0	33	Parámetros largo plazo

Su: resistencia no drenada, c': parámetro de cohesión efectiva, φ': parámetro de ángulo de fricción efectiva, N/A: no aplica.

Fuente: el autor.

De la Tabla 2 se puede inferir que el material en condiciones no drenadas presenta una resistencia alta (fruto de la cohesión y la fricción), sin embargo, al saturarse la resistencia por cohesión se pierde. Es muy probable que en las épocas tempranas del asentamiento del municipio, los taludes permanecieran estables debido a la condición de corto plazo, sin embargo, hoy día las condiciones de drenaje ya no son las mismas y por tanto la estabilidad geotécnica de los taludes puede experimentar una disminución considerable.

6.6. Ensayo de doble edómetro

El ensayo de doble edómetro se realizó sobre dos muestras y los resultados se presentan en la Fig. 10 y en la Fig. 11. En la Fig. 10 se presenta la curva de compresibilidad para los especímenes de la muestra M2, en dicha figura se observa que el material no es expansivo dado que al inicio del ensayo el espécimen saturado no experimenta expansión con respecto al espécimen en condiciones *in situ*, i.e., los dos espécimen inician el proceso de carga con la misma relación de vacíos [22].

En la Fig. 11 se presenta la curva de compresibilidad normalizada (e/e_0) con respecto a la relación de vacíos, con el fin de realizar los cálculos de índice de colapso a los niveles de esfuerzos requeridos [16]. Considerando las condiciones *in situ*, se puede estimar que el máximo esfuerzo probable que se puede presentar en la zona de estudio es de 500 kPa, para este nivel de esfuerzo el índice de colapso es de 4 %, calificando el suelo como moderadamente colapsable. Sin embargo, se debe tener en cuenta que si las cargas en la terraza llegaran a aumentar entre 1000 kPa hasta 1600 kPa, por efecto de construcciones en la zona, el colapso pasaría a clasificarse como un problema grave.

6.7. Ensayo de desagregación

El ensayo de desagregación se realizó sobre un espécimen cúbico de 6 cm de lado, el cual fue sometido a un proceso de inundación con agua durante 50 minutos, el resultado del ensayo se presenta en la Fig. 12a y en la Fig. 12b se observa

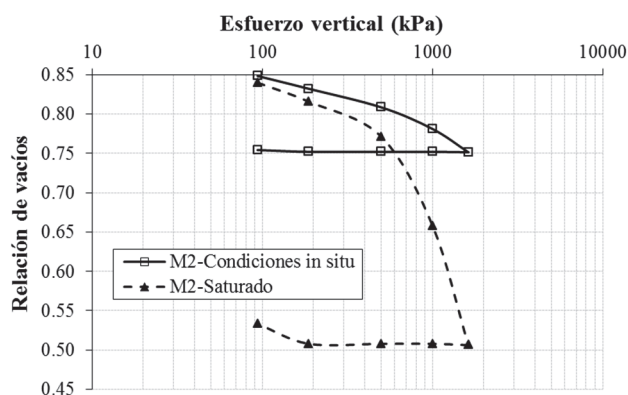


Figura 10. Curva de compresibilidad para la muestra M2. Ensayo de doble-edómetro. Fuente: el autor.

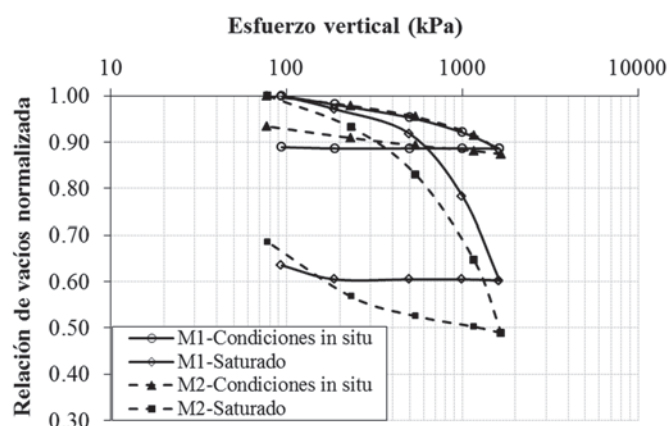


Figura 11. Curvas de compresibilidad normalizadas con respecto a la relación de vacíos. Ensayo doble-edómetro

Fuente: el autor

el ascenso por capilaridad del agua hasta aproximadamente 2/3 de la altura del cubo cuando el nivel del agua está en la base del mismo (la base fue una piedra porosa). Lo anterior ocurrió en 15 minutos. Luego se aumentó el nivel del agua hasta 1/3 de la altura del cubo por 15 minutos, Fig. 12d, se observó el ascenso de agua hasta la parte superior. Cuando el nivel se aumentó a 2/3 de la altura del espécimen, este estaba prácticamente saturado, a partir de este momento la muestra empezó a experimentar pérdida súbita de resistencia, Fig. 12f y Fig. 12g, hasta la desagregación total cuando el nivel del agua se aumentó hasta la altura del espécimen. Lo anterior demuestra que el suelo en condiciones *in situ* experimenta alta succión matricial, presiones de poros negativas, las cuales se encargan de brindar al suelo cohesión aparente, i.e., mejor estabilidad. Sin embargo, dichas presiones negativas se pierden rápidamente y aparecen las presiones positivas, una vez el suelo entra en contacto con el agua, en otras palabras, cuando el suelo está saturado la resistencia al corte depende únicamente del ángulo de fricción.

6.4.6. Ensayo Pinhole

De la Fig. 13 se puede observar que la muestra presenta alto grado de erosión interna, al presentarse una notable diferencia entre el tramo de carga y descarga, asociado al fenómeno presentado por algunas partículas desprendidas debido al flujo del agua y posterior taponamiento del agujero que se da a partir de una cabeza hidráulica de 40cm (tramo de descarga debajo del tramo de carga).

6.4.7. Ensayo de succión

El ensayo de succión se realizó sobre dos muestras aplicando el método del papel filtro, los resultados se presentan en la Fig. 14. De la dicha figura se puede decir que cuando el suelo presenta humedades muy bajas, i.e., por debajo de 10 %, la succión puede llegar a ser mayor de 100 kPa, no obstante, con aumentos en la humedad, el suelo pierde succión, hasta llegar a valores de 10 kPa, para humedades de 25 %, aproximadamente.

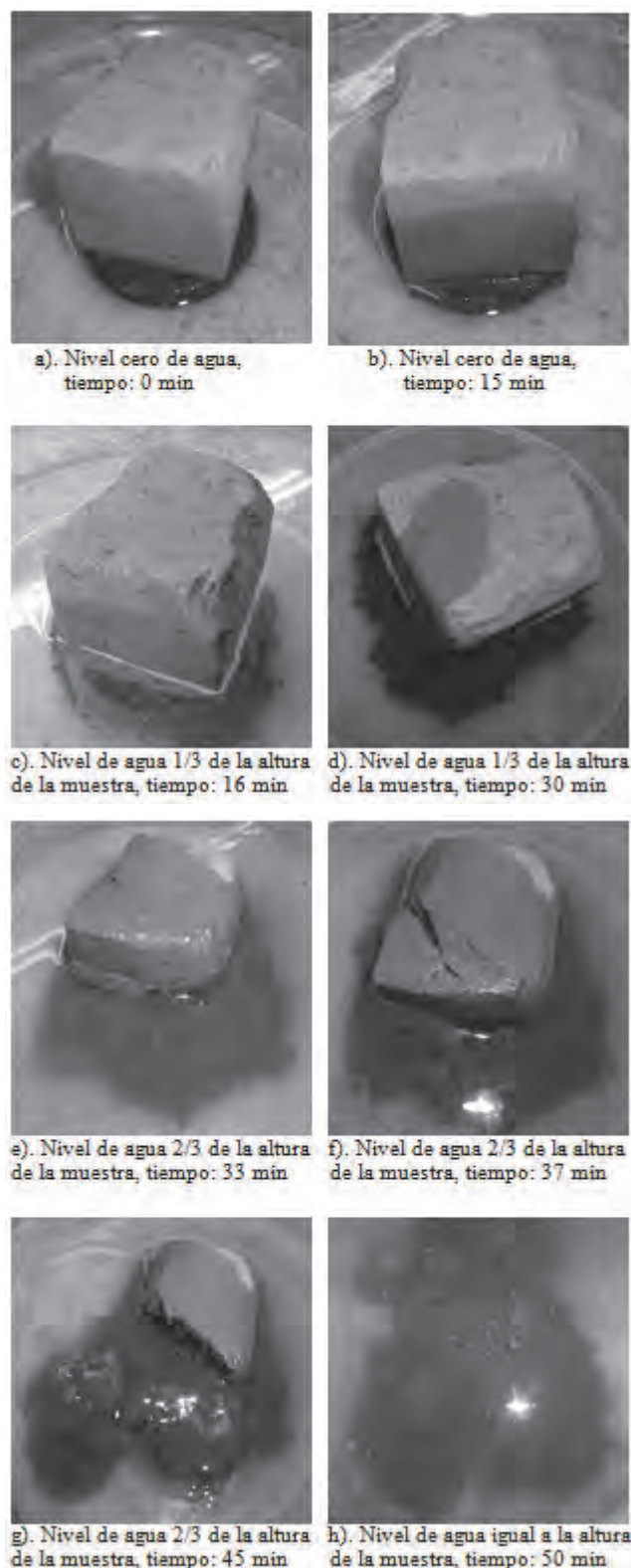


Figura 12. Resultados del ensayo de desagregación. Inmersión parcial
Fuente: el autor.

El ensayo no se pudo realizar con la humedad de saturación porque los especímenes no se dejaban moldear. De estas curvas

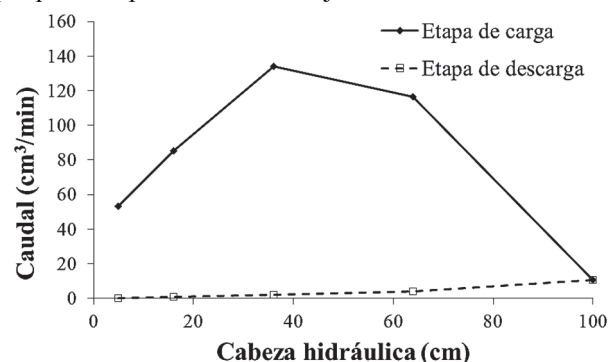


Figura 13. Curva de caudal vs. Cabeza hidráulica. Pinhole test.
Fuente: el autor.

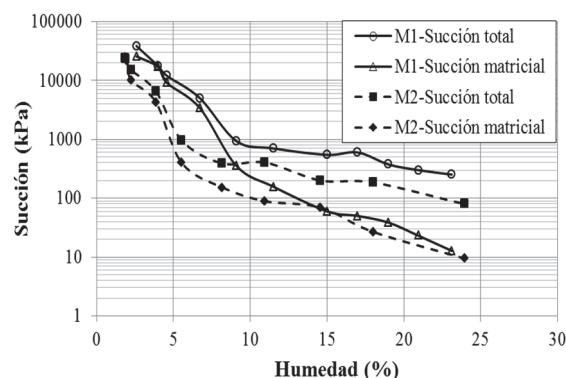


Figura 14. Curva característica del suelo. Succión total y matricial
Fuente: el autor.

se puede concluir que no hay una diferencia marcada entre macroporos y microporos (no hay bimodalidad marcada), sólo una pequeña insinuación de microporos, pero en general hay un paso gradual de macro a micros, reflejado en la MEB.

7. Conclusiones

Una de las hipótesis planteadas en el presente artículo fue comprobada, y es la relacionada con los parámetros de resistencia del suelo; para las condiciones *in situ* el suelo experimenta una cohesión aparente como resultado de la generación de presiones de poros negativas (succión matricial, que para humedades inferiores al 10% puede alcanzar 100 kPa), sin embargo, cuando dicho material se pone en contacto con agua, dicha cohesión se pierde rápidamente, lo cual conduce a que la resistencia al corte solo dependa del ángulo de fricción. Además, considerando que en la zona son comunes los taludes casi verticales, si la anterior situación se presenta, la posibilidad de que ocurra un movimiento en masa es muy alta.

Los ensayos de caracterización mineralógica, y el ensayo de colapso mostraron que el material no es expansivo, a pesar de contener vermiculita y montmorillonita. Además del

ensayo de colapso se puede inferir que para las condiciones de carga actual, la población no tendría problemas de asentamientos súbitos.

Los ensayos de desagregación y de *pinhole*, muestran que el suelo es susceptible tanto a la erosión externa como a la interna. El ensayo de desagregación, a pesar de ser un ensayo cualitativo, fue en el que mejor se pudo observar el fenómeno de cómo se pierde la succión cuando el suelo se encuentra en contacto con el agua.

No se puede concluir a ciencia cierta que el detonante del movimiento de tierras en Olaya haya sido causado por problemas de fuga de agua, por la falta de información disponible. No obstante, existe la probabilidad de que ocurra un movimiento en masa si se tiene en cuenta el registro histórico, si se alteraran las condiciones de saturación y/o las condiciones de carga externa sobre los taludes.

Referencias

- [1] Gobernación de Antioquia, Informe asesoría y asistencia técnica para el movimiento en masa ocurrido en el municipio de Olaya, Antioquia, Colombia, Medellín, 2014.
- [2] Alcaldía de Olaya-Antioquia-Colombia, Sitio web del municipio de Olaya en Antioquia, [En línea]. [Último acceso: 05/05/2015]. Disponible en: <http://www.olaya-antioquia.gov.co/index.shtml>.
- [3] Google Earth, 17/09/2005. [En línea]. [Último acceso: 11/05/2015].
- [4] Arrieta-Pastrana, A., Análisis de las terrazas aluviales del río Cauca producidas por el deslizamiento El Guásimo cerca a Santa Fé de Antioquia, Tesis, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, 1989.
- [5] Ortiz-Amariles, E.A. y Pérez-Flórez, Y., Características geológicas y geomorfológicas del mega deslizamiento del Guásimo, Tesis, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, 1998.
- [6] Agudelo-Giraldo, B. y Arroyave-Soto, J.D., Cartografía detallada y litoestratigrafía de los depósitos Aluvio-Lacustres Holocénicos del Río Cauca en los alrededores de Santa Fe de Antioquia, Tesis, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, 2005.
- [7] ASTM D 2216-05, Standard test methods for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass.
- [8] ASTM D854-06, Standard test method for specific gravity of soil soils by water pycnometer.
- [9] ASTM D1140-14, Standard Test Methods for Determining the Amount of Material Finer than 75- μ m (No. 200) Sieve in Soils by Washing, D1140-14, 2014.
- [10] ASTM D4318-05, Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index soils.
- [11] Valencia, Y., Influencia da biomineralizacao nas propriedades fisico - mecânicas de um perfil de solo tropical afetado por processos erosivos, Tesis, Universidad de Brasilia, Brasilia, Brasil, 2009.
- [12] ASTM D3080-04, Standard test methods for direct shear test of soils under consolidated drained conditions.
- [13] Ou, Deep excavation theory and practice, London: Taylos & Francis, 2006.
- [14] Bowles, Foundation analysis and design, Illinois: McGraw Hill, 1988.
- [15] ASTM D7181-11, Method for consolidated drained triaxial compression test for soils, D7181-11, 2011.
- [16] ASTM D2166M-13, Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil, D2166M-13, 2013.
- [17] ASTM D2435-04, Standard test methods for one-dimensional consolidation properties of soils using incremental loading.
- [18] Jennings, J. and Knight, K., A guide to construction on or with materials exhibiting additional settlement due to "Collapse" of grain structure., VI Conference for África on Soils mechanics and Foundation Engineering, Durban, pp. 99-105, 1975.
- [19] ASTM D4647, Standard test methods for identification and classification of dispersive clay soils by the pinhole test.
- [20] Camapum de Carvalho, J., Processos erosivos no Centro- Oeste Brasileiro, Brasília, Brasil: Editora FINATEC, 2006.
- [21] ABNT NBR 14114/98, Solo-solos argilosos dispersivos- identificação e classificação por meio do ensaio do furo e agulha (pinhole test).
- [22] ASTM D5298-03, Standard test methods for measurement of soil potential (suction) using filter paper.
- [23] Fredlund, D.G. and Rahadjo, H., Soil mechanics for unsaturated soils, New York, 1993. DOI: 10.1002/9780470172759
- [24] Melo-Ferreira, S.R., Graça de Vasconcelos, M. y Ferreira, X., Mudanças de volume devido à variação do teor de água em um vertissolo no semiárido de Pernambuco, Revista Brasileira de Ciência do Solo, 33, pp. 779-791, 2009. DOI: 10.1590/S0100-06832009000400004
- [25] Escobar, L. y Valencia, Y., Análisis de estabilidad y probabilidad de falla de dos taludes de suelo tropical en la autopista Medellín-Bogotá en el tramo de vía entre Marinilla y Santuario, Boletín de Ciencias de la Tierra, 31, pp. 51-64, 2012.
- [26] INSTITUTO GEOGRAFICO AGUSTIN CODAZZI, Mapa de Formaciones Vegetales de Colombia 1:500.000, Bogotá, 1977.
- [27] ASTM D4221, Standard test method for dispersive characteristics of clay soil by double hydrometer.
- [28] Nogami, J. y Villibor, D., Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos, São Paulo, Brasil, 1995.

O. Echeverri-Ramírez, graduado de Ingeniera Civil en 1980, MSc. en Ingeniería – Geotecnia en 2005 de la Universidad Nacional de Colombia. Actualmente es profesor Asociado del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín. Sus líneas de investigación son: geotecnia de ambientes tropicales, biotecnología, estabilidad de taludes.
ORCID 0000-0002-4665-8786

Effect of the temperature in adsorption phenomena of water onto Sub-Bituminous coal

Esteban Alberto Taborda-Acevedo ^a, William J. Jurado ^b & Farid B. Cortés ^{a*}

a, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. *fbcortes@unal.edu.co

b. Departamento de Optimización de Procesos, Grupo Argos S.A, Colombia. Medellín. wjurado@argos.com.co

Received: November 12th, 2015. Received in revised form: December 9th, 2015. Accepted: December 16th, 2015.

Abstract

The presence of water in coal presents a technological challenge for its industrial use in energetic processes. Therefore, this study aims to study the temperature effect on the water adsorption onto coals at 21, 30, 40 and 50°C. A Colombian bituminous coal was used as sample. The coal was characterized by nitrogen adsorption at 77 K (S_{BET}), Scanning electron microscopy (SEM), Fourier transform infrared (FT-IR) spectroscopy, elemental analysis (C-H-N elemental). The results showed that the water uptake increased as the vapor pressure increased. The Talu and Meunier model [1] was used to fit the adsorption isotherms, and the mean square root error (MSRE%) was lower than 10%. Additionally, the Gibbs free energy was found to have negative values, which corroborates the spontaneous adsorption process.

Keywords: Adsorption; Coal; Isotherm; Water

Efecto de la temperatura en el proceso de adsorción de agua en Carbón sub-bituminoso colombiano

Resumen

La presencia de agua en carbones presenta un reto tecnológico para su uso industrial en procesos energéticos. Por tal motivo, este estudio pretende analizar el efecto de temperatura en la adsorción de agua en carbones a 21, 30, 40 y 50°C. Un carbón sub-bituminoso Colombiano fue usado como muestra. El carbón fue caracterizado por adsorción de nitrógeno a 77K (S_{BET}), Microscopía electrónica de barrido (SEM), Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR), análisis elemental (C-H-N). Los resultados muestran que la captura de agua se incrementa a medida que la presión de vapor aumenta. El modelo Talu & Meunier [1] fue utilizado para ajustar las isoterms de adsorción, presentando un buen ajuste. MSRE% menor al 10%. Adicionalmente, se calculó la energía libre de Gibbs obteniendo valores negativos, lo cual corrobora el proceso espontáneo de adsorción.

Palabras clave: Adsorción; Carbón; Isoterma; Agua

1. Introducción

El carbón es el combustible fósil más abundante en la tierra y es uno de las principales fuentes energéticas [2,3]. Se espera que la producción global de carbón se incremente un 30% y alcance un máximo entre el 2020 y 2050 [2, 3]. Colombia ha demostrado poseer las mayores reservas de carbón en Sudamérica y está calificado como número once a nivel mundial [2,4,5]. Cerca del 85% de las reservas globales de carbón corresponden a carbón sub-bituminoso y lignito [2,4,5]. Ambas clases de carbón presentan sitios activos resultando en altos contenidos de agua debido a su alta afinidad por moléculas polares [6,7]. La presencia de agua en carbones presenta retos severos para su aplicación como por ejemplo: 1) El riesgo de combustión espontánea se

incrementa debido a la oxidación del material carbonoso en el carbón a temperatura ambiente. Esto ocurre cuando el carbón es expuesto al aire libre y desarrolla una adsorción química de oxígeno. Las grandes pilas de carbón, especialmente las almacenadas por largos periodos, pueden desarrollar puntos calientes de auto-calentamiento causado por la adsorción/desorción de agua en carbón [8-10]; 2) Los costos industriales por el transporte se incrementan; y 3) Una alta cantidad de energía es requerida para el secado del carbón vía procesos térmicos. En este sentido, muchos autores han estudiado el equilibrio de adsorción y los factores que lo afectan [11-14]: Se destacan los trabajos de: Salame & Badosz [12], los cuales estudiaron las propiedades termodinámicas de carbones con diferentes grados de acidez superficial, mediante la construcción

de isothermas de sorción de agua a tres temperaturas cercanas al ambiente (283-303K) utilizando el método termogravimétrico dinámico. Los resultados obtenidos indicaron que el calor isostérico solo es afectado por la heterogeneidad energética de la superficie. Nishino [15] realizó una investigación sobre la adsorción de vapor de agua en veinte muestras de carbón mineral, provenientes de países como Australia, Japón, Rusia, entre otros. En la experimentación se analizó la relación que existe entre la cantidad de oxígeno en el adsorbente y los grupos hidroxílicos presentes en su superficie, para así obtener isobaras que relacionen la cantidad adsorbida entre el número de grupos en la superficie del carbón. El autor observó que los sitios preferenciales en la superficie del adsorbente están compuestos, en mayor medida, por grupos carboxílicos funcionales. El estudio reveló que la cantidad adsorbida de vapor de agua es proporcional a la distribución de grupos carboxílicos. Allardyce et al. [16] caracterizaron la adsorción de agua en carbones lavados con ácido, y carbones secos con dos métodos a temperatura constante: 1) Altas coberturas o altas presiones de vapor de agua: el primer método usado fue el gravimétrico estático a partir de soluciones salinas saturadas que conservan la humedad relativa constante durante el tiempo de experimentación, y 2) Bajas coberturas o bajas presiones de vapor de agua: el segundo método utilizado es el gravimétrico dinámico (TGA) usando una termobalanza analítica. Se concluyó después de analizar los resultados que no existen diferencias significativas entre las isothermas de adsorción obtenidas por ambos métodos. Charrierre & Behra [17] reportaron las isothermas de adsorción – desorción en muestras de carbón bituminoso y en un carbón lignito. Las isothermas y las cinéticas de sorción de agua en carbón fueron estudiadas a una temperatura de 298K y un rango de presión relativa entre 0 y 0.95. Las isothermas obtenidas presentaron un comportamiento tipo II lo que sugiere que se trata de una adsorción multicapa creciente a medida que aumenta la presión relativa. En este sentido, el objetivo del presente trabajo es evaluar el efecto de la temperatura en la adsorción de agua en carbón sub-bituminoso Colombiano. Diferentes isothermas de adsorción de agua fueron obtenidas a 21, 30, 40, y 50°C. Las isothermas fueron descritas fenomenológicamente por el modelo de Talu & Meunier [1] para el entendimiento del comportamiento de moléculas autoasociativas como el agua en carbón. La muestra de carbón considerada en este estudio fue caracterizada utilizando análisis FT-IR, análisis elemental (C-H-N). Área superficial con el método BET mediante fisisorción de nitrógeno a 77 K y Poder calorífico neto (NHV). Adicionalmente se calcularon los valores de las propiedades termodinámicas de adsorción de agua en carbón.

2. Experimentos

2.1. Preparación Del Carbón

Una muestra de carbón fue obtenida de la región de Córdoba en el noroeste de Colombia y utilizada en este estudio. La preparación de la muestra de carbón fue realizada por separación y posterior cuarteo por cuatro veces. El tamaño de partícula fue subsecuentemente reducido a 250 μm

aproximadamente, utilizando un cortador y un Molino de bolas de acuerdo a la norma ASTM D2013-01. Posteriormente, el carbón fue secado en una atmósfera de aire a 120°C por 12 horas y fue transferido a un Sistema de desecado hasta alcanzar la temperatura ambiente.

2.2. Caracterización de la muestra.

La muestra de carbón fue caracterizada con análisis elemental realizado utilizando un 5000A TOC (CHN Shimadzu, Japan) para obtener los elementos C-H-N, el oxígeno fue obtenido calculando la diferencia. La fisisorción de nitrógeno a 77 K fue realizada utilizando un ASAP 2010 (Micromeritics, USA). El área superficial (S_{BET}) fue obtenida después de desgasificar la muestra por 12 horas aproximadamente a 140°C bajo ultra vacío (10^{-6} mbar). S_{BET} fue estimada utilizando el método Brunauer, Emmett y Teller (BET) [18-20]. El límite mínimo de confiabilidad del equipo detecta áreas superficiales de 1 m^2/g . Para determinar los grupos funcionales presentes en el carbón, la muestra fue caracterizada por espectroscopía infrarroja (IRAffinity-1S Shimadzu, Japan) [21-23]. Microscopía electrónica de barrido (JSM-5910JL, JEOL Japón) fue utilizada para obtener imágenes de la muestra de carbón para confirmar que se trata de una muestra no porosa

2.3. Isothermas de Adsorción.

El método termogravimétrico estático fue utilizado para la construcción de las isothermas de adsorción a 21, 30, 40 y 50°C. Este método involucre la determinación del peso Ganado por una muestra de carbón sometido a varias ambientes con actividades de agua diferentes (A_w) a una temperatura definida. Ocho contenedores con soluciones salinas sobresaturadas determinaron un rango de actividad acuosa entre 0.113 y 0.842 (Tabla 1) fueron colocados en un horno para cada temperatura evaluada por 24 horas. Después de la preparación de las soluciones Salinas, la actividad fue medida continuamente hasta que alcanzara un valor constante. Después, 0.5 g de carbón fueron colocados en el interior de los contenedores hasta alcanzar el equilibrio. La muestra de carbón fue pesada cada 8 horas en una balanza analítica (OHAUS – precisión of 0.0001 g) hasta que el peso no variara más de 1%. Este procedimiento fue realizado por triplicado para confirmar la reproducibilidad, y su desviación estándar fue calculada y presentada en forma de barras de error en la figura de las isothermas. Finalmente, la cantidad de agua adsorbida fue estimada calculando la diferencia entre el valor en peso final e inicial de la muestra. La cantidad adsorbida (N_{ads}) fue calculada como g de agua por g de carbón [15,20,24-30]. La Fig. 1 muestra una representación esquemática del procedimiento experimental. La Tabla 1 presenta las sales higroscópicas utilizadas para acondicionar cada sistema a la actividad acuosa deseada.

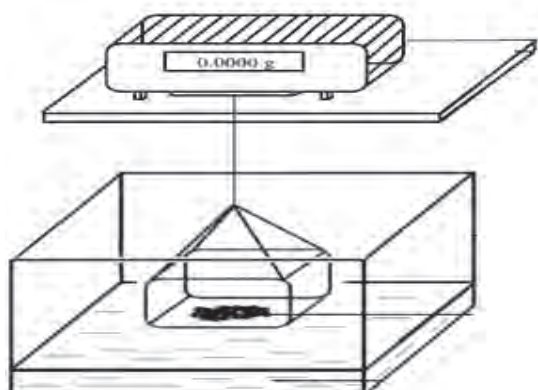


Figura 1. Representación esquemática del procedimiento experimental para la construcción de las isotermas de adsorción.

Fuente: Autores.

Tabla 1.
Sales higroscópicas para controlar la actividad acuosa (A_w)

Sal	K_{ps} (g/100 ml H_2O)	$A_w = P/P_{sat}$
Cloruro de Litio (LiCl)	83.2	0.113
Cloruro de Calcio ($CaCl_2$)	74.5	0.295
Cloruro de Magnesio ($MgCl_2$)	54.6	0.328
Carbonato de Potasio (K_2CO_3)	112	0.432
Bromuro de Sodio (NaBr)	90.5	0.577
Nitrito de Sodio ($NaNO_2$)	80.8	0.654
Cloruro de Sodio (NaCl)	39.8	0.753
Cloruro de Potasio (KCl)	34.2	0.843

Fuente: Autores.

Tabla 2.
Análisis elemental (C-H-O-N) y área superficial estimada. Fuente: Autores.

Muestra	%C	%H	%N	%O	S_{BET} ((m ² /g))
Carbón	64.79	5.15	1.96	28.11	4.94

Fuente: Autores.

3. Resultados y Discusión Fuente: Autores

3.1. Caracterización de la muestra

La Fig. 2 presenta las imágenes por espectroscopía electrónica de barrido (SEM) del carbón. De acuerdo con ella parece que el carbón tiene una estructura propia de un material no poroso. La Tabla 2 presenta el área superficial (S_{BET}) del carbón. De hecho, el valor de (S_{BET}) es bajo soportando la hipótesis que afirma que se trata de un material no poroso. La Tabla 2 también presenta el análisis elemental de la muestra.

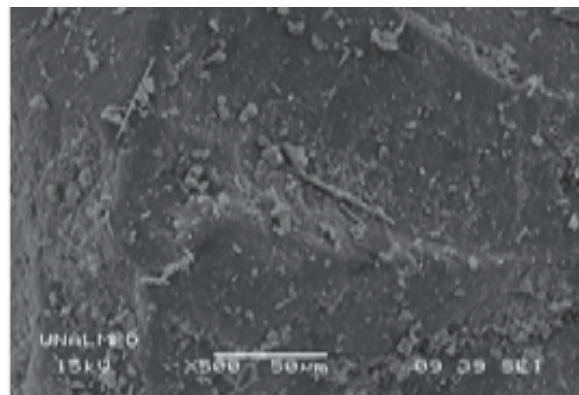


Figura 2. Imagen SEM de la muestra seleccionada.

Fuente: Autores.

3.2. Isotermas de Adsorción

La Fig. 3 presenta la isoterma de adsorción de agua en carbón a 21°C para una actividad acuosa entre 0.1-0.9. La isoterma de adsorción exhibe un comportamiento Tipo III de acuerdo con la clasificación de la IUPAC [1, 6]. La adsorción se incrementa a medida que aumenta la actividad de agua. Este comportamiento está de acuerdo con los estudios disponibles de la pareja sortiva carbón/agua [11,15-17,31-34]. La cantidad de vapor de agua en los contenedores de adsorción se incrementa debido al aumento en la presión de vapor del sistema (actividad acuosa). Las colisiones entre la muestra de carbón y las moléculas de agua son altamente favorecidas, promoviendo un aumento en la cantidad adsorbida. La forma resultante de la isoterma de adsorción indica una baja afinidad entre el adsorbato y el adsorbente, lo cual ocurre principalmente a bajas humedades relativas (actividad acuosa). El comportamiento de la isoterma muestra diferentes interacciones, incluyendo la interacción del agua con los sitios activos, junto con el agua adsorbida multi-capas en la superficie del carbón. (Fig. 3).

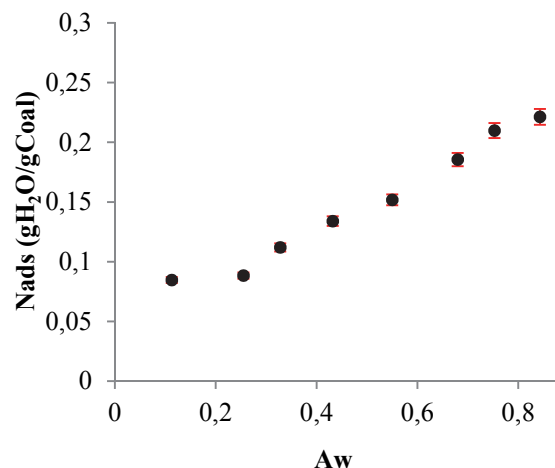


Figura 3. Isoterma de adsorción de agua en carbón a 21°C.
Fuente: Autores.

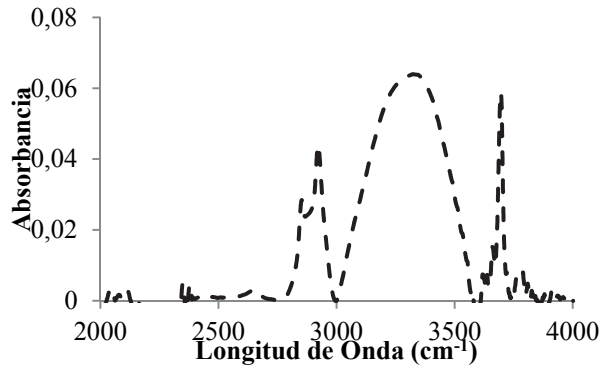


Figura 4. Espectro Infrarrojo para la muestra de carbón después de adsorber a $A_w = 0.84$.
Fuente: Autores.

El análisis por espectroscopía infrarroja se presenta en la Fig. 4 para la muestra de carbón después de adsorber agua a una actividad de 0.84. Como se muestra en la gráfica, la señal cercana a 3300 cm^{-1} indica la presencia de agua. Esto es representativo de las condiciones ambientales en los cuales los cambios de humedad de la muestra reflejados en la intensidad de la señal son acordes a lo encontrado en la isoterma de adsorción.

La isoterma de adsorción fue modelada utilizando el modelo propuesto por Talu y Meunier [1]. Este modelo puede ser expresado como una teoría general para la adsorción de moléculas auto-asociativas sobre estructuras sólidas. La aproximación es similar a la interpretación “química” de fases no ideales de líquido y vapor. La teoría puede explicar el comportamiento de las isothermas Tipo I a Tipo V, incluyendo isothermas tipo III características de adsorbentes no porosos, como es el caso de este trabajo. Los datos de las isothermas son dependientes únicamente en tres parámetros: El inverso de la constante de Henry, la capacidad de saturación y la constante de reacción de formación de “clúster” [1]. El modelo es descrito a continuación:

$$P = \frac{H\psi}{(1 + K\psi)} \exp\left(\frac{\psi}{Nm}\right) \quad (1)$$

$$\psi = \frac{-1 + \sqrt{1 + 4K\varepsilon}}{2K} \quad (2)$$

$$\varepsilon = \frac{N_m N}{(N_m - N)} \quad (3)$$

Donde, $N \text{ (g/g)}$ es la cantidad adsorbida, $N_m \text{ (g/g)}$ es la cantidad de saturación adsorbida por el monómero, $K \text{ (g/g)}$ es la constante de reacción relacionada con la agregación de las moléculas autoasociativas, $P \text{ (kPa)}$ es la presión de

equilibrio del sistema, y $H \text{ (kPa)}$ es el inverso de la constante de la ley de Henry

La Fig. 5 presenta la comparación entre los datos experimentales de las isothermas de adsorción a las temperaturas de 21, 30, 40 y 50°C y el ajuste con el modelo de Talu y Meunier. En la Tabla 3 se listan los valores obtenidos de los parámetros propios del modelo. Los valores de los parámetros concuerdan con las características del carbón, en el cual el valor de K es alto. Esto indica una rápida asociación de las moléculas de agua una vez los sitios primarios son ocupados y es similar al comportamiento descrito por las isothermas de adsorción. Por otro lado, el valor de H también es alto, indican que la afinidad en la isoterma de adsorción se disminuye. Altos valores del parámetro H indica menor afinidad de las moléculas de agua en la fase adsorbida. Los sitios activos están en lugares que no son de fácil acceso al agua, valores del parámetro K indican que los sitios primarios están en espacios muy diversos, resultando en un paso ampliado en la isoterma, que comienza a las presiones más bajas [1].

3.2.1. Efecto de Temperatura

La Fig. 5 presenta la cantidad de agua adsorbida en carbón a 21, 30, 40 y 50°C con el ajuste del modelo de Talu y Meunier. Se nota que la adsorción de agua es dependiente de la temperatura del sistema. Se exhibe una isoterma Tipo III de acuerdo a la clasificación de la IUPAC [35], lo que sugiere una adsorción multicapa para todas las temperaturas evaluadas. En una baja actividad de agua de menos de 0,3, el comportamiento es descrito por la adsorción de agua en los sitios de energía debido a la preferencia y la afinidad de las moléculas para estos sitios [6, 7]. A alta actividad, las moléculas de agua tienden a formar clústeres alrededor de los sitios de alta energía a través de asociaciones con puentes de hidrógeno [1]. Como era de esperar, el contenido de agua en el equilibrio aumenta con el aumento de la actividad de agua. Además, la cantidad de agua adsorbida disminuye con la temperatura debido a que la energía superior debilita las fuerzas de interacción entre el adsorbato y el adsorbente, lo que facilita la desorción de agua [20]. Con los datos obtenidos a través de las pruebas de equilibrio de sorción a diferentes temperaturas, es posible calcular las propiedades termodinámicas de sorción.

Los parámetros del modelo de Talu y Meunier [1] a diferentes temperaturas para el carbón se presentan en la Tabla 3. Se nota que el parámetro H es fuertemente dependiente de la temperatura, altos valores sugieren que hay baja afinidad entre el adsorbato y el adsorbente en la región de Henry [1]. Cuando la temperatura aumenta, las interacciones entre el carbón y la molécula de agua son débiles. Por lo tanto, las fuerzas de interacción se reducen por la temperatura. El parámetro N_m está relacionado con la cantidad adsorbida máxima, un aumento de temperatura favorece la desorción, por esta razón este valor de parámetro disminuye a medida que aumenta la temperatura.

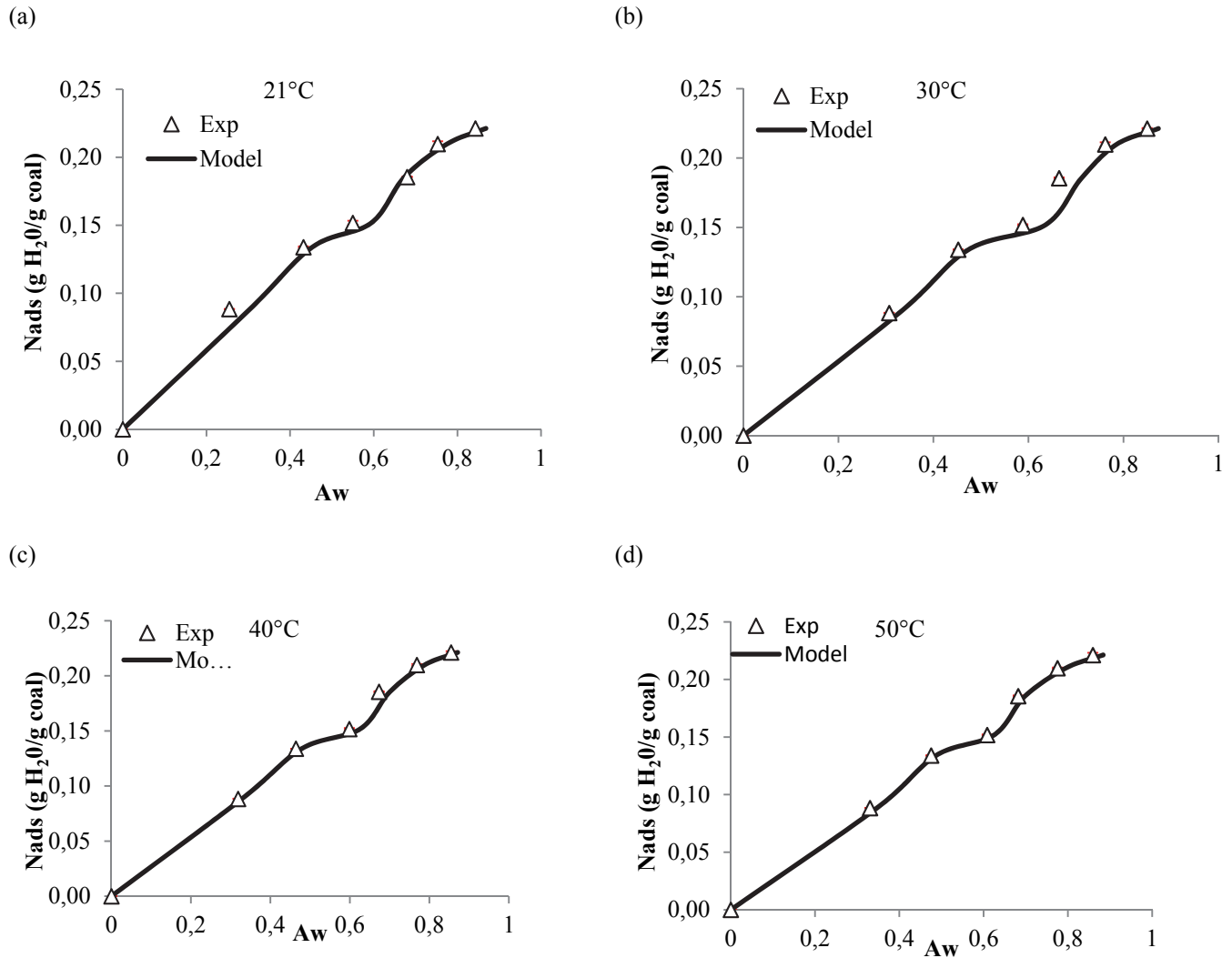


Figura 5. Isotermas de adsorción de agua en carbón a (a) 21°C, (b) 30°C, (c) 40°C and (d) 50°C
Fuente: Autores.

Tabla 3.
Parámetros del modelo Talu y Meunier para el carbón y todas las temperaturas evaluadas.

Temperatura	H (kPa)	K (g/g)	N _m (g/g)	MSRE (%)
21	18.5	16.9	0.18	7.45
30	82.5	14.9	0.16	8.12
40	140	14.4	0.15	7.15
50	215	13.5	0.14	4.25

Fuente: Autores.

El parámetro K está relacionada con el grado de agregación de moléculas de agua en la superficie del adsorbente, por lo tanto, cuando menor es la cantidad adsorbida menos agregación en los sitios activos, por eso el parámetro K disminuye a medida que aumenta la temperatura.

3.3. Propiedades Termodinámicas

Para entender aún más el efecto de la temperatura sobre la adsorción, se calcularon las propiedades termodinámicas

de sorción. El calor isostérico de adsorción es la cantidad de energía disipada durante el proceso de adsorción [7,36]. También se puede definir como la cantidad de energía requerida para la desorción. Esto se puede calcular a través de la ecuación de Clausius-Clapeyron [24,25,27,28,36-38]. El calor isostérico (Q_{isost}) de adsorción en unidades de Cal/g se puede estimar sobre la base del equilibrio establecido entre la fase gas y la fase condensada [20]. Esto se muestra en eq. 4:

$$Q_{isost} = \left(\frac{v_n}{v_g} - 1 \right) RZ \left(\frac{\partial \ln P}{\partial \left(\frac{1}{T} \right)} \right)_{Nads} \quad (4)$$

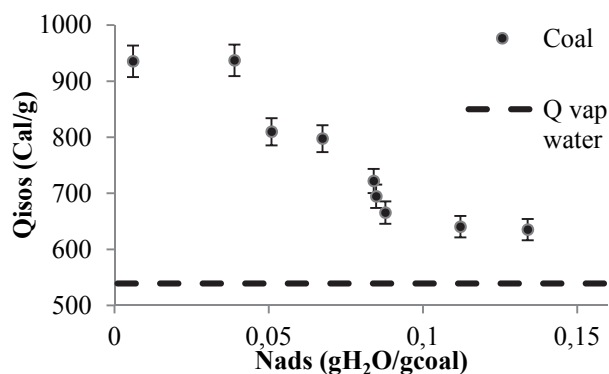


Figura 6. Calor isostérico de adsorción de agua en carbón.
Fuente: Autores.

donde P (kPa) y T (K) son la presión y la temperatura de equilibrio, respectivamente. R es la constante universal de los gases, Z es el factor de compresibilidad V_n (m^3/g) y V_g (m^3/g) son el volumen parcial de las especies adsorbidas y de la fase de gas, respectivamente.

Suponiendo un caso del gas ideal, para un valor constante de N_{ads} la eq. 4 se puede simplificar en la ecuación. 5 [32]:

$$\left(\frac{\partial \ln P}{\partial \left(\frac{1}{T} \right)} \right)_{N_{ads}} = - \frac{Q_{isos}}{R} \quad (5)$$

A partir de esta ecuación, el calor isostérico se puede calcular mediante la determinación de la pendiente de la línea de mejor ajuste cuando $\ln(P)$ se representa frente $1/T$ [20, 24]

La Fig. 6 presenta el calor isostérico de adsorción de agua sobre el carbón el cual disminuye ligeramente en función de N_{ads} y permanece casi constante en aproximadamente 600 Cal/g. Este valor es considerablemente más bajo que el calor isostérico para el carbón. Se sugiere que el calor isostérico varía con cargas de agua para revelar más baja energía heterogeneidad del adsorbente. Esto es porque los puntos de alta energía situados en la superficie del carbón reducen su intensidad energética, a continuación, la reducción de su afinidad al agua.

Este resultado muestra que la disminución muy ligeramente en la heterogeneidad de energía del adsorbente se debe a que Q_{isos} disminuye a medida que la cantidad de agua adsorbida aumenta. Esto indica que la superficie de carbón presenta sitios de alta energía y estrechamente relacionados con los compuestos polares, tales como agua. Esta información está de acuerdo con el equilibrio de adsorción en el que una cantidad más pequeña se adsorbe sobre la muestra de carbón; Por lo tanto, se requiere una menor cantidad de energía para desorber agua. La Fig. 6 muestra que la cantidad de energía requerida para secar la muestra a se

conoce con el contenido de humedad deseado. Estos datos son importantes para el diseño de secadores a escala industrial.

La energía libre de Gibbs de la adsorción es un criterio que define la viabilidad y la espontaneidad de la adsorción [19,36]. El comportamiento, descrito por la fase adsorbida, es la misma que la fase condensada. Esto también se conoce como el enfoque de condensación y se puede calcular utilizando eq. 6 [19,36]

$$\Delta G_0 = A = RTL \ln \left(\frac{P^0}{P} \right) \quad (6)$$

donde, A (Cal/g) es el potencial de adsorción molar, y T (K) y P (KPa) son la temperatura de equilibrio y la presión, respectivamente. La energía libre de Gibbs se calcula una presión normalizada " P^0 ".

La Fig. 7 muestra el cambio en la energía libre de Gibbs que es función de la cantidad adsorbida de agua sobre muestras seleccionadas. Para el sistema, la energía libre de Gibbs aumenta desde un valor negativo a cero. Este resultado demuestra la consistencia termodinámica de los datos experimentales y confirma que la reacción es energéticamente espontánea y heterogénea. Los datos también muestran que el sistema está de acuerdo con las tendencias de calor isostérico, como se informa en la Fig. 6.

Valores más negativos de la energía libre de Gibbs indican un proceso de adsorción exotérmica; Por lo tanto, las moléculas de agua se enlazan más fuerte a la superficie del carbón. La energía libre de Gibbs tiende hacia cero en a cantidades adsorbidas superiores a 0,04 g H₂O /g de carbón (porcentajes cercanos al 4% de humedad). Esto significa que el proceso es menos exotérmico y que las moléculas de agua adsorbidas están débilmente unidas a la superficie del carbón.

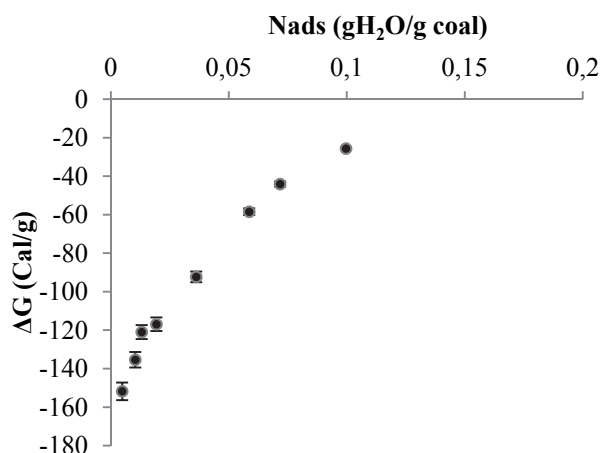


Figura 7. Relación entre la energía libre de Gibbs y la cantidad de agua adsorbida en el carbón.
Fuente: Autores.

Esto es debido a la interacción de las moléculas de agua del ambiente con las moléculas de agua que ya están en la

superficie del carbón. Por lo tanto, para reducir el contenido de humedad de la muestra tratada del 10% al 4%, se requiere una pequeña cantidad de energía para vaporizar el agua.

3.4. Calidad del carbón

El calor de combustión de un combustible se refiere comúnmente como el valor más alto de calentamiento (HHV) o el valor calórico. Se define como la cantidad de calor liberado cuando una cantidad unitaria del combustible se quema completamente. El poder calorífico es una característica única de cada tipo de combustible. El poder calorífico inferior (PCI) se define de manera similar, excepto que una cierta cantidad de agua de los productos de combustión no se condensa y se mantiene en forma de vapor. Por lo tanto, el LHV no incluye el calor de vaporización del agua producida [33]. La relación entre el HHV y de la LHV se puede expresar de la siguiente manera [39]:

$$NHV = HHV - H_v \quad (7)$$

Para combustibles sólidos (por ejemplo, el carbón), se expresa normalmente de la siguiente manera [39]:

$$NHV = HHV - 10.55(W + 9Hg) \quad (8)$$

Dónde:

H_v (Cal/g) es el calor de vaporización, NHV (Cal/g) es el poder calorífico neto del carbón, HHV (Cal/g) es el poder calorífico superior del carbón en Cal/g, w (% en peso) es la cantidad de agua en el carbón y Hg (% en peso) de hidrógeno en el carbon.

La Tabla 4 presenta el NHV del carbón:

4. Conclusiones

El equilibrio de adsorción de agua sobre una muestra de carbón sub-bituminoso colombiano se obtuvo a los 21, 30, 40 y 50 °C a través del método de adsorción estática. Los resultados mostraron que la adsorción de agua aumentó a medida que la presión de vapor iba en aumento y disminuye a medida que aumenta la temperatura, la máxima cantidad de adsorbida en la superficie del carbón fue encontrada a 21 °C. El modelo Talu y Meunier se utilizó para ajustar las isotermas de adsorción, mostrando un buen ajuste con el error de raíz cuadrada media (MSRE%) fue inferior al 10%. Además, la energía libre de Gibbs se encontró que tiene valores negativos, lo que corrobora el proceso de adsorción espontánea.

Las propiedades termodinámicas en valor calórico son parámetros importantes para controlar los procesos de transferencia de masa y energía relacionados con el uso de

Tabla 4.
Poder calorífico neto de la muestra de carbón.

Muestra	HHV	NHV
	(Cal/g)	(Cal/g)
Carbón	5194 ± 77.91	4504 ± 67.56

Fuente: Autores.

carbones. Es posible determinar la cantidad energética para el secado del carbón calculando el área bajo la curva de la Fig. 6 entre los valores de cantidad adsorbida deseadas.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Nacional de Colombia por el apoyo logístico y financiero y ARGOS SA

Referencias

- [1] Talu, O. and Meunier, F., Adsorption of associating molecules in micropores and application to water on carbon, *AIChE Journal*, 42, pp. 809-819, 1996. DOI:10.1002/aic.690420319
- [2] Rutledge, D., Hubbert's peak, the coal question, and climate change, Excel Workbook (permission is given to copy this work provided that attribution is given and the following web link is included). [Online], 2007. Available at: <http://rutledge.caltech.edu>,
- [3] Shafiee, S. and Topal, E., When will fossil fuel reserves be diminished?, *Energy Policy*, 37, pp. 181-189, 2009. DOI: 10.1016/j.enpol.2008.08.016
- [4] Castro, J., Perspectivas de la demanda energética global, *Petrotecnia*, pp. 54-70, 2011.
- [5] Rempel, H., Schmidt, S. and Schwarz-Schampera, U., Reserves, resources and availability of energy resources, Hannover, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). [Online], 2009. Available at: www.bgr.bund.de.
- [6] Dubinin, M., Inhomogeneous microporous structures of carbonaceous adsorbents, *Carbon*, 19, pp. 321-324, 1981. DOI: 10.1016/0008-6223(81)90079-8
- [7] Dubinin, M. and Serpinsky, V., Isotherm equation for water vapor adsorption by microporous carbonaceous adsorbents, *Carbon*, 19, pp. 402-403, 1981.
- [8] Bowes, P., Self-heating: evaluating and controlling the hazards: Department of the Environment, Building Research Establishment, 1984.
- [9] J. N. Carras and B. C. Young, Self-heating of coal and related materials: models, application and test methods, *Progress in Energy and Combustion Science*, 20, pp. 1-15, 1994. DOI: 10.1016/0360-1285(94)90004-3
- [10] Nalbandian, H., Propensity of coal to self-heat: IEA Clean Coal Centre London, 2010.
- [11] Karthikeyan, M., Kuma, J.V., Hoe, C.S. and Ngo, D.L.Y., Factors affecting quality of dried low-rank coals, *Drying Technology*, 25, pp. 1601-1611, 2007. DOI: 10.1080/07373930701590608
- [12] Salame, I.I. and Badosz, T.J., Study of water adsorption on activated carbons with different degrees of surface oxidation, *Journal of colloid and interface science*, 210, pp. 367-374, 1999. DOI:10.1006/jcis.1998.5918
- [13] Slasli, A., Jorge, M., Stoeckli, F. and Seaton, N., Modelling of water adsorption by activated carbons: effects of microporous structure and oxygen content, *Carbon*, 42, pp. 1947-1952, 2004. DOI: 10.1016/j.carbon.2004.03.034
- [14] Xin, L. and Zhong, L., Adsorption of water vapor onto and its electrothermal desorption from activated carbons with different electric conductivities, *Separation and Purification Technology*, 85, pp. 77-82, 2012. DOI: 10.1016/j.seppur.2011.09.048

- [15] Nishino, J., Adsorption of water vapor and carbon dioxide at carboxylic functional groups on the surface of coal, *Fuel*, 80, pp. 757-764, 2001. DOI: 10.1016/S0016-2361(00)00136-8
- [16] Allardice, D., Clemow, L., Favas, G., Jackson, W., Marshall, M. and Sakurovs, R., The characterisation of different forms of water in low rank coals and some hydrothermally dried products, *Fuel*, 82, pp. 661-667, 2003. DOI:10.1016/S0016-2361(02)00339-3
- [17] Charrière, D. and Behra, P., Water sorption on coals, *Journal of Colloid and Interface Science*, 344, pp. 460-467, 2010. DOI: 10.1016/j.jcis.2009.11.064
- [18] Brunauer, S., Emmett, P.H. and Teller, E., Adsorption of gases in multimolecular layers, *Journal of the American Chemical Society*, 60, pp. 309-319, 1938.
- [19] Cortés, F., Chejne, F., Carrasco-Marín, F., Moreno-Castilla, C. and Pérez-Cadenas, A. Water adsorption on zeolite 13X: Comparison of the two methods based on mass spectrometry and thermogravimetry, *Adsorption*, 16, pp. 141-146, 2010. DOI: 10.1007/s10450-010-9206-5
- [20] Rouquerol, F., Rouquerol, J. and Sing, K., *Adsorption by powders and porous Solid; Principles, methodology and applications*, Academic Press, San Diego, 1999.
- [21] Franco, C., Martínez, M., Benjumea, P., Patiño, E. and Cortés, F., Water remediation based on oil adsorption using nanosilicates functionalized with a petroleum vacuum residue, *Adsorption Science & Technology*, 32, pp. 197-208, 2014. DOI: 10.1260/0263-6174.32.2-3.197
- [22] Franco, C.A., Montoya, T., Nassar, N.N. Pereira-Almao, P. and Cortés, F.B., Adsorption and subsequent oxidation of colombian asphaltene onto Nickel and/or Palladium oxide supported on fumed silica nanoparticles, *Energy & Fuels*, 27, pp. 7336-7347, 2013. DOI: 10.1021/ef4018543
- [23] Franco, C.A., Nassar, N.N. and Cortés, F.B., Removal of oil from oil-in-saltwater emulsions by adsorption onto nano-alumina functionalized with petroleum vacuum residue, *Journal of Colloid and Interface Science*, 433, pp. 58-67, 2014. DOI: 10.1016/j.jcis.2014.07.011
- [24] Comaposada, J., Gou, P. and Arnau, J., The effect of sodium chloride content and temperature on pork meat isotherms, *Meat Science*, 55, pp. 291-295, 2000. DOI: 10.1016/S0309-1740(99)00154-0
- [25] Vos P.T. and Labuza, T.P., Technique for measurement of water activity in the high aw range, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 22, pp. 326-327, 1974. DOI: 10.1021/jf60192a016
- [26] Coleman, R., Irreversible drying of carbonaceous fuels such as low-rank coals, in *Fuel and Energy Abstracts*, 1996, pp. 85-85.
- [27] Cortés, F.B., López, V. and Rojano, B.A., Sorption properties of cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.), *International Journal of Food Engineering*, 8, 2012. DOI: 10.1515/1556-3758.2421
- [28] Davy, R., Johnston, B., Nicol, S., Stapleton, L. and Veal, C., Residual moisture reduction of coarse coal using air purging. 2. Pilot scale studies, *Minerals Engineering*, 14, pp. 671-680, 2001. DOI: 10.1016/S0892-6875(01)00059-0
- [29] Omaña, M., Cortés, F., Isáza, C. y García, A., Isotermas de sorción de agua en residuos de extracción de jugo de naranja, *Biotechnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 8, pp. 61-67, 2010.
- [30] Zapata, K., Rojano, B.A. and Cortés, F.B., Effect of relative humidity on the antioxidant activity of spray-dried banana passion fruit (*Passiflora Mollissima* Baley)-Coated pulp: Measurement of the Thermodynamic Properties of Sorption, *Chemical Engineering Communications*, 202, pp. 269-278, 2015. DOI: 10.1080/00986445.2013.840829
- [31] Chen, X.D., A new water sorption equilibrium isotherm model, *Food Research International*, 30, pp. 755-759, 1997. DOI: 10.1016/S0963-9969(98)00042-8
- [32] Marchessault, R., Application of infra-red spectroscopy to cellulose and wood polysaccharides, *Pure and Applied Chemistry*, 5, pp. 107-130, 1962. DOI: 10.1351/pac196205010107
- [33] McCain, W.D., *The properties of petroleum fluids*: PennWell Books, 1990.
- [34] Shigehisa, T., Inoue, T. and Kumagai, H., Mathematical model of water sorption isotherms of UBC, *Fuel Processing Technology*, 131, pp. 133-141, 2015. DOI: 10.1016/j.fuproc.2014.11.023
- [35] Peinter, P., Starsinic, M. and Coleman, M., *Determination of functional groups in coal by fourier transform interferometry, fourier transform infrared spectroscopy*, Academic Press, New York, 4, 1985, 169 P.
- [36] Soares, J.L., *Desenvolvimento de novos adsorventes e processos híbridos em reforma catalítica por vapor de água*, 2003.
- [37] Cortes, F.B., Rojano, B. and Chejne-Janna, F., Advantages and thermodynamic limitations of the experimental sorption isosteric method, *DYNA*, 80, pp. 155-162, 2013.
- [38] Seifert J., and Emig, G., *Mikrostrukturuntersuchungen an porösen Feststoffen durch Physisorptionsmessungen*, *Chemie Ingenieur Technik*, 59, pp. 475-484, 1987. DOI: 10.1002/cite.330590606
- [39] Gossman, D., Net heating values versus High Heating values, *GCI Tech Notes*, 16, 2011, 1 P.

E.A. Taborda-Acevedo, es Ing. Químico de la Universidad Nacional de Colombia en el año 2007. MSc. en Ingeniería Química de la Universidad Nacional de Colombia en el año 2014. Actualmente estudiante de doctorado en sistemas energéticos de la Universidad Nacional de Colombia, perteneciente al grupo de investigación en fenómenos de superficie – Michael Polanyi con experiencia en proyectos de investigación y extensión en el área de fenómenos de superficie como adsorción, humectabilidad, reología, entre otros. Código ORCID: 0000-0001-5920-0830

W.J. Jurado, es Ing. Químico de la Universidad Nacional de Colombia. MSc. en Ingeniería Química de la Universidad Nacional de Colombia en el año 2014. Actualmente, perteneciente al Departamento de optimización de procesos del grupo ARGOS. Experiencia como líder de proyectos de investigación en cementos ARGOS. ORCID: 0000-0001-9236-7042

F.B Cortes, es Ing. Químico egresado de la Universidad Nacional de Colombia. Dr. en Ingeniería: Sistemas energéticos de la Universidad Nacional de Colombia. Profesor asociado de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín en el Departamento de Química y Petróleos. Director del Grupo de Investigación en Fenómenos de Superficie - Michael Polanyi, Departamento de Química y Petróleos, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Colombia; con experiencia en proyectos de investigación y extensión en el área de fenómenos de superficie aplicados a la productividad de yacimientos y áreas afines. ORCID: 0000-0003-1207-3859

Entregando
lo mejor de los
colombianos

Línea de atención al Cliente Nacional: 01 8000 111 210
Línea de atención al Cliente Bogotá: (57-1) 472 2000
» www.4-72.com.co



BOLETÍN DE CIENCIAS DE LA TIERRA No. 39

Es una edición de 150 ejemplares en papel
y se terminó de imprimir en el mes de Enero de 2016

En Todográficas Ltda.

Medellín - Colombia

Definition of homogeneous fertility areas through factorial and geostatistical analysis
Daniel Francisco Jaramillo-Jaramillo

Performance mining equipment (extraction-load-transportation) in the Ernesto Guevara
Factory
Orlando Belete-Fuentes, Severo Estenoz-Mejía & Yoandro Diéguez-García

Structural analysis of the Zipaquira Anticline
(Eastern Cordillera, Colombia)
Helbert García & Giovanni Jiménez

Simulation of processing minerals plants in Colombia through MODSIM®
Moisés Oswaldo Bustamante-Rúa, Alan José Daza-Aragón, Pablo Bustamante-Baena
& Manuel Julián Barros-Daza

Aggregated conceptual model of sediment transport for mountain basins in Antioquia-
Colombia
Santiago Cataño-Álvarez & Jaime Ignacio Vélez-Upegui

Geotechnical characterization of the silt from the terrace of the municipality of Olaya in
Antioquia, Colombia
Óscar Echeverri-Ramírez

Effect of the temperature in adsorption phenomena of water onto Sub-Bituminous coal
Esteban Alberto Taborda-Acevedo, William J. Jurado, & Farid B. Cortés

Definición de áreas homogéneas de fertilidad mediante análisis factorial
y geoestadística
Daniel Francisco Jaramillo-Jaramillo

Rendimiento del equipamiento minero de arranque-carga-transporte de la empresa
Comandante Ernesto Guevara
Orlando Belete-Fuentes, Severo Estenoz-Mejía & Yoandro Diéguez-García

Análisis estructural del Anticlinal de Zipaquirá
(Cordillera Oriental, Colombia)
Helbert García & Giovanni Jiménez

Simulación de plantas de procesamiento de minerales a través de MODSIM®
Moisés Oswaldo Bustamante-Rúa, Alan José Daza-Aragón, Pablo Bustamante-Baena
& Manuel Julián Barros-Daza

Modelo conceptual agregado de transporte de sedimentos para cuencas de montaña en
Antioquia- Colombia
Santiago Cataño-Álvarez & Jaime Ignacio Vélez-Upegui

Caracterización geotécnica de los limos de la terraza del municipio de Olaya, Antioquia,
Colombia
Óscar Echeverri-Ramírez

Efecto de la temperatura en el proceso de adsorción de agua en Carbón sub-bituminoso
colombiano
Esteban Alberto Taborda-Acevedo, William J. Jurado, & Farid B. Cortés